

弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器排种性能参数优化与试验

石林榕 孙步功 赵武云 杨小平 辛尚龙 王久鑫

(甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对西北旱区玉米铺膜种植特点,为提高气吸式玉米滚轮播种器的排种性能,利用弹性橡胶对气吸式排种器的吸种盘进行了结构改进。对吸种盘吸种过程进行受力分析,得到影响吸种能力的3个因素:吸种盘转速、气吸室负压、吸种盘上吸种垫吸孔直径。基于自制的弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器试验台,根据响应曲面法的 Central Composite Design 试验设计原理,以播种机吸种盘转速、气吸室负压、吸种盘上吸种垫吸孔直径为因素,以单粒合格指数为主要评价指标,兼顾重播指数和漏播指数,对台架试验结果进行多元回归拟合和方差分析。结果表明,单粒合格指数、重播指数的2个回归模型可靠;气吸室负压对单粒合格指数影响极显著,气吸室负压和吸种盘上的吸种垫吸孔直径对重播指数影响极显著。由参数优化结果可知:当播种机吸种盘转速 20 r/min、气吸室负压 5 kPa、吸种盘上的吸种垫吸孔直径 4 mm 时,单粒合格指数为 95.54%,漏播指数为 0.50%,重播指数为 3.96%。在同等条件下田间试验得到的单粒合格指数为 96.3%、漏播指数为 1.3%、重播指数为 2.4%,优化达到预期的效果。

关键词: 玉米; 气吸式排种器; 弹性吸嘴; 参数优化

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)10-0088-08

Optimization and Test of Performance Parameters of Elastic Air Suction Type Corn Roller Seed-metering Device

SHI Linrong SUN Bugong ZHAO Wuyun YANG Xiaoping XIN Shanglong WANG Jiuxin
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to improve the performance of air-suction seeder with corn roller, the structure of air-suction disc of air-suction seeder was improved by using elastic rubber according to the characteristics of corn film planting in northwest arid areas. Three factors affecting seed suction ability were obtained by force analysis of suction process of suction cup, which were the rotation rate of suction cup, negative pressure of suction chamber and suction hole diameter of suction pad of seed metering cup. To obtain better performance parameters of elastic suction-nozzle type corn roller seeder, on the self-made experimental platform of elastic suction-nozzle type corn roller seeder, and according to the central composite design experimental design principle of response surface methodology, the rotation rate of suction tray, negative pressure of suction chamber, suction hole diameter of suction pad of seeder were taken as factors, and the qualified rate of plant spacing was main target, taking into account the re-seeding. The response values of seeding rate and seeding failure rate were obtained. The results of bench experiment were fitted by multivariate regression and variance analysis. The two regression models of plant spacing eligibility rate and replaying rate were reliable. The negative pressure of air suction chamber had a significant effect on plant spacing eligibility rate, and the negative pressure of air suction chamber and the diameter of suction pad suction hole of seed metering tray had a significant effect on replaying rate. The results showed that when the rotation rate of the suction tray was 20 r/min, the suction chamber negative pressure was 5 kPa and the suction hole diameter of the suction tray was 4 mm, the qualified index of grain spacing was 95.54%, the miss sowing index was 0.50%, and the replaying index was 3.96%. Under the same conditions, the qualified index of grain spacing was 96.3%, the miss sowing index was 1.3% and the replaying index was 2.4%. The optimization achieved the desired results.

Key words: corn; suction seed metering device; elastic suction nozzle; parameters optimization

收稿日期: 2019-03-11 修回日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405086、51665001)、公益性行业(农业)科研专项(201503105)和甘肃农业大学农业工程学科建设开放基金项目(GAU-XKJS-2018-193)

作者简介: 石林榕(1983—),男,实验师,博士生,主要从事西北地区精密播种关键技术与装备研究,E-mail: shilr@gsau.edu.cn

通信作者: 赵武云(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业工程技术与装备研究,E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

0 引言

玉米机械化精密播种是提高播种效率的重要途径^[1],而排种器是播种机的关键部件。精量排种器按其工作原理分为机械式和气力式。机械式结构简单,对种子外形要求较高,损失较大^[2]。气力式排种器主要包括气吸式、气吹式、气压式和中央集排式等,气吸式排种器因对种子具有适应性强、损伤轻、能适应较高播种作业速度等优点而被广泛应用^[3-4]。国内学者对气吸式排种器做了大量研究^[5-9],包括采用机械托种盘辅助吸种、同步排种盘和负压腔室旋转吸种、扰动种群降低种子瞬态法向应力提高吸种能力、利用振动频率增强吸种能力、采用内充气吹式吸种等,这些均提高了吸种盘吸附种子能力,然而以上排种器安装于机架上,不能满足膜上鸭嘴破膜穴播的要求。西北旱区先铺膜保墒、后膜上播种模式效益较高,滚轮式排种器播种过程受到多种因素影响,尤其地面不平度影响较大,播种质量有待提高。

基于西北地区铺膜种植特点,本文针对气吸式玉米滚轮排种器在地膜上滚动穴播单粒合格指数低、漏播严重等问题,用弹性橡胶作为玉米吸种盘的吸种材料,对吸种盘吸种过程进行受力分析,研究影

