doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.005

气缝吸附式小麦宽苗带投种装置设计与试验

刘本瑞[1,2]　李　权[1]　刘　涛[1,2]　王　超[1,2]　王庆杰[1,2]　何　进[1,2]　李洪文[1,2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对小麦宽苗带播种机投种过程存在的种子弹跳及分布不均问题,本文设计一种基于气缝吸附力场作用的气力式宽苗带投种装置。在装置中引入气缝结构以形成局部吸附力场,实现下落种群均匀分种。采用离散元与有限元方法对气缝结构、中间段长度等关键参数进行建模与优化,明确结构参数对分种导向性及气力作用区均匀性的影响。利用 CFD－DEM 耦合方法仿真气力式投种过程,以气压、播量、中间导种通道宽度、气缝结构为因素,各行纵向排量一致性与行内横向变异系数为指标,运用 Minitab 建立回归模型并开展响应面分析,优选最佳参数组合。结果表明,播量、气缝结构、中间导种通道宽度对各行纵向排量一致性变异系数影响显著,播量、气压和导种通道宽度对行内横向变异系数影响显著。当气压为 －0.8 kPa、播量为 150 kg/hm^2、导种通道宽度为 11 mm、气缝结构为矩形时,2 类变异系数总体处于最低水平,其中各行纵向排量一致性变异系数为 2.16%,行内横向变异系数为 8.97%。台架试验进一步验证了仿真结果,随着正压增大,低播量条件下各行排量一致性变异系数先降后升,而高播量条件下持续下降,当气压约 2.25 kPa 时出现回流现象。行内横向变异系数整体保持在 8% ~15% 之间,变化不显著,满足小麦精量匀播作业要求。

关键词: 投种装置; 小麦宽苗带; 气力式投种; CFD－DEM 耦合
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)04-0038-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Air-gap Adsorption Wheat Wide Seedling Strip Sowing Device

LIU Benrui[1,2]　LI Quan[1]　LIU Tao[1,2]　WANG Chao[1,2]　WANG Qingjie[1,2]　HE Jin[1,2]　LI Hongwen[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment for Conservation Tillage*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To address the problems of seed bouncing and non-uniform distribution during the seed delivery process of wide belt seed wheat planters, a pneumatic wide belt seed delivery device based on the action of a slit-induced adsorption force field was designed. A slit structure was introduced into the device to generate a localized adsorption force field, enabling uniform division of the falling seed population. Discrete element and finite element methods were employed to model and optimize key parameters, including the slit structure and the length of the intermediate section, thereby clarifying the effects of structural parameters on seed-guiding behavior and the uniformity of the pneumatic action zone. The pneumatic seed delivery process was simulated using a CFD－DEM coupling method. Air pressure, seeding rate, intermediate seed-guiding channel width, and slit structure were selected as influencing factors, while the longitudinal seeding rate consistency coefficient of variation among rows and the transverse in-row coefficient of variation were used as evaluation indices. Regression models were established using Minitab, and response surface analysis was conducted to determine the optimal parameter combination. The results indicate that seeding rate, slit structure, and intermediate seed-guiding channel width have significant effects on the coefficient of variation of longitudinal seeding rate consistency among rows, whereas seeding rate, air pressure, and channel width significantly affect the in-row transverse coefficient of variation. When the air pressure was －0.8 kPa, the seeding rate was 150 kg·hm^{-2}, the seed-guiding channel width was 11 mm, and the slit structure was rectangular, both coefficients of variation reached their lowest overall levels, with the longitudinal seeding rate consistency

收稿日期: 2025－10－18　修回日期: 2025－11－20
基金项目: 国家自然科学基金项目(52175260)
作者简介: 刘本瑞(2003—),男,硕士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: jiafeo@cau.edu.cn
通信作者: 王超(1991—),男,副教授,博士,主要从事保护性耕作技术与智能装备研究,E-mail: superc@cau.edu.cn

coefficient of variation at 2.16% and the in-row transverse coefficient of variation at 8.97%. Bench tests further verified the simulation results. With increasing positive pressure, the coefficient of variation of seeding rate consistency among rows first decreased and then increased under low seeding rates, while it continuously decreased under high seeding rates; a backflow phenomenon occurred when the air pressure reached approximately 2.25 kPa. The in-row transverse coefficient of variation remained generally within the range of 8% ~15% with no significant variation, meeting the operational requirements for precision and uniform wheat sowing.

