

苔麸播种机气流输送式排种系统设计与试验

赵金辉¹ 刘立晶^{2,3} 杨学军^{2,3} 杜佳伟¹ 赵郑斌^{2,4}

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083;

3. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128; 4. 农业生产机械装备国家工程实验室, 北京 100083)

摘要: 设计了一种苔麸播种机气流输送式排种系统, 该系统主要由排种器、风输送种管、分配器和风机等关键部件组成。对排种器、风输送种管和分配器进行理论分析与设计, 得到关键参数模型和理论值, 完成风机选型, 搭建了气流输送式排种系统试验平台。采用二次回归通用旋转组合设计试验, 以风输送种管进口风速和播种量为影响因素, 以总排种量稳定性变异系数和各行排种量一致性变异系数为响应指标, 对气流输送式排种系统进行台架试验, 运用 Design-Expert 软件对试验数据进行方差分析、响应面分析, 得到最优工作参数组合: 风速 25.42 m/s, 播种量 15 kg/hm²。最优参数组合试验结果表明, 各行排种量一致性变异系数 4.96%, 总排种量稳定性变异系数 0.98%, 试验值与理论优化值相对误差小于 4.2%, 种子破损率 0.12%, 排种均匀性变异系数 20.4%, 满足标准和农艺要求。

关键词: 苔麸播种机; 气流输送系统; 排种器; 设计; 试验

中图分类号: S223.2⁺6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)S0-0101-07

Design and Experiment of Pneumatic Seeding System of Teff Seeder

ZHAO Jinhui¹ LIU Lijing^{2,3} YANG Xuejun^{2,3} DU Jiawei¹ ZHAO Zhengbin^{2,4}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China

4. National Engineering Laboratory for Agricultural Production Machinery and Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: Teff is one of Ethiopia's most important cereal crops. It is grown by about six million households on approximately 2.2 million hectares or 30% of the land area under cereal production. In Ethiopia, teff is mainly produced by smallholder farmers in a traditional way, and it is a very laborious process, both pre- and post-seeding. In order to solve the problem of Ethiopia teff mechanization seeding, a pneumatic seeding system of teff seeder was designed. The system mainly included seed-metering device, air delivery tube for seeds, distributor, fan and so on. The seed-metering device, air delivery tube for seeds, distributor was designed and analyzed, and the key parameters of pneumatic seeding system were got. The fan was selected by the key parameters, and the pneumatic seeding system experiment platform was set. The quadratic regression general rotation combination design was used for the experiment and the inlet wind speed of air delivery tube and seeding rate were taken as the influential factors. The stability variability coefficient of the full seeding quantity and the consistency variability coefficient of row seeding quantity were measured and analyzed. Through the analysis of variance and response surface analysis by Design-Expert software, the mathematical model was optimized and validated. The wind speed was 25.42 m/s and seed rate was 15 kg/hm², which was optimal parameter combination. The results under the optimized experiment showed that the consistency variability coefficient of row seeding quantity was 4.96% and the stability variability coefficient of the full seeding quantity was 0.98%. The seed damaged rate was 0.12%, and seed uniformity coefficient of variation was 20.4%. The parameters can meet the standard and agronomy requirements.

Key words: teff seeder; pneumatic seeding system; seeder meter; design; experiment

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-28

基金项目: 比尔及梅琳达·盖茨基金会项目(OPP1118825)

作者简介: 赵金辉(1987—),男,工程师,主要从事农业机械装备与关键技术研究,E-mail: zhaojh281@163.com

通信作者: 杨学军(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: camms@263.net

0 引言

苔麸是埃塞俄比亚最主要的传统粮食作物,籽实是当地传统食物“英吉拉”的主要原料,苔麸年种植面积 190 ~ 220 万 hm², 占其全部作物总种植面积 30% 以上,生产过程以人工和畜力作业为主^[1-2]。传统的苔麸种植方式为人工撒播,存在产量低且收获时倒伏严重的现象。近年来,为了提高苔麸产量、减少劳动强度,探索出了苔麸条播种植方式^[3-4]。赵金辉等^[5]针对当地黏性土壤条件设计了基于 PLC 控制系统的苔麸播种机,研究了播种量和播种速度对播种机性能参数的影响。