响吸种能力的因素,根据响应曲面法的 Central Composite Design 试验设计原理,基于弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器试验台开展气吸排种试验,并优化弹性嘴式气吸排种器作业性能参数,进行大田试验加以验证。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器主要由排种器右壳体、种室隔板、吸种盘组件、种盘限位架、气室密封圈、扰种器、气管、鸭嘴、排种器主架、鸭嘴固定架和排种器左壳体等组成,如图 1 所示,其中吸种盘组件由吸种盘和弹性吸种垫组成,弹性吸种垫通过得力 6371 胶粘附于吸种盘吸种孔内,吸种盘(钢板,表面粗糙度 3.2)上的吸种孔由两个阶梯状孔构成,大孔直径 12 mm,深度 2 mm,用于安装弹性吸种垫,小孔直径 6 mm。弹性吸种垫材料为弹性橡胶(密度 0.92 g/cm³,扯断强度 19 MPa,中度回弹性能),外孔直径 6 mm,内孔直径 2 mm,深度 2 mm,吸种垫内径小于吸种盘的通气孔,为吸种垫法向变形留出空间。吸种盘与后壳体封闭空间连通。主要工作区域依次为吸种区、清种区、携种区和隔种区,如图 1b 所示。

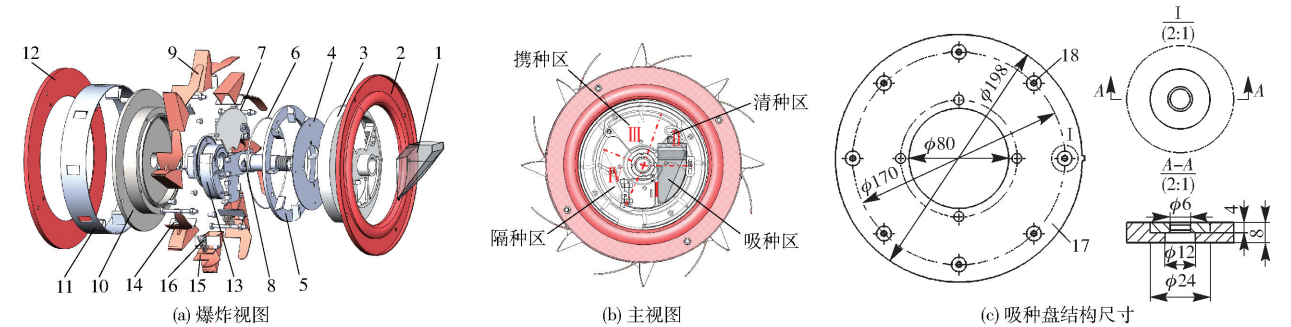


图 1 弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器结构示意图

Fig. 1 Schematics of seed metering with device-aspiration type and elastic suction nozzle

1. 入种口 2. 排种器右壳体 3. 种室隔板 4. 吸种盘组件 5. 种盘限位架 6. 气室密封圈 7. 扰种器 8. 气管 9. 鸭嘴 10. 排种器主架 11. 鸭嘴固定架 12. 排种器左壳体 13. 刮种板 14. 清种器 15. 支板 16. 弹簧 17. 吸种盘 18. 弹性吸种垫

1.2 工作原理

如图 1 所示,弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器可分为吸种区、清种区、携种区、隔种区。作业时,排种器壳体与膜面发生相对转动,吸种盘同步旋转,吸种盘一侧面向取种区,另一侧与由穴播轮后壳体和隔板组成的气吸室相通,气吸室与机架连接,不发生转动,风机使吸种盘两侧产生气压差,吸种盘转动经过吸种区 I 时种子克服种群对其作用力后被吸附在吸种盘组件的弹性吸种垫上,由于弹性吸种垫吸种时发生弹性变形,与玉米种子外形贴合紧密,单粒吸种力较大,多粒吸种几率降低。当玉米种子随吸种盘

旋转经清种区 II 并出现多吸种的情况时,由于弹性吸种垫大小和一粒种子截面面积相当,致使多吸的种子与光滑的吸种盘接触面较大,又因玉米与弹性气吸垫之间的摩擦因数大于玉米与吸种盘之间摩擦因数,多吸的种子会被扰种器搅动掉落至吸种区 I,后经过携种区 III,当种子运转至刮种板时,种子进入隔种区 IV,气吸室与吸种孔连通关闭,种子在重力及清种器综合作用下落至鸭嘴内,此后鸭嘴随排种轮旋转扎入土壤一定深度,鸭嘴上的支板在地面反作用力下打开,种子掉落入穴孔内,排种器继续滚动,支板离开地面,弹簧恢复原形,鸭嘴关闭。如此循环

完成连续播种。

2 种子受力分析

弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器工作时,种子所受外力主要有种子重力 G 、种子旋转惯性力 J 、吸孔吸附力 F 、吸孔处种子摩擦力 f 、空气阻力,由于在吸种区 I,玉米种子较多不易形成外部气流,玉米受到的空气阻力可忽略不计,吸种垫吸附种子后受力如图2所示。