Key words: guiding device; wheat wide belt seed; pneumatic seed delivery; CFD - DEM coupling

0　引言

小麦是我国粮食生产体系中具有重要战略地位的主要作物[1-2]，其播种质量直接影响群体构建与产量[3-4]。传统撒播、条播和穴播等方式[5]易导致播深不一、分布不均、种间竞争加剧等问题[6-7]，严重制约个体发育与群体协调生长。为提升播种均匀性与出苗质量，科研工作者开始深入研究宽苗带播种技术[8]，该技术通过扩大行内播幅，使种子在较宽带域内均匀分布[9]，有助于优化光热资源利用[10]、提高氮肥效率[11-13]，并促进合理群体结构形成。

近年来，国内外学者围绕小麦宽苗带精量播种装置开展了多种结构优化与播种性能改进研究。翟萌萌[14]设计了一种机械式小麦宽幅精量播种装置，通过调节均布器与水平面夹角或圆锥半角，使种子在苗带上呈近似正态分布；牛琪等[15]基于籽粒自流打散原理，设计了斜置三角式分种装置，实现了种子横向均匀分流；姜萌等[16]提出了一种窝眼轮式精量排种与内四等分输种管组合的播种机结构，有效改善了带内播种均匀性并降低了开沟阻力；张春岭等[17]针对排量不稳定与种子分布不均问题，研发了交错凸齿式宽苗带排种器；赵鹏飞等[18]设计了气力斜盘式宽苗带匀播排种器，通过气力输送扩大苗带宽度、稳定投种过程，进一步提高了种子分布一致性。总体来看，现有研究虽在提升宽苗带播种均匀性方面取得了一定进展，但在种子下落阶段仍存在种子易发生弹跳与偏移、着落分布不均等问题，导致播种一致性和稳定性不足。

现阶段，小麦宽苗带播种装置虽在不断优化，但多数仍采用外槽轮式排种器或撒播器配合作业，种子在苗带内呈无规则分布[19]，尚难实现真正意义上的精量播种。原因为：种子分布不均，带内密度差异大。排种精度不足，导致粒距合格率低，变异系数增大。作为播种机核心部件，投种装置性能直接决定播种均匀性与作业质量。

针对上述问题，本文设计一种基于气力输送的小麦宽苗带投种装置。在投种装置中引入气力正压，实现种子均匀分种与精量匀播[20-21]，兼具结构一体化与播种精度提升的优势，并通过仿真计算与台架试验对装置播种性能进行验证，以期为宽苗带精量播种技术发展提供参考。

1　工作原理与主要结构设计

为解决气力式投种过程种子弹跳与分布不均等问题，基于宽苗带播种技术要求，开展气力式宽苗带投种装置结构设计与工作原理分析。依据宽苗带播种规范[22]，目标苗带宽度为 12 cm，每带均匀播 3 行种子，苗带间距设为 30 cm（图 1）。传统 12 行小麦播种机采用 20 cm 等行距，总播幅为 2.2 m。为实现幅宽兼容与田间作业适配，设计的宽苗带播种机采用 6 组气力式投种装置，每组对应一个宽 12 cm 的苗带单元，总播幅约 2.22 m，可与常规机型有效衔接。工作原理为：排种器定量排出的种子进入气力式投种装置后，在气流场作用下被分流为 3 股均匀种流，经出口下落后由覆土镇压轮压实于苗带种床中。