欧美以大型气流输送式播种机为主,幅宽和工作效率均较高,适应大型农场播种作业^[6],不适应埃塞当前土地经营方式与雨季黏性土壤条件下的种植模式,且价格昂贵。气流输送式排种系统采用机械供种、气流输送分配成行的播种方式,主要适用于小麦、油菜和苜蓿等条播作物^[7-10]。李中华等^[11]利用 9BQM-3.0 型正压式气送免耕播种机进行了牧草种子试验,研究了风速、喂入量对排种均匀性的影响,分析结果并进行了优化设计。常金丽等^[12]研究了 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统,分析了排种定量器转速、播量和褶皱形增压管长度对各行排量一致性变异系数的影响规律。

埃塞土壤分为黑黏土、壤土和沙壤土^[13],其中苔麸的主产区为黏性土壤,黑黏土土壤条件下普通播种机易粘土、堵塞,为解决该土壤条件下的播种问题,本文设计一种适用于苔麸种子的气流输送式排种系统。

1 气流输送式排种系统及工作原理

1.1 苔麸播种技术条件

埃塞俄比亚季节差异明显,分为雨季和旱季,苔麸 7 月中旬播种(雨季),降雨量约为 750 ~ 850 mm,降雨较为频繁,11 月底开始收获(旱季)。

苔麸籽粒较小,长球体,长 1.01 ~ 1.27 mm,宽 0.59 ~ 0.87 mm,千粒质量 0.26 ~ 0.42 g,密度 1 242.71 kg/m³;小农户以人工撒播为主,播种量 30 kg/hm²;机械化播种为条播,播种量 15 kg/hm²,播种行距 15 ~ 20 cm。

1.2 排种系统结构及技术参数

根据苔麸的农艺要求和播种时田间土壤状况,设计了一种气流输送式排种系统,结构如图 1 所示,主要包括风机、种箱、排种器、风送输种管、弯头、导流管、分配器和导种管组成。结合埃塞俄比亚种植环境和规模,设计的分配器为 16 个出口,可以满足

16 行播种机使用。

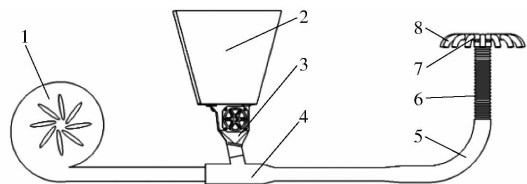


图 1 气流输送式排种系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of pneumatic seeding system

1. 风机 2. 种箱 3. 排种器 4. 风送输种管 5. 弯头 6. 导流管 7. 分配器 8. 导种管

1.3 工作原理

工作时,首先运行风机,待风机气流稳定后,根据农艺播种量要求,通过电机带动排种轮转动,带动种箱中的种子排出,种子在重力和风送输种管负压作用下落入落种区,在落种区苔麸种子和气流充分混合成气固两相流,进入输送管道,在管道、弯管、导流管中,种子与气流进一步混合,在风力的作用下进入分配器,再在分配器导流和分流作用下均匀分配到各个导种管,完成气流输送式排种系统的排种过程。

2 关键部件设计

排种器、风送输种管和分配器是气流输送式排种系统的关键部件,其各项参数将直接影响排种性能。本文通过理论分析设计了排种器、风送输种管和分配器等关键部件。

2.1 参数确定

气流速度为

$$V_a = K_L \sqrt{\frac{\rho_s}{1\,000}} + K_d L \tag{1}$$

式中 V_a ——输送气流速度, m/s

K_L ——苔麸种子粒度系数,取 12

ρ_s ——苔麸种子密度,取 1 242.71 kg/m³

K_d ——苔麸种子特性系数,取 $(2 \sim 5) \times 10^{-5}$

L ——输送管道的折算长度, m

为了保证气流速度能够顺利输送种子,考虑到输送管道的密封性以及压损等影响因素,实际输送气流速度应较理论速度大 10% ~ 30%,因此实际设计时 $V_a = (1 + 10\%) \times 13.38 = 14.7$ m/s,取 $V_a = 15$ m/s。