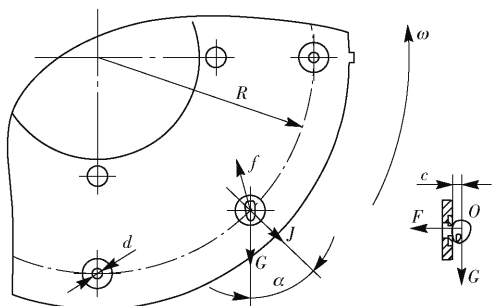


图2 种子受力示意图

Fig. 2 Schematic of seed under force

如图2所示,在垂直于水平面的气吸式吸种盘上,种子被吸住时的受力条件^[10]为

$$f > T \quad (1)$$

其中

$$T = \sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ\cos\alpha}$$

$$J = m\omega^2 R$$

$$G = mg$$

$$f = \mu F$$

$$F = \frac{\pi d^2 gp}{4}$$

式中 T ——玉米惯性力 J 和重力 G 的合力, N

α ——重力和惯性力之间夹角, ($^\circ$)

m ——单个玉米质量, kg

ω ——吸种盘角速度, rad/s

R ——吸孔位于吸种盘的半径, m

g ——玉米受到的重力加速度, m/s^2

μ ——摩擦因数

d ——吸孔直径, m

p ——气流密度, kg/m^3

当吸种盘转动角速度一定时,玉米惯性力 J 的大小一定,与重力 G 之间的夹角 α 发生变化,重力 G 的大小和方向不变。合力随着 $\cos\alpha$ 变化。从吸种盘底部开始(玉米离心力 J 和重力 G 重合且方向一致),合力 T 先减小,后增大。为避免种子从弹性吸种垫滑落,种子受到的摩擦力应满足 $f \geq \sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ}$ 。同时为避免玉米种子从弹性吸种垫掉落,种子受到的吸种力矩应大于其重力和离心力合力产生的力矩,由于弹性吸种垫的吸种孔与种

子充分接触,其吸种面积大于刚性吸种孔,种子与弹性吸种垫接触点位于吸种孔边缘,因此取吸种孔的半径作为吸力 F 的力臂,有

$$\frac{Fd}{2} > Tc \quad (2)$$

式中 c ——玉米重心与吸种盘上表面的距离, mm

如图3所示,当种子被成功吸附于吸种盘组件后,还需克服种群对其阻力。以种子质心为坐标原点建立坐标系,过原点水平线为 x 轴,垂直水平线为 y 轴,此时种子受力分别为线性运动方向阻力 f_d 、型孔对种子的支持力 N 、上层种群对种子的压力 N_t 、种子重力 G 、离心力 J 及下层种群对其支持力 N_b 。

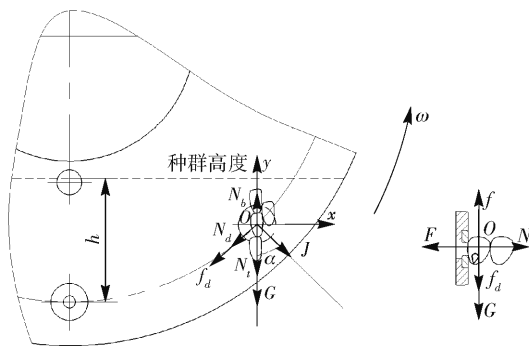


图3 种子脱离种群受力分析示意图

Fig. 3 Sketch of stress analysis of seed detachment from population

种子随吸种盘运动过程中, $N_b = 0$ 。为保证种子不掉落,需满足受力条件

$$f_x = (N_d + f_d) \cos\alpha - J \sin\alpha \quad (3)$$

$$f_y = N_t + G + J \cos\alpha + (N_d + f_d) \sin\alpha \quad (4)$$

式中 f_d ——种群对种子的摩擦力, N

N_d ——种子运动方向受到的阻力, N

由于种子离心力在种群中被反力抵消,离心力 J 可忽略,因此,式(3)、(4)可简化为

$$\begin{cases} f_x = (N_d + f_d) \cos\alpha \\ f_y = N_t + G + (N_d + f_d) \sin\alpha \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,吸种盘吸种区域主要为 $[0, \pi/4]$,在其他力一定的情况下,随着 f_x 减小, f_y 增大,即种子受到的摩擦力 f 方向与 x 轴夹角不断增加, f 不断增加。

吸孔处种子摩擦力计算式为

$$f = \frac{\pi d^2 pg\mu_a}{4} \quad (6)$$

式中 μ_a ——种子与弹性吸种垫之间的摩擦因数

由式(6)可知,若要玉米种子被吸牢,要求种子与弹性吸种垫之间的摩擦因数 μ_a 、吸种垫吸孔直径 d 和气流密度 p 值大。如图4所示,通过倾角法比较和测定玉米种子与吸种盘之间、玉米种子与弹性吸种垫之间的静摩擦因数,分别进行5组试验。试

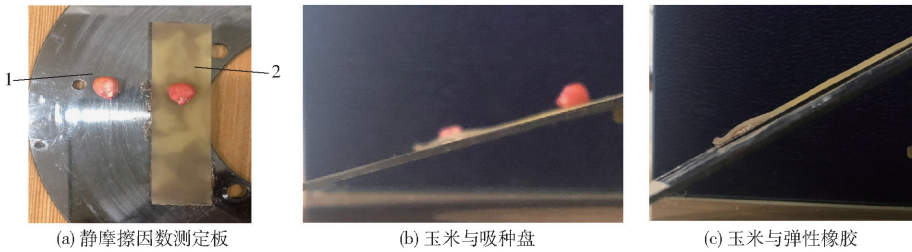


图 4 玉米种子与不同材料摩擦因数测定

Fig. 4 Coefficient determination of static friction between corn seeds and different materials