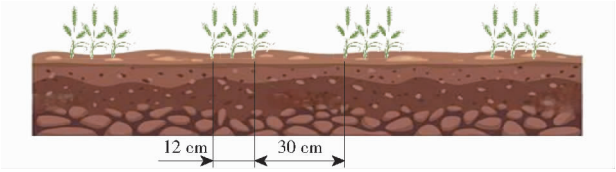


图 1　宽苗带播种规范

Fig. 1　Wide seedling strip sowing specifications

根据气力式排种原理，设计 3 段气缝吸附式宽苗带投种装置（图 2、3）。第 1 段为整流段，采用渐缩矩形通道，对排种器排出的种子进行整流汇聚；第 2 段为分种段，在斜面上设置渐宽通道与等宽气缝，并在气缝后布置负压腔，负压腔开口偏下，气流垂直于气缝斜面高速进入，形成定向负压气流，对种子产生吸附与加速双重作用，实现稳定分种；第 3 段为导向段，由 3 个倾斜通道组成，将 3 股种子流按预设间距导入目标苗带，实现多行均匀投种。

2　投种装置仿真参数设计

以负压式小麦宽苗带气缝吸附式投种装置为研究对象，开展离散元-流体耦合仿真。参照吕鹏

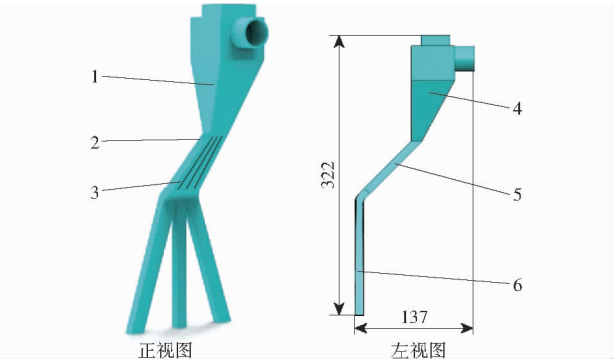


图 2 投种装置三维图

Fig. 2 3D diagram of seeding device

1. 渐缩通道 2. 渐宽通道 3. 等宽气缝 4. 整流段 5. 分种段 6. 导向段

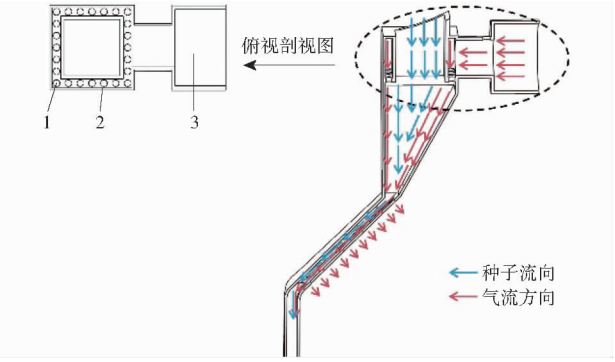


图 3 投种装置结构原理图

Fig. 3 Schematic of seeding device

1. 气孔 2. 环形气流通道 3. 气流入口

等[23]对济麦 22 号在宽苗带播种模式下,当播量为 150 kg/hm^2 时产量与群体性状达到最佳状态,结合田间作业经验及相关研究[12],将播量设为 75、120、150 kg/hm^2,以考察不同播量对种子分布及均匀性的影响。在仿真模型中,颗粒工厂按照对应播量的种子生成速度持续释放小麦籽粒,并保持群体特征一致[22],确保仿真数据的可靠。为系统分析气缝结构对投种性能影响,选取正梯形、矩形和倒梯形 3 种气缝结构(图 4),分别表示气缝宽度上升、恒定及下降的典型形态,以评估斜面结构对气流分布、吸附力场特性及种子分流规律的影响。已有研究表明,正梯形结构在吸种装置中具有良好的吸附均匀性[24],而矩形与倒梯形结构分别体现对称流场和反斜面导向效应,对比三种结构有助于确定最优气缝形态。

种子经气缝斜面均匀分配后进入 3 个导种通道。导种通道宽度直接影响种子分流均匀性,并需兼顾小麦粒径及田间种子尺寸分布[25],因此选择导种通道宽度为 11、12、13 mm 作为仿真因素进行对比。负压腔压力决定气缝局部吸附力场强度,从而影响种子输运及投射效果[26]。参照文献[27],设定负压为 -0.8、-1.1、-1.4 kPa,以考察负压对播种性能的影响。综上,选取气缝结构、导种通道宽度、负压及播量 4 个因素,每个因素 3 个水平,采用全因子设计开展离散元仿真。各试验因素水平见表 1。