苔麸种子的悬浮速度为

$$V_t = \sqrt{\frac{3g(\rho_s - \rho_a)d_s}{\rho_a}} \tag{2}$$

式中 ρ_a ——空气密度,取 1.205 kg/m³

d_s ——苔麸种子的等体积当量球直径, m

计算得苔麸种子的悬浮速度为 $V_t = 5.08$ m/s。

输送浓度比 μ 是指工作过程中管道中物料质量与空气质量之比,能反映每千克空气所能输送物料的质量。计算公式为

$$\mu = \frac{G_w}{G_q} \tag{3}$$

式中 G_w ——单位时间输送的物料质量,kg/h
 G_q ——单位时间通过输送管空气质量,kg/h
查阅资料,得到常用物料混合浓度比的经验值,确定苔麸种子与空气合适的质量比。考虑到苔麸种子颗粒较小,综合常用经验值,选取 $\mu=0.5$ 。

输送管道直径计算公式为

$$D = \sqrt{\frac{4q}{\pi V_a}} \tag{4}$$

其中 $q = G_q/\rho_a$
式中 q ——单位时间风量, m^3/s
 D ——输送管道内径,mm

计算可得 $D=0.0306\text{ m}$,取 $D=30\text{ mm}$ 。

2.2 排种器设计

排种器是播种机的关键部件之一,其性能关系到播种机作业质量和实用性^[14-17]。目前谷物条播机使用的排种器多为外槽轮排种器,其结构简单、性能稳定。其中,直槽式排种轮转到齿槽处排种量较大,转到齿脊时排量较小,种子流存在脉动现象,均匀性相对较差^[18]。为了克服以上问题,本文采用螺旋槽轮式排种器,其凹槽呈螺旋形分布,保证种子流在排种口不是整槽排出,而是随着排种轮的转动,沿凹槽旋转方向连续不断投种,从而减少脉冲现象,均匀性较好。排种轮如图2所示。

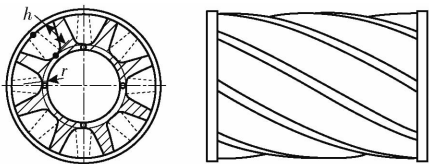


图2 排种轮结构图
Fig.2 Sketch of seed-metering wheel

外槽轮排种器每转一圈的排种量 q_1 与每公顷播种量 Q 之间的数学关系为

$$\begin{cases} q_1 = \pi D_1 l \rho_s \left(\frac{a_0 f_q}{t} + \lambda \right) \\ f_q = f(r, h) \\ Q = \frac{10 i q_1}{\pi D_2 m (1 - \delta_z)} \\ t = \frac{\pi D_1}{Z} \end{cases} \tag{5}$$

式中 D_1 ——外槽轮直径,mm Z ——凹槽槽数
 D_2 ——驱动轮直径,mm i ——传动比
 Q ——播种量, kg/hm^2

δ_z ——滑转率,%
 m ——行距,mm
 t ——槽轮凹槽节距,mm
 r ——凹槽半径,mm
 h ——槽深,mm
 l ——槽轮的有效工作长度,mm
 a_0 ——槽内种子充满系数,取0.68
 f_q ——单个凹槽的截面积, mm^2
 λ ——带动层特性系数,取0.25

排种轮的外径、槽数和转速是影响排种量的重要因素。当排种量一定时,排种轮直径过大,转速和有效工作长度就会减小,排种均匀性随之降低;排种轮直径过小,其上均布的槽数相对减少,若排种量不变,则需要提高排种轮转速,当排种轮转速过高,种子破碎率增加,并且会造成充种率降低,影响排种稳定性。因此,根据苔麸种子尺寸形状和农艺要求,结合装置结构,设计排种轮外径67 mm,槽数8个,最大工作长度73.5 mm,外沿槽宽10 mm,槽深14 mm,凹槽半径8 mm。

为了保证排种轮工作的连续性,相邻2个凹槽在螺旋线上应保证首尾相接,在前面一个凹槽末端排完种子的同时,保证下一个凹槽的前端开始排种。但同时考虑到排种量调节需要调整排种轮的有效工作长度,因此应保证有效工作长度大于1/2最大工作长度时也能保证至少一个完整地凹槽工作。在排种轮外径、槽数和最大有效工作长度固定的条件下,螺旋角的取值范围为

$$\arctan(2P_0/L_0) \leq \beta \leq \pi/2 \tag{6}$$

其中 $P_0 = \pi D_1/Z$

式中 β ——凹槽螺旋角,(°)
 P_0 ——凹槽节距,mm
 L_0 ——凹槽最大工作长度,mm

根据外槽轮直径、最大工作长度和槽数,通过式(6)得到螺旋角 $\beta=35.59^\circ$,选取螺旋角为 36° 。该组合下排种均匀性变异系数为17.9%,可满足排种均匀性要求。