1. 吸种盘 2. 弹性橡胶

验中发现,随吸种盘与水平面之间的倾角缓慢增加,处于吸种盘的种子先于弹性吸种垫上的种子滑落,种子滑落角分别为 14°和 30°。经计算玉米种子与吸种盘之间的静摩擦因数为 0.25,玉米种子与弹性吸种垫之间的静摩擦因数为 0.58,本文所采用的弹性吸种垫增大了种子的摩擦力,能有效降低漏吸率,同时提高了种子的抗振性。

由式(2)可以看出,随吸种垫吸种孔直径的增大,吸附种子所需要的真空度降低,吸种盘吸种能力逐渐提高;而当吸种孔直径增大到一定值时,漏气量逐渐增大,吸种能力逐渐降低^[11]。同时,吸孔过大会使气流速度降低。种子气流拽力计算式为^[12]

$$F_d = C_d S_a \frac{\rho v^2}{2} \tag{7}$$

式中 C_d ——空气阻力因数,与种子形状、表面状态及雷诺数有关

S_a ——种子迎风面面积, m^2

v ——气流速度, m/s

由式(7)可知吸孔直径 d 并非越大越好。吸种孔直径需根据玉米种子的平均宽度来确定^[13],计算式为

$$d = (0.64 \sim 0.66) b \tag{8}$$

式中 b ——种子平均宽度, m

本文试验采用的玉米品种为郑单 958,宽度平均值为 6.21 mm,由式(8)计算得吸种孔直径为 4.04 mm。根据甘肃省农艺要求,确定玉米播种穴距为 220 mm,吸种盘上吸孔圆周分布直径为 170 mm,吸孔数为 8。气吸式播种机配套动力为洮河拖拉机厂生产的电动调速牵引机,机组前进速度选择为 0.60 m/s。气吸式玉米滚轮排种器滚动角速度为

$$\omega = \frac{2\pi v_m}{ak(1-\delta)} \tag{9}$$

式中 v_m ——牵引机前进速度, m/s

a ——株距, m

k ——窝眼轮穴孔数

δ ——地轮滑移率,取 5.7%^[14]

由式(9)可得 ω 为 2.27 rad/s (21.69 r/min)。在吸种区 I,为降低弹性吸种垫漏吸率,使种子牢靠吸附于吸嘴处,并运动突破种群阻力,吸室的真空度须大于理论计算值。计算理论最大真空度时,应以吸种区 I 所需真空压度为基准^[15]。计算式为

$$H_{\text{cmax}} = \frac{80K_1K_2mgc}{\pi d^3} \left(1 + \frac{v_1^2}{gr} + \lambda \right) \tag{10}$$

其中 $\lambda = (6 \sim 10) \tan\beta$

式中 H_{cmax} ——真空度最大值, kPa

v_1 ——吸孔中心处的线速度, m/s

r ——吸种盘吸孔处的转动半径, m

λ ——种子的摩擦阻力综合系数

β ——种子自然休止角, ($^\circ$)

K_1 ——外部条件系数,为影响种子吸种过程空气阻力、外部振动等因素的外部影响系数,一般为 1.8 ~ 2.0,由于滚轮式气吸式排种器与地面接触振动较大,会降低吸种性能,取 2

K_2 ——吸种可靠性系数,一般为 1.6 ~ 2.0,为了弥补种子大小形状及分布以及种间碰撞等因素造成的计算结果误差,取 2

根据对 1 000 粒郑单 958 种子的测定,该种子千粒质量为 0.343 kg,种子长度平均值为 11.57 mm,铝制圆筒条件下形成的玉米自然堆积角 β 为 26.56°,即 $\tan\beta = 0.5$, $\lambda = 8 \times 0.5 = 4$,根据式(10)求得吸室的真空度为 2.92 kPa。对于不同类型和品种的种子都有一个最佳的真空度范围,小真空度增加玉米漏吸率,大真空度增加重吸率^[16]。在实际工作中,由于排种器与风机之间存在管路压力损失、与地面接触振动幅度和频率较大等问题,将吸室的真空度上调至 3.5 kPa。

3 排种性能试验

3.1 试验因素

3.1.1 普通吸盘和弹性气嘴吸盘排种性能对比

为对比普通吸盘和弹性气嘴吸盘排种性能,进

行了排种试验。固定其余参数不变;排种轮转速为 20 r/min,气吸室负压 3.5 kPa。气孔在吸种盘组件上的位置直径为170 mm,试验种子采用郑单 958,气孔类型分为:原气孔,直径为 4 mm;弹性气孔,直径为 2 mm;弹性气孔,直径为 4 mm;弹性气孔,直径为 6 mm。几种类型吸孔的单粒合格率分别为 67.77%、95.87%、98.35%、99.85%。采用弹性吸嘴气吸盘的排种单粒合格率要高于采用原气孔的试验结果。