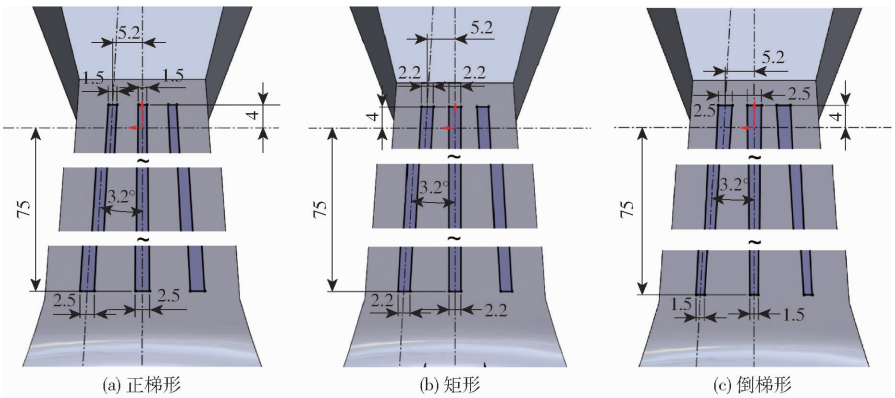


图 4 3 种气缝结构示意图

Fig. 4 Schematics of three types of air gap structures

表 1 耦合仿真试验因素

Tab. 1 Coupling simulation test factors

水平	因素			
	负压 A/kPa	播量 B/(kg·hm^{-2})	导种通道宽度 C/mm	气缝结构 D
1	-0.8	75	11	正梯形
2	-1.1	120	12	矩形
3	-1.4	150	13	倒梯形

3 投种装置数值模拟

3.1 仿真模型建立

为揭示气力式投种装置内种子运动规律,采用 Rocky DEM 离散元软件与 Fluent 计算流体力学软件进行耦合仿真[28-29],建立多物理场耦合分析模型,研究各参数对播种性能影响并优选关键设计参数。

将投种装置模型导入 Rocky DEM(图 5),在 3 个种子出口处分别设置立方体监测单元,通过用户定义函数统计各出口导出的种子数量。小麦颗粒物

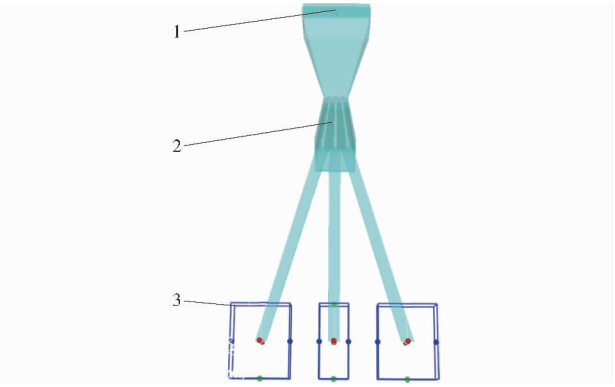


图 5　投种装置仿真监测单元示意图

Fig. 5　Schematic of simulation monitoring unit of seeding device

1. 颗粒工厂　2. 投种装置　3. 监测单元

料特性及投种装置参数设置见表 2。

表 2　小麦种子及投种装置材料物理特性参数

Tab. 2　Physical properties of wheat seeds and seeding device materials

材料	小麦	铁
泊松比	0.29	0.30
杨氏模量/Pa	1.31×10^{9}	1.82×10^{11}
密度/(kg·m^{-3})	1 350	7 800
碰撞恢复系数	0.43	0.51
静摩擦因数	1.25	0.32
动摩擦因数	1.24	0.18

3.2　试验指标

在 Rocky DEM 的后处理模块中，通过 User Processes 面板的监测单元管理功能，为 3 个出口处的立方体监测单元添加 Curves 数据输出节点，获得以时间为横坐标、种子累积数量为纵坐标的排种量阶梯曲线。仿真计算后，将排种量数据导出至 Excel 后，利用 Matlab R2023a 编制程序对数据进行整理与计算，以各行纵向排量一致性变异系数和行内横向变异系数作为播种均匀性评价指标。