2.3 风输送种管设计

风输送种管利用文丘里原理设计而成,是气流输送系统的关键部件之一。设计的风输送种管如图3所示。工作时,风机产生的压缩气流通过进风口A进入,在收缩区B处气流速度增加,静压减小,在喉部C区域,气流速度达到最大,并将通过落种区D排出的种子打散、混合后输送到出风口E中。为了防止种子在气流的作用下倒流,需保证落种口处的静压等于或稍低于大气压力。

进风口直径和出风口直径设计相同,为输送管

道直径,即 $d_1 = d_3 = D = 30\text{ mm}$ 。为了保证荳豨播种量最大情况下仍能顺利落入落种区,取 d_2 为 30 mm ,喉部高度 h_1 为 15 mm ,收缩角 α 为 30° 。

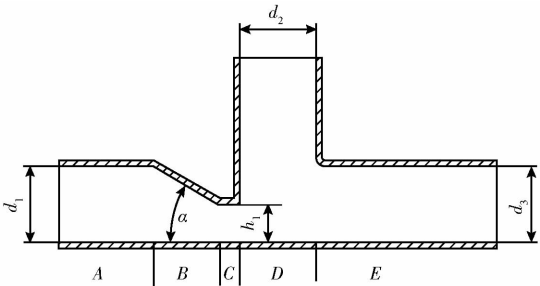


图 3 风送输种管结构图

Fig. 3 Structure diagram of seeds delivery tube

A. 进风口段 B. 收缩区 C. 喉部 D. 落种区 E. 出风口段

2.4 分配器设计

分配器是气流输送式排种系统中一个重要的工作部件,相当于一个定量多行排种器^[19]。种子流的通过能力及其分布均匀性在很大程度上取决于分配器的形状和结构参数。根据播种均匀性的要求,分配器的形状应能尽量减少空气、种子混合流在其管道内产生涡流、滞流和急剧的收缩现象,以免引起气固两相流的离析和沉淀现象,从而保证种子流的均匀分布。因而设计的分配器流道顺畅光滑、流线型好,避免了分配器上端流道变化产生涡流和滞流现象。设计的分配器如图 4 所示。

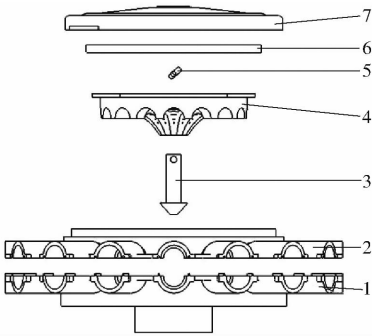


图 4 分配器结构图

Fig. 4 Structure diagram of distributor

1. 分配器下壳体 2. 分配器上壳体 3. 圆锥销 4. 导流盖板
5. 开口销 6. 密封圈 7. 分配器盖

该分配器封闭效果良好,其中导流盖板与分配器上、下壳体形成的内腔表面平滑过渡,能够有效地降低气流垂直方向的速度损失,防止种子与导流盖板发生强烈撞击损伤种子。工作时种子和空气的混合流由分配器下壳的入口进入到分配器腔体内,在导流盖板和圆锥销的作用下,沿分配器上、下体形成的轨迹通道均匀分配到各个排种管道中。

该分配器的尺寸较小,分配器上、下壳体拆卸方便,可以有效解决腔体内部的堵塞问题;为防止导流盖板与分配器上壳体存在间隙,设计橡胶密封垫圈,

保证贴合紧密。该分配器具有较多的复杂曲面,加工工艺非常复杂,故采用 3D 打印技术完成。

2.5 风机选型

气流输送式排种系统稳定工作时风量 q 的计算公式为

$$q = G_q / \rho_a = 39.8\text{ m}^3/\text{h} \tag{7}$$

直管沿程摩擦压力损失 ΔP_1 为

$$\Delta P_1 = \lambda_a \frac{L}{D} \frac{\rho_a V_a^2}{2} \tag{8}$$

式中 λ_a ——纯气流摩擦阻力系数,取 $0.03 \sim 0.04$
计算可得 $\Delta P_1 = 135.56\text{ Pa}$ 。

弯管的压力损失 ΔP_2 为

$$\Delta P_2 = \xi_s \frac{\rho_a V_a^2}{2} \tag{9}$$

其中 $\xi_s = \xi_a (1 + \mu K_2)$

式中 ξ_s ——两相流弯管阻力系数

K_2 ——系数

ξ_a ——纯气流通过弯管压力损失系数

ξ_a 取 0.11 , K_2 取 0.4 , 计算可得 $\Delta P_2 = 13.41\text{ Pa}$ 。

风送输种管的压力损失 ΔP_3 为

$$\Delta P_3 = (\xi_1 + \xi_2) (1 + u K_3) \frac{\rho_a V_a^2}{2} \tag{10}$$

其中 $\xi_1 = \xi \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 + \frac{\lambda_m}{8 \tan \alpha} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$