3.1.2 试验因素选择

通过玉米种子受力分析,筛选出对玉米气吸式播种机作业性能影响较大的因素:排种器吸种盘角速度、气吸室负压、吸种垫吸孔直径;通过计算得排种器吸种盘转速初始值为 20 r/min,气吸室负压的初始值为 3.5 kPa,吸种盘直径初始值为 4 mm。由于采用新材料弹性橡胶替换旧的吸种材料,需对影响吸种能力的 3 个主要因素进行优化。

3.2 试验方法

弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器排种试验依据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,采用 Central Composite Design 试验设计原理,以排种器吸种盘转速、气吸室负压、吸种垫吸孔直径为自变量,以单粒合格指数、漏播指数和重播指数为响应值。试验在自制的弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器试验台上进行,试验台如图 5 所示。根据上述计算结果确定了排种器吸种盘转速取值范围在 16~24 r/min,由试验台的调速电机和测速仪实现设定的转速。负压取值范围为 2~5 kPa,由负压调节器和数显式压力计实现设定的负压值。吸种垫吸孔直径范围为 3~5 mm,通过换取不同孔径的吸种垫来实现。试验因素编码如表 1 所示。试验设计及结果如表 2, x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。

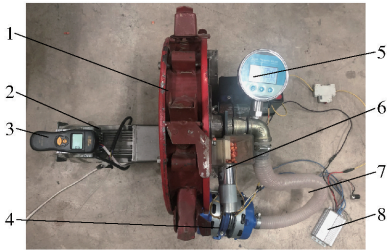


图5 弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器试验台
Fig.5 Experimental platform of corn roller metering device with flexible suction nozzle
1. 滚轮式排种器 2. 调速电机 3. 测速仪 4. 电动风机 5. 数显式压力计 6. 扰种电机 7. 气管 8. 负压调节器

3.3 回归模型

借助 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行多元回归拟合,分别得到单粒合格指数 y_1 、漏播指数 y_2 和重播指数 y_3 的回归方程。单粒合格指数

表 1 试验因素和编码
Tab.1 Factors and codes of test

编码	吸种盘转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	气吸室负压/ kPa	吸种垫吸孔直径/ mm
1.682	26.73	6.02	5.68
1	24.00	5.00	5.00
0	20.00	3.50	4.00
-1	16.00	2.00	3.00
-1.682	13.27	0.98	2.32

表 2 试验设计与结果
Tab.2 Experiment design and results

序号	因素			单粒合格指 数 $y_1/\%$	漏播指 数 $y_2/\%$	重播指 数 $y_3/\%$
	x_1	x_2	x_3			
1	-1	-1	1	81.67	15.00	3.33
2	0	0	1.682	68.33	0	31.67
3	0	0	0	90.00	8.33	1.67
4	1	-1	-1	78.33	21.67	0
5	-1.682	0	0	85.00	1.67	13.33
6	1.682	0	0	80.00	3.33	16.67
7	-1	1	-1	83.33	8.33	8.33
8	1	-1	1	76.67	21.67	1.67
9	0	0	0	93.33	0	6.67
10	0	0	-1.682	73.33	26.67	0
11	0	0	0	91.67	1.67	6.67
12	0	1.682	0	95.00	3.33	1.67
13	0	0	0	98.33	1.67	0
14	0	0	0	93.33	3.33	3.33
15	0	-1.682	0	85.00	15.00	0
16	-1	-1	-1	80.00	20.00	0
17	-1	1	1	83.33	1.67	15.00
18	1	1	1	91.67	1.67	6.67
19	1	1	-1	85.00	10.00	5.00
20	0	0	0	91.67	5.00	3.33

y_1 、漏播指数 y_2 的二次回归模型分别为

$$y_1 = 92.99 - 0.37x_1 + 3.18x_2 - 1.30x_3 + 2.09x_1x_2 + 0.42x_1x_3 + 0.83x_2x_3 - 3.29x_1^2 - 0.63x_2^2 - 7.41x_3^2 \quad (11)$$
$$y_2 = 3.21 + 0.94x_1 - 5.59x_2 - 4.75x_3 - 0.83x_1x_2 + 0.42x_1x_3 - 1.25x_2x_3 + 0.52x_1^2 + 2.88x_2^2 + 4.35x_3^2 \quad (12)$$

由于重播指数方差分析模型不显著,未将其列出。回归方程方差分析如表 3 所示。

由表 3 可知,单粒合格指数和漏播指数两个回归模型极显著,且其失拟项均不显著,说明所拟合的二次回归方程能正确反映单粒合格指数 y_1 、漏播指数 y_2 与 x_1 、 x_2 、 x_3 之间的关系。气吸室负压 x_2 对单粒合格指数影响极显著;气吸室负压 x_2 、吸种垫吸孔直径 x_3 对漏播指数均影响极显著。