单侧导种通道排种量计算式为

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{1}$$

式中　x_i——投种装置某侧导种通道排种量

$\bar{x}$——投种装置某侧导种通道平均排种量

n——试验次数

各行纵向排量一致性变异系数计算式为

$$\delta_1=\frac{\sigma}{\bar{x}_d}\times100\% \tag{2}$$

其中

$$\bar{x}_d=\frac{\bar{x}_L+\bar{x}_M+\bar{x}_R}{3} \tag{3}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{(\bar{x}_L-\bar{x}_d)^2+(\bar{x}_M-\bar{x}_d)^2+(\bar{x}_R-\bar{x}_d)^2}{2}} \tag{4}$$

式中　$\bar{x}_d$——投种装置排种量平均值

$\bar{x}_L$——投种装置左侧导种通道排种量

$\bar{x}_M$——投种装置中间导种通道排种量

$\bar{x}_R$——投种装置右侧导种通道排种量

σ——排种量标准差

δ_1——各行纵向排量一致性变异系数，%

由于小麦种子在气缝吸附式投种装置内完成投种存在滞后，导致排种量阶梯曲线初期无种子累积数据。为保证投种效果评估准确性，行内横向变异系数计算从 1 s 时刻开始统计种子排量，并将后续数据按时间划分为 5 段。单侧导种通道的行内横向变异系数计算式为

$$\delta_H=\frac{\sigma_H}{\bar{x}_H}\times100\% \tag{5}$$

其中

$$\bar{x}_H=\frac{1}{i}\sum_{i=1}^{m}x_{Hi} \tag{6}$$

$$\sigma_H=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(x_{Hi}-\bar{x}_H)^2}{4}} \tag{7}$$

式中　x_{Hi}——单侧播行内各段区域排种量

$\bar{x}_H$——单侧播行内单段区域平均排种量

σ_H——单侧播行内各段排种量标准差

δ_H——单侧导种通道行内横向变异系数，%

m——播行内分段段数，取 5

行内横向变异系数计算式为

$$\delta_2=\frac{\delta_{LH}+\delta_{MH}+\delta_{RH}}{3} \tag{8}$$

式中　δ_2——投种装置行内横向变异系数，%

δ_{LH}——左侧导种通道行内横向变异系数，%

δ_{MH}——中间导种通道行内横向变异系数，%

δ_{RH}——右侧导种通道行内横向变异系数，%

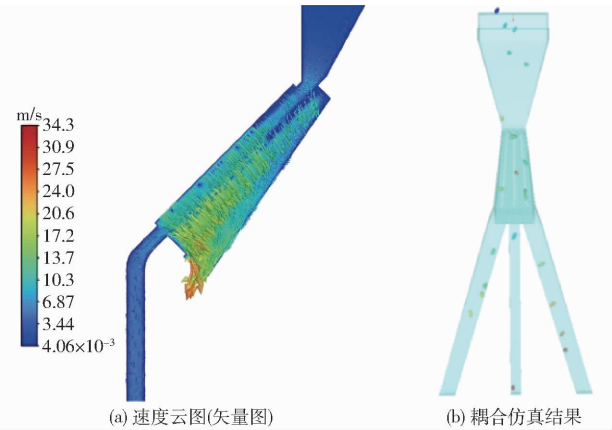
3.3　仿真结果分析

3.3.1　耦合仿真试验

通过 CFD－DEM 耦合对投种装置进行仿真，耦合仿真过程如图 6 所示。由图 6 可知，集中气力优势区域后，气缝处形成的局部吸附力场显著增强，气流矢量主要垂直于气缝斜面方向，种子进入气缝区域后在吸附力场作用下被稳定分为 3 股种子流，分别导入第 3 段通道，分种均匀性良好。

3.3.2　多因子交互下的变异系数

为进一步量化不同结构与作业参数对排种性能的影响，基于耦合仿真试验以及试验因素设计了多组参数组合试验。在 3 种气缝形状条件下，以导种通道宽度为序，对不同负压与播量组合下的排种一致性进行多因子交互分析，综合评价各行纵向排量一致性变异系数与行内横向变异系数。