$$\xi_2 = \left(\frac{A_3}{A_2} - 1 \right)^2$$

式中 ξ_1, ξ_2 ——两相流风送输种管阻力系数

K_3 ——系数

A_1 ——风送输种管进风口 A 段的截面积

A_2 ——风送输种管喉部 C 段的截面积

A_3 ——风送输种管落种区 D 段的理论截面积

λ_m ——相应小管和大管沿程阻力系数的平均值,取 0.03

$\alpha = 30^\circ, A_2/A_1 = 0.5, A_3/A_2 = 2$, 已知 $\xi = 0.25, \varepsilon = 0.644, K_3$ 取 0.25 , 计算可得 $\Delta P_3 = 149.20\text{ Pa}$ 。

加速压力损失 ΔP_4 为

$$\Delta P_4 = \xi_{s1} \mu \frac{\rho_a V_a^2}{2} \tag{11}$$

其中 $\xi_s = 2 (V_{s0}/V_a - 0.8)$

式中 ξ_{s1} ——加速压损系数

V_{s0} ——加速区的初速度

由截面积比可知 $V_{s0}/V_a = \sqrt{A_1/A_2} = 1.414$, 计算可得 $\Delta P_4 = 83.24\text{ Pa}$ 。

提升压力损失 ΔP_5 为

$$\Delta P_5 = 9.8 \mu \rho_a h_0 \frac{V_a}{V'_s} \tag{12}$$

式中 h_0 ——垂直提升高度, m
 V'_s ——垂直加速段颗粒速度, m/s

查表可得 $\frac{V_a}{V'_s} = 10$, 计算可得 $\Delta P_5 = 35.43 \text{ Pa}$ 。

气流输送式排种系统的压损为

$$\Delta P = (1 + 20\%) (\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5) \tag{13}$$

可知压损为 500.20 Pa, 根据风机的基本要求和风量、风压的计算, 选择 DF-2 型风机, 其性能参数如表 1 所示。

表 1 风机性能参数

Tab.1 Performance parameters of fan

参数	功率/ kW	最大转速/ (r·min ⁻¹)	电压/ V	全压/ Pa	风量/ (m ³ ·h ⁻¹)	出口直 径/mm
数值	0.75	2 800	220	1 210	120	30

3 气流输送式排种系统试验

3.1 试验条件及方法

根据 GB/T 9478—2005《谷物条播机 试验方法》及 GB/T 25421—2010《牧草免耕播种机》标准中测试内容和测试方法, 对排种性能进行检测。检测设备包括电子天平、游标卡尺、秒表及卷尺等。气流输送式排种系统如图 5 所示。

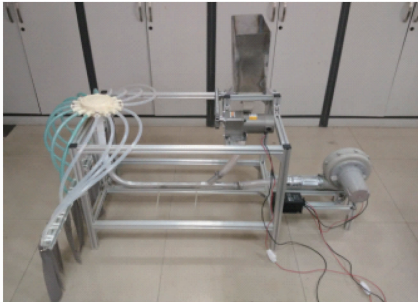


图 5 气流输送式排种系统
Fig. 5 Pneumatic seeding system

在试验过程中, 分别进行了排种均匀性、各行排种量一致性、总排种量稳定性和种子破损率测定。

各行排种量一致性: 测定 6 行, 重复 5 次, 计算各行排种量一致性变异系数。

总排种量稳定性: 测试方法同各行排种量一致性相同, 重复 5 次, 计算总排种量稳定性变异系数。

进行各行排种量一致性和总排种量稳定性试验时, 选定风送输种管入口风速 x_1 和播种量 x_2 为试验因素, 根据埃塞俄比亚不同地区农艺要求, 播种量满足 $10 \sim 20 \text{ kg/hm}^2$, 风速 $18.5 \sim 32.2 \text{ m/s}$, 试验方法选用二次回归通用旋转组合设计^[20], 试验因素编码如表 2 所示。