表 3 回归方程方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression equation

来源	单粒合格指数					漏播指数				
	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 070.08	9	118.90	12.10	0.000 3 **	1 125.73	9	125.08	5.20	0.008 3 **
<i>x</i> ₁	1.88	1	1.88	0.19	0.670 9	12.00	1	12.00	0.50	0.496 1
<i>x</i> ₂	138.42	1	138.42	14.09	0.003 8 **	426.24	1	426.24	17.72	0.001 8 **
<i>x</i> ₃	0.22	1	0.22	0.022	0.884 3	307.88	1	307.88	12.80	0.005 0 **
<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	34.78	1	34.78	3.54	0.089 3	5.56	1	5.56	0.23	0.641 0
<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	1.39	1	1.39	0.14	0.714 2	1.39	1	1.39	0.058	0.815 1
<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	5.54	1	5.54	0.56	0.469 8	12.48	1	12.48	0.52	0.487 9
<i>x</i> ₁ ²	155.57	1	155.57	15.84	0.002 6 **	3.91	1	3.91	0.16	0.695 3
<i>x</i> ₂ ²	5.79	1	5.79	0.59	0.460 4	119.31	1	119.31	4.96	0.050 1 *
<i>x</i> ₃ ²	791.62	1	791.62	80.59	<0.000 1 **	272.90	1	272.90	11.34	0.007 1 **
残差	98.23	10	9.82			240.55	10	24.06		
失拟	57.08	5	11.42	1.39	0.364 1	196.16	5	39.23	4.42	0.064 3
误差	41.15	5	8.23			44.39	5	8.88		
总和	1 168.31	19				1 366.29	19			

注：**表示差异极显著(*P*<0.05)，*表示差异显著(0.05<*P*<0.1)。

3.4 各因素对排种性能指标的影响

3.4.1 单粒合格指数

排种器吸种盘转速和气吸室负压交互作用对排种单粒合格指数的影响如图 6a 所示。当吸种垫吸孔直径为 4 mm、气吸室负压一定时,随着吸种盘转速的增大,排种单粒合格指数先上升后下降;当吸种盘转速一定时,随着气吸室负压的增大,单粒合格指数缓慢上升。吸种盘转速和吸种盘上的吸种垫吸孔直径交互作用对排种单粒合格指数的影响如图 6b 所示。当气吸室负压为 3.5 kPa、转速一定时,随着吸种垫吸孔直径增大,单粒合格指数先上升后下降;当气吸室负压为 3.5 kPa、吸种垫吸孔直径一定时,随着吸种盘转速的增大,单粒合格指数先上升后降低。气吸室负压和吸种垫吸孔直径交互作用对排种单粒合格指数的影响如图 6c 所示。当吸种盘转速 20 r/min、气吸室负压一定时,随着吸种垫吸孔直径的增大,单粒合格指数先缓慢下降后缓慢上升;当吸种盘转速 20 r/min、吸种盘上的吸种垫吸孔直径一定时,随着气吸室负压的增大,单粒合格指数缓慢上升。

3.4.2 漏播指数

吸种盘转速和气吸室负压交互作用对漏播指数的影响如图 7a 所示。当吸种盘上的吸种垫吸孔直径为 4 mm、气吸室负压一定时,随着吸种盘转速的增大,漏播指数缓慢上升;当吸种盘上的吸种垫吸孔直径为 4 mm、吸种盘转速一定时,随着气吸室负压的增大,漏播指数先迅速下降再缓慢下降。吸种盘转速和吸种垫吸孔直径交互作用对漏播指数的影响如图 7b 所示,当气吸室负压为 3.5 kPa、吸种盘转速一定时,随着吸种盘上的吸种垫吸孔直径增大,漏播指数先迅速下降再缓慢下降;吸种盘上的吸种垫吸孔直径一定时,随着吸种盘转速的增大,漏播指数缓慢上升。气吸室负压和吸种垫吸孔直径交互作用对漏播指数的影响如图 7c 所示,当吸种盘转速 20 r/min、气吸室负压一定时,随着排种器吸种盘上吸种垫吸孔直径的增大,单粒合格指数先缓慢下降后缓慢上升;当吸种盘转速 20 r/min、吸种盘上的吸种垫吸孔直径一定时,随着气吸室负压的增大,漏播指数缓慢下降。