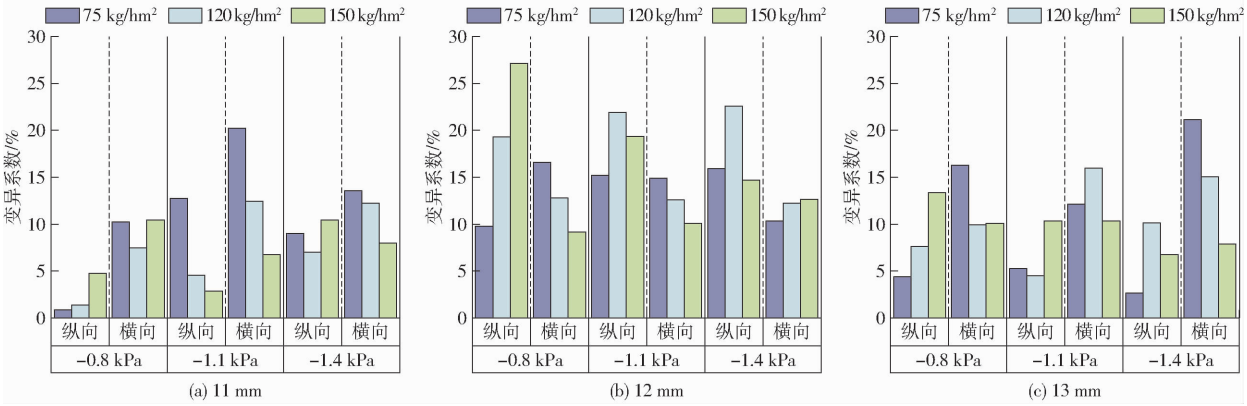
(a) 速度云图(矢量图) (b) 耦合仿真结果

图 6 投种装置 Fluent 流体分析及耦合投种过程

Fig. 6 Fluent fluid analysis of seeding device and coupled seeding process

如图 7 所示,在正梯形气缝条件下,不同通道宽度、负压及播量组合对整体播种一致性具有显著影响。当通道宽度为 11 mm、负压为 -0.8 kPa、播量为 75 kg/hm^2 时,变异系数总体处于最低水平(纵向排量一致性变异系数 0.86%,行内横向变异系数 10.26%);而当通道宽度为 13 mm、负压为 -1.4 kPa、播量为 150 kg/hm^2 时,变异系数最高(分别为 27.13% 与 21.18%)。整体趋势表明,当通道宽度为 12 mm 时播种均匀性较差,11、13 mm 条件下播种均匀性更佳。当负压为 -0.8 kPa 时,随播量增加变异系数升高;当负压为 -1.1、-1.4 kPa 时,变化规律不显著。

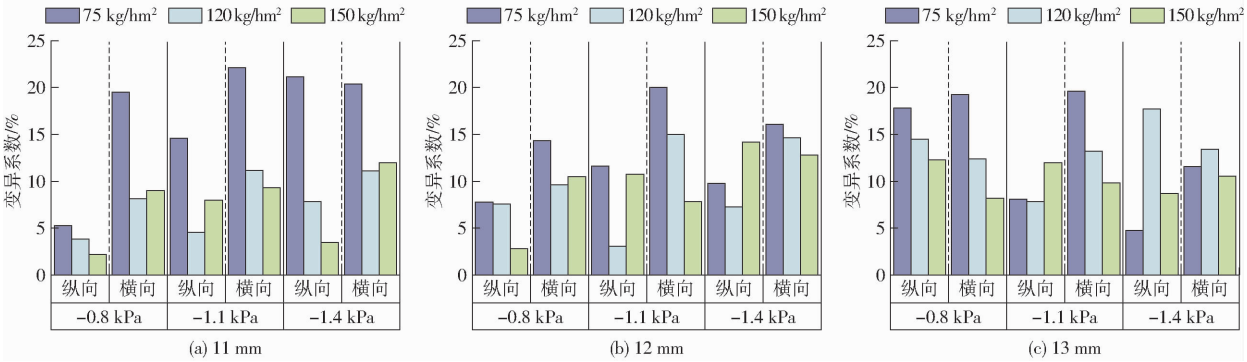
如图 8 所示,在矩形气缝条件下,当导种通道宽



(a) 11 mm (b) 12 mm (c) 13 mm

图 7 正梯形气缝在不同通道宽度下对 2 类变异系数的影响

Fig. 7 Effects of regular trapezoidal air gaps on two types of coefficients of variation at different channel widths