排种均匀性: 测定收集容器中的种子质量, 每次

试验测定 5 次, 计算排种均匀性变异系数; 试验在最优参数条件下进行。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Coding of experimental factors

编码	因素	
	风速 $x_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	播种量 $x_2 / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
-1.414	18.50	10.00
-1	20.51	11.46
0	25.35	15.00
1	30.19	18.54
1.414	32.20	20.00

种子破损率: 与各行排量一致性同时测定, 从各个排种器排出的种子中取 5 份, 每份质量约 100 g, 选出破碎损伤的种子称其质量, 计算破碎种子质量占样本总质量的百分数。

3.2 试验结果及分析

根据二次回归通用旋转组合设计进行 13 组试验, 按照试验方法分别进行试验, 得到试验样本, 称量其质量, 计算得到总排种量稳定性变异系数 y_1 和各行排种量一致性变异系数 y_2 。试验方案与结果见表 3。

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Schemes and results of experiment

试验 序号	因素		总排种量稳 定性变异系 数 $y_1 / \%$	各行排种量 一致性变异 系数 $y_2 / \%$
	风速 $x_1 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	播种量 $x_2 /$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		
1	20.51	11.46	1.176	8.734
2	30.19	11.46	1.105	5.916
3	20.51	18.54	1.632	6.472
4	30.19	18.54	0.989	7.617
5	18.50	15.00	1.679	8.612
6	32.02	15.00	1.130	6.721
7	25.35	10.00	1.182	6.579
8	25.35	20.00	1.181	5.593
9	25.35	15.00	0.892	5.711
10	25.35	15.00	0.896	4.903
11	25.35	15.00	0.991	5.342
12	25.35	15.00	0.904	5.573
13	25.35	15.00	1.176	4.815

(1) 总排种量稳定性

通过对试验数据的处理, 总排种量稳定性变异系数方差分析如表 4 所示。

由表 4 可知, 去除不显著项拟合得到各因素影响总排种量稳定性变异系数 y_1 的回归方程为

$$y_1 = 5.65 - 0.35x_1 - 8.35 \times 10^{-3}x_1x_2 + 8.52 \times 10^{-3}x_1^2 \tag{14}$$

根据回归方程(14), 利用 Design-Expert 软件绘

制出播种量、风速对总排种量稳定性变异系数的响应曲面图,如图 6 所示。可知,当播种量固定时,总排种量稳定性变异系数随风速的增大先逐渐减小后

表 4 总排种量稳定性变异系数方差分析
Tab.4 Variance analysis on stability variability
coefficient of full seeding quantity

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.68	5	0.14	11.44	0.002 9 **
x_1	0.28	1	0.28	23.43	0.001 9 **
x_2	0.014	1	0.014	1.21	0.307 8
$x_1 x_2$	0.082	1	0.082	6.90	0.034 0 *
x_1^2	0.28	1	0.28	23.36	0.001 9 **
x_2^2	0.054	1	0.054	4.54	0.070 5
残差	0.083	7	0.012		
失拟项	0.024	3	0.008 1	0.55	0.675 5
纯误差	0.059	4	0.015		
总值	0.76	12			

注: **表示极显著 ($P < 0.01$); * 表示显著 ($0.01 \leq P \leq 0.05$),下同。

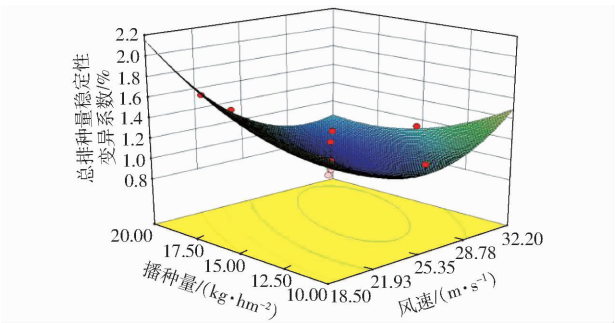


图 6 总排种量稳定性变异系数的双因素响应曲面

Fig. 6 Two-factor response surface for stability variability coefficient of full seeding quantity