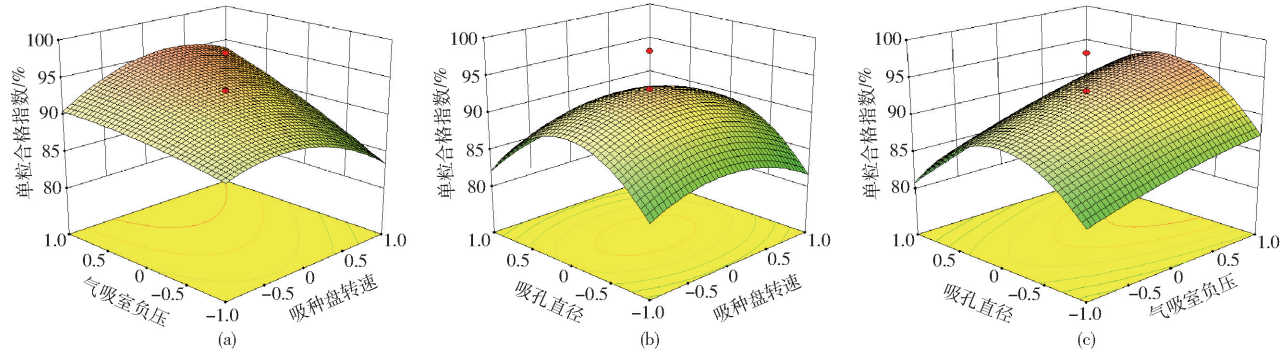


图 6 影响因素交互作用对单粒合格指数的影响

Fig.6 Effects of interaction of factors on qualified index of grain spacing

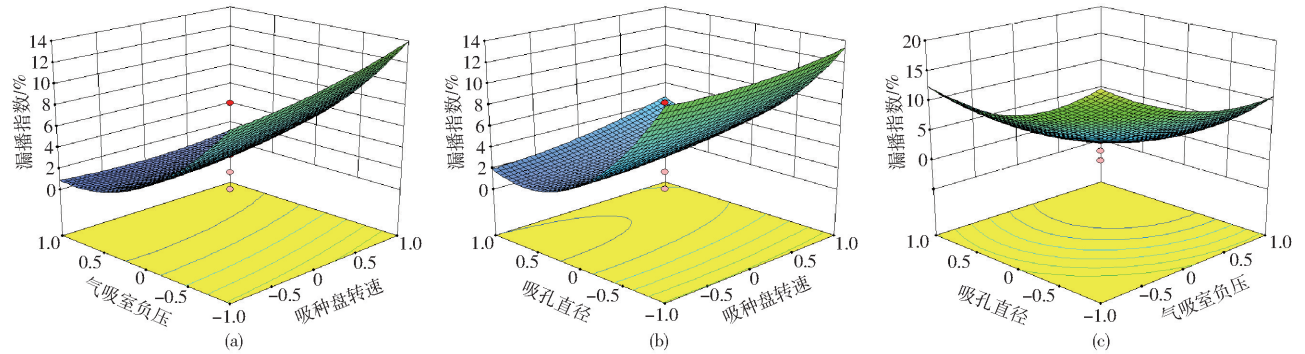


图7 影响因素交互作用对漏播指数的影响

Fig.7 Effects of interaction of factors on missing sowing index

3.5 参数优化与试验验证

3.5.1 参数优化

为了得到最佳的试验因素水平,结合试验因素的边界条件,通过式(11)、(12)回归方程模型进行优化求解,以播种单粒合格指数最大,漏播指数、重播指数最小为目标,对得出的单粒合格指数和漏播指数的回归方程进行分析,得到其非线性规划的数学模型^[17]

$\max y_1$

$\min y_2$

$s. t.$

$\begin{cases} 16\text{ r/min} < \omega < 24\text{ r/min} \\ 2\text{ kPa} < H_{\text{cmax}} < 5\text{ kPa} \\ 3\text{ mm} < d < 5\text{ mm} \\ 0 \leq y_1 \leq 1 \\ 0 \leq y_2 \leq 1 \end{cases}$

(13)

借助 Design-Expert 8.0.6 软件优化工具箱得到较优工作参数为^[18]:当 $\omega = 20\text{ r/min}$ 、 $H_{\text{cmax}} = 5\text{ kPa}$ 、 $d = 4\text{ mm}$ 时,单粒合格指数为 95.54%,漏播指数为 0.50%,重播指数为 3.96%。

3.5.2 试验验证

为了验证优化的弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器的播种性能参数,2018 年 3 月中旬在甘肃省洮河拖拉机厂试验田开展气吸嘴式玉米滚轮排种器播种试验,地势平坦,土壤肥沃,地表为白色平铺地膜。玉米试验品种为郑单 958。排种器由洮河拖拉机厂生产的电动调速牵引机牵引,气吸室负压由电动风机提供,调节牵引机速度为 0.6 m/s、气吸室负压 5 kPa、吸种盘上的吸种垫吸孔直径 4 mm 工作条件下,参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》测定了单粒合格指数、重播指数和漏播指数。试验进行 10 次并取平均值^[19-20],田间试验如

图 8 所示。

图8 玉米气吸式排种田间试验

Fig.8 Field experiment of corn air-suction metering

田间试验得排种器单粒合格指数 96.3%,漏播指数 1.3%,重播指数 2.4%。与优化结果相比:单粒合格指数和漏播指数略高,重播指数较低。

4 结论

(1)为解决气吸式玉米滚轮排种器在地膜上滚动穴播单粒合格指数低、漏播严重等问题,设计了弹性气吸嘴式吸种盘,对吸种盘吸种过程进行受力分析发现,影响吸种能力的因素为排种器吸种盘转速、气吸室负压、吸种垫吸孔直径,通过试验测定得到玉米种子与吸种盘、橡胶之间的静摩擦因数分别为 0.25 和 0.58。

(2)基于自制的弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器试验台,根据 Central Composite Design 试验设计原理开展气吸排种试验和排种性能参数优化。结果表明,单粒合格指数和漏播指数 2 个回归模型可靠;气吸室负压对单粒合格指数影响极显著,气吸室负压、吸种垫吸孔直径对漏播指数均影响极显著。田间试验发现,在牵引机速度为 0.6 m/s、气吸室负压 5 kPa、吸种盘上的吸种垫吸孔直径 4 mm 工作条件下,该排种器单粒合格指数 96.3%、漏播指数 1.3%和重播指数 2.4%,试验结果优于仿真结果。

参 考 文 献

[1] 丁力,杨丽,武德浩,等. 基于 DEM-CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11): 48-57.

- DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM - CFD coupling method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48 - 57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.006. (in Chinese)
- [2] 石林榕, 吴建民, 孙伟, 等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 40 - 48.
- SHI Linrong, WU Jianmin, SUN Wei, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 40 - 48. (in Chinese)
- [3] 贾洪雷, 陈玉龙, 赵佳乐, 等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 75 - 86, 139.
- JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75 - 86, 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)
- [4] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38 - 48.
- YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38 - 48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)
- [5] 杨丽, 史嵩, 崔涛, 等. 气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 48 - 53.
- YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 48 - 53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s10&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.010. (in Chinese)
- [6] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 10 - 18.
- SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 10 - 18. (in Chinese)
- [7] 颜丙新, 张东兴, 崔涛, 等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 15 - 23.
- YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 15 - 23. (in Chinese)
- [8] 张昆, 衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 78 - 86.
- ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 78 - 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170710&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.010. (in Chinese)
- [9] 崔涛, 韩丹丹, 殷小伟, 等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 8 - 16.
- CUI Tao, HAN Dandan, YIN Xiaowei, et al. Design and experiment of inside-filling air-blowing maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 8 - 16. (in Chinese)
- [10] 耿端阳. 新编农业机械学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [11] 陈进, 李耀明, 王希强, 等. 气吸式排种器吸孔气流场的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2009, 38(9): 59 - 62.
- [12] 颜丙新, 张东兴, 杨丽, 等. 重力辅助充种盘室同步气吸式排种器性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 117 - 124.
- YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Performance analysis of gravity assist filling precision seed-metering device with synchronously rotating seed plate and vacuum chamber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 117 - 124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s016&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.016. (in Chinese)
- [13] 刘文忠, 赵满全, 王文明, 等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 133 - 138.
- LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 133 - 138. (in Chinese)
- [14] 鹿瑶, 吕钊钦, 郑文秀, 等. 玉米窝眼轮排种器性能影响因素试验研究—基于 EDEM[J]. 农机化研究, 2018, 40(6): 155 - 161.
- LU Yao, LÜ Zhaoqin, ZHENG Wenxiu, et al. Research and experiment on nest hole wheel seed-metering device of maize[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 155 - 161. (in Chinese)

- Chinese)
- [13] GOLBACH F, KOOSTRA G, DAMJANOVIC S, et al. Validation of plant part measurements using a 3D reconstruction method suitable for high-throughput seedling phenotyping[J]. Machine Vision & Applications, 2016, 27(5): 663–680.
- [14] THAPA S, ZHU Feiyu, HARKAMAL W, et al. A novel LiDAR-based instrument for high-throughput, 3D measurement of morphological traits in maize and sorghum[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1187.
- [15] KHAN Z, CHOPIN J, CAI J, et al. Quantitative estimation of wheat phenotyping traits using ground and aerial imagery[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 950.
- [16] CHU Tianxing, MICHAEL J S, MICHAEL J B, et al. Characterizing canopy height with UAS structure-from-motion photogrammetry—results analysis of a maize field trial with respect to multiple factors[J]. Remote Sensing Letters, 2018, 9(8): 753–762.
- [17] WU C. Towards linear-time incremental structure from motion[C] // 3DV-Conference, International Conference on IEEE Computer Society, 2013: 127–134.
- [18] WU C, AGARWAL S, CURLESS B, et al. Multicore bundle adjustment[C] // Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2011: 3057–3064.
- [19] 王可, 郭浩, 刘威林, 等. 基于点云旋转归一化的猪体体尺测点提取方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1): 253–259.
WANG Ke, GUO Hao, LIU Weilin, et al. Extraction method of pig body size measurement points based on rotation normalization of point cloud [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 253–259. (in Chinese)
- [20] 吴文美. 基于 L-systems 的植物功能结构生长模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
WU Wenmei. Plant functional structure growth simulation based on L-systems[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. (in Chinese)
- [21] JIAO Xiang, ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, et al. Comparative analysis of nonlinear growth curve models for *Arabidopsis thaliana* rosette leaves[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(6): 114.
- [22] ARCHONTOULIS S V, MIGUEZ F E. Nonlinear regression models and applications in agricultural research [J]. Agronomy Journal, 2015, 107(2): 787–798.
- [23] WARSHANI W S, KUSUMASTUTI P. Describing the height growth of corn using Logistic and Gompertz model[J]. Agrivita Journal of Agricultural Science, 2013, 35(3): 237–241.
-

(上接第 95 页)

- [15] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 1–11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1–11. (in Chinese)
- [16] 刘文忠, 赵满全. 免耕播种机气吸式排种装置排种性能研究[C] // 中国农业工程学会学术年会论文摘要集, 2007.
- [17] 孙靖民, 梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [18] 王延耀, 李建东, 王东伟, 等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 54–58, 89.
WANG Yanyao, LI Jiandong, WANG Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 54–58, 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s11&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.011. (in Chinese)
- [19] 石林榕, 赵武云, 孙伟, 等. 电驱式小区玉米膜上直插穴播机的研制与试验[J/OL]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 32–38.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Development and experiment of electric driving insert hill-drop planter on film for plot corn[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 32–38. (in Chinese)
- [20] 石林榕, 赵武云, 孙伟, 等. 电驱式玉米膜上直插穴播机前进速度补偿机构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 87–94.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Parameters optimization of speed compensation mechanism of electric driving maize planter with dibbling on membrane [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 87–94. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170809&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.009. (in Chinese)