(a) 11 mm (b) 12 mm (c) 13 mm

图 8 矩形气缝在不同导种通道宽度下对 2 类变异系数的影响

Fig. 8 Effects of rectangular air slits on two types of coefficient of variation at different channel widths

度为 11 mm、负压为 -0.8 kPa、播量为 150 kg/hm^2 时,变异系数最低(分别为 2.16% 与 8.97%),说明该气缝形状下较窄通道在高播量作业时具备更优的播种稳定性。当负压为 -0.8 kPa 时,随播量由 75 kg/hm^2 增至 150 kg/hm^2,变异系数呈下降趋势;而负压为 -1.4 kPa 时,低播量(75 kg/hm^2)变异系数最高(约 21.13%),表明过高负压易导致气流扰动增强、吸附不稳定,从而削弱分种均匀性。

图 9 为气缝形状为倒梯形时结果。当导种通道宽度为 12 mm、负压为 -1.1 kPa、播量为 120 kg/hm^2 时,变异系数总体最低纵向排量一致性 2.15%,横向一致性 13.3%,表现出良好的播种稳定性;当导种通道宽度为 11 mm、负压为 -0.8 kPa、播量为 75 kg/hm^2 时,变异系数达到最大值(分别为 26.91% 与 15.96%)。当负压为 -0.8 kPa 时,随播量由75 kg/hm^2 增至 150 kg/hm^2,各导种通道宽度下变异系数均显著下降,说明适度提高播量有助于改

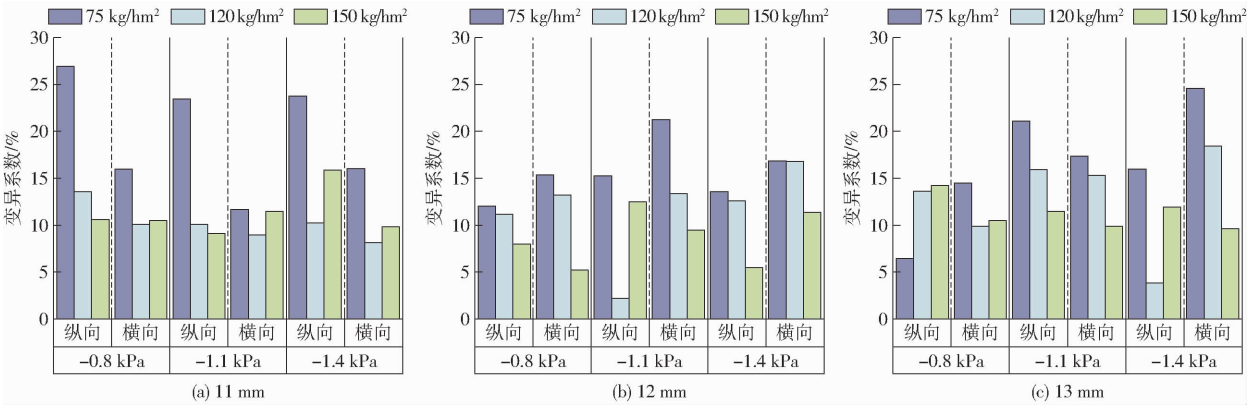


图 9　倒梯形气缝在不同导种通道宽度下对 2 类变异系数的影响

Fig. 9　Effects of inverted trapezoidal air gaps on two types of coefficients of variation at different channel widths

善低负压条件下的分种均匀性。

尽管部分规律可通过单因素趋势图进行初步观察，但在多因素耦合条件下，气缝形状、负压、播量及导种通道宽度之间的交互关系较为复杂，局部数据趋势甚至呈一定矛盾性，难以通过直观分析准确揭示各因素的主次影响程度及其相互作用规律。因此，采用统计学方法对仿真结果进行定量分析，以明确各因素及其交互作用对种子纵向排量一致性与行内横向分布均匀性的综合影响。