增大;当风速一定时,播种量变化对总排种量稳定性变异系数影响变化不大,表明风速对总排种量稳定性变异系数的影响更大。在播种量 20 kg/hm²时,总排种量稳定性变异系数随着风速的减小,先急剧减小后缓慢变化,说明风速较小时,总排种量稳定性较差,各因素对总排种量稳定性变异系数影响的贡献率由大到小为:风速、播种量。

(2) 各行排种量一致性

通过对试验数据的处理,各行排种量一致性变异系数方差分析如表 5 所示。

由表 5 可知,去除不显著项拟合得到各因素影响各行排种量一致性变异系数 y_2 的回归方程为

$$y_2 = 74.86 - 3.74x_1 + 5.81 \times 10^{-2}x_1x_2 + 5.45 \times 10^{-2}x_1^2 + 3.88 \times 10^{-2}x_2^2 \quad (15)$$

根据回归方程(15),利用 Design-Expert 软件绘制出播种量、风速对各行排种量一致性变异系数的响应曲面图,如图 7 所示。可知,各行排种量一致性

变异系数较小,当播种量固定时,各行排种量一致性变异系数随风速的增大先减小后增大;当风速一定时,各行排种量一致性变异系数随播种量的增大同样先减小后增大。各因素对各行排种量一致性变异系数影响的贡献率由大到小依次为:风速、播种量。

表 5 各行排种量一致性变异系数方差分析
Tab.5 Variance analysis on consistency variability
coefficient of row seeding quantity

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	18.81	5	3.76	25.43	0.000 2 **
x_1	2.36	1	2.36	15.97	0.005 2 **
x_2	0.48	1	0.48	3.23	0.115 3
$x_1 x_2$	3.93	1	3.93	26.54	0.001 3 **
x_1^2	11.33	1	11.33	76.55	<0.000 1 **
x_2^2	1.64	1	1.64	11.09	0.012 6 *
残差	1.04	7	0.15		
失拟项	0.40	3	0.13	0.85	0.535 6
纯误差	0.63	4	0.16		
总值	19.85	12			

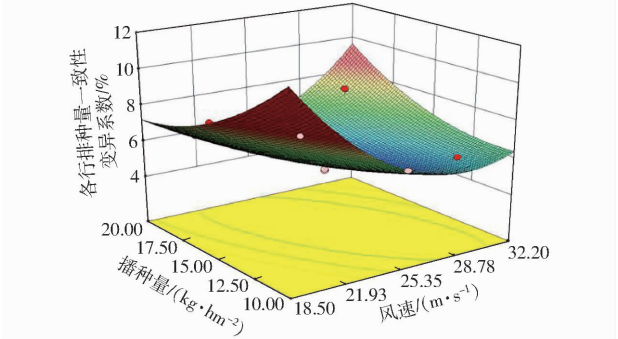


图 7 各行排种量一致性变异系数的双因素响应曲面

Fig. 7 Two-factor response surface for consistency variability coefficient of row seeding quantity

3.3 参数优化与试验

通过对试验结果的处理与分析,得到较优水平的参数组合,提高气流输送式排种系统的排种性能。根据试验结果和性能分析,将同时满足总排种量稳定性变异系数小于 1%、各行排种量一致性变异系数小于 5.5% 的工作参数组合视为较优水平组合,利用 Design-Expert 软件对两个响应曲面进行优化求解处理。结合苔麸农艺要求,得到在满足条件时的最优工作参数组合为:风速 25.42 m/s,播种量 15 kg/hm²,在最优工作参数组合下总排种量稳定性变异系数为 0.97%,各行排种量一致性变异系数为 4.76%。

在最优参数组合条件下,进行 5 次重复试验,计算处理可得总排种量稳定性变异系数为 0.98%,各行排种量一致性变异系数为 4.96%,试验值与理论优化值相对误差均小于 4.2%,验证结果与优化结果基本一致,误差在可接受范围内,该气流输送式排

种系统满足农艺要求。

最优参数组合条件下,测得排种均匀性变异系数 20.4%,小于 GB/T 25421—2010《牧草免耕播种机》标准要求 50%,种子破损率 0.12%,小于 GB/T 25421—2010《牧草免耕播种机》标准要求 0.5%。

4 结论

(1)设计了一种苔麸播种机气流输送式排种系统,实现了苔麸一器多行的机械化排种,开发了适合于苔麸的分配器,实现苔麸种子均匀分配。

(2)采用二次回归通用旋转组合设计试验分析播种量、风速分别对总排种量稳定性变异系数和各

行排种量一致性变异系数的影响规律,得到对总排种量稳定性变异系数和各行排种量一致性变异系数影响贡献从大到小为:风速、播种量。

(3)为得到气流输送式排种系统在播种量 10 ~ 20 kg/hm²调节范围内的总排种量稳定性变异系数和各行排种量一致性变异系数最优值,采用多目标优化分析,结合苔麸的农艺要求,得到最优工作参数组合:风速 25.42 m/s,播种量 15 kg/hm²。通过台架试验,总排种量稳定性变异系数为 0.98%,各行排种量一致性变异系数为 4.96%,试验值与理论优化值相对误差小于 4.2%,测得排种均匀性变异系数 20.4%,种子破损率 0.12%。

参 考 文 献

- 1 ZEWDU A, SOLOMON W K. Moisture-dependent physical properties of tef seed[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(1): 57-63.
- 2 ZEWDU A. Simulation of teff seed broadcasting[J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, 2008, 27: 1-14.
- 3 ABDUL S J. Competition effects of date of sowing and nut sedge removal time on yield and contributing characters of teff [eragrostis (zucc.) trotter][J]. American Journal of Applied Sciences, 2009, 80(3): 417-422.
- 4 TADESSE D. Study on genetic variation of landraces of teff (eragrostis teff (zucc.) trotter) in Ethiopia[J]. Genetic Resources and Crop Ewfutim, 1993, 40: 101-104.
- 5 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 基于 PLC 的苔麸播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 84-89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s013&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.013.
- 6 ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of teff seeder based on PLC [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 84-89. (in Chinese)
- 7 杨慧,刘立晶,周军平,等. 气流输送式条播机现状及我国应用情况分析[J]. 农机化研究, 2013, 35(12): 216-220.
- 8 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 48-51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120210&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.010.
- 9 LIAO Qingxi, ZHANG Ning, ZHANG Pengling, et al. Centrifugal metering device for rape seed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48-51. (in Chinese)
- 10 翟改霞,包德胜,王志军,等. 牧草播种机排种装置关键部件设计[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 47-51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2014s108&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.008.
- 11 ZHAI Gaixia, BAO Desheng, WANG Zhijun, et al. Design for metering device key parts of pneumatic grass seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 47-51. (in Chinese)
- 12 杨慧. 气流输送式排种系统性能试验研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2014.
- 13 YANG Hui. Experimental study on performance of pneumatic seeding system [D]. Beijing: Chinese Academy of Agriculture Mechanization Sciences, 2014. (in Chinese)
- 14 李萍,王振华,赵满全,等. 气力式免耕播种机试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 178-181.
- 15 LI Ping, WANG Zhenhua, ZHAO Manquan, et al. Experimental study on pneumatic-type no-till planter[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2012, 33(3): 178-181. (in Chinese)
- 16 李中华,王德成,刘贵林,等. 正压式气流排种器排种效果试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 89-93.
- 17 LI Zhonghua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. Experimental study on sowing seeds by air-stream metering mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 89-93. (in Chinese)
- 18 常金丽,张晓辉. 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 136-141.
- 19 CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)
- 20 赵荣华. 埃塞俄比亚的稀特粮食作物——苔麸[J]. 世界农业, 2012(12): 104-106.
- 21 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003.
- 22 刘立晶,杨学军,李长荣,等. 2BMG-24 型小麦免耕播种机设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 39-43.
- 23 LIU Lijing, YANG Xuejun, LI Changrong, et al. Design of 2BMG-24 no-till wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 39-43. (in Chinese)
- 24 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.
- 25 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)
- 26 楚杰,路海东,薛吉全,等. 玉米宽窄行深旋免耕精量播种机田间试验及效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 34-41.
- 27 CHU Jie, LU Haidong, XUE Jiquan, et al. Field experiment and effect of precise mechanical sowing of maize based on wide-narrow row deep rotation and no-tillage technology[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 34-41. (in Chinese)
- 28 刘忠军,张晋国. 斜槽轮式排种器工作长度的对比试验[J]. 农机化研究, 2009, 31(4): 137-138.
- 29 LIU Zhongjun, ZHANG Jinguo. Skewed slot wheeled seeding mechanism working length comparative trial research[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 137-138. (in Chinese)
- 30 张波屏. 现代种植机械工程[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- 31 陈魁. 实验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.