利用 Minitab 软件对 2 类变异系数的仿真结果进行多元回归与方差分析，得到负压 A、播量 B、导种通道宽度 C 及气缝结构 D 对整体播种均匀性影响的显著性分析结果（表 3、4）。

表 3　各行排量一致性变异系数初始回归模型方差分析结果

Tab. 3　ANOVA results of initial regression model for consistent coefficient of variation of displacement across rows

来源	自由度	平方和	均方和	F	P
回归	17	1 151. 56	67. 739	2. 25	0. 010 *
A	1	89. 13	89. 128	2. 96	0. 090
B	1	210. 22	210. 218	6. 99	0. 010 *
C	1	82. 63	82. 630	2. 75	0. 102
D	2	200. 98	100. 489	3. 34	0. 042 *
A^2	1	0. 61	0. 611	0. 02	0. 887
B^2	1	34. 80	34. 797	1. 16	0. 286
C^2	1	82. 85	82. 850	2. 75	0. 102
AB	1	24. 04	24. 039	0. 80	0. 375
AC	1	105. 13	105. 131	3. 49	0. 066
BC	1	225. 00	224. 997	7. 48	0. 008 **
AD	2	16. 45	8. 224	0. 27	0. 762
BD	2	274. 61	137. 307	4. 56	0. 014 *
CD	2	110. 76	55. 379	1. 84	0. 167
误差	63	1 895. 38	30. 085		
合计	80	3 046. 94			

注：* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$），** 表示影响极显著（$P < 0.01$），下同。

在 95% 置信区间下，方差分析结果表明，对于各行纵向排量一致性变异系数，播量与气缝结构对结果具有显著影响，其 P 分别为 0. 010 和 0. 042；播量与导种通道宽度交互作用极显著，P 为 0. 008，同时播量与气缝结构交互作用也显著，P 为 0. 014。相比之下，负压和导种通道宽度主效应不显著，P 分别为 0. 090 和 0. 102。

表 4　行内横向变异系数初始回归模型方差分析结果

Tab. 4　ANOVA results of initial regression model for within-row horizontal coefficient of variation

来源	自由度	平方和	均方和	F	P
回归	17	396. 43	23. 311	1. 59	0. 012 *
A	1	61. 74	61. 741	4. 20	0. 045 *
B	1	67. 62	67. 620	4. 60	0. 036 *
C	1	58. 80	58. 803	4. 00	0. 049 *
D	2	94. 08	47. 042	3. 20	0. 050 *
A^2	1	10. 20	10. 202	0. 69	0. 41
B^2	1	8. 50	8. 499	0. 58	0. 45
C^2	1	7. 90	7. 896	0. 54	0. 47
AB	1	6. 30	6. 302	0. 43	0. 51
AC	1	7. 10	7. 101	0. 48	0. 49
BC	1	5. 40	5. 401	0. 37	0. 55
AD	2	18. 60	9. 300	0. 63	0. 53
BD	2	19. 40	9. 698	0. 66	0. 52
CD	2	30. 79	15. 395	1. 05	0. 36
误差	63	926. 10	14. 702		
合计	80	1 322. 53			

对于行内横向变异系数，播量、负压、导种通道宽度和气缝结构的影响显著，P 分别为 0. 036、0. 045、0. 049 和 0. 050。

3. 3. 3　回归模型优化

基于初始结果，为提高模型精度并减少冗余项，对不显著因子进行剔除后重新建立优化回归模型。2 类变异系数优化后模型回归方程分别为

$$\begin{cases} \delta_a = 92.8 - 0.744B - 7.34C + 0.066\,2BC \\ \delta_b = 102.0 - 0.836B - 7.34C + 0.066\,2BC \\ \delta_c = 111.8 - 0.889B - 7.34C + 0.066\,2BC \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta_2 = 11.47 - 2.98A - 0.093\,55B + 0.746C \quad (10)$$

式中 δ_a——正梯形各行纵向排量一致性变异系数

δ_b——矩形各行纵向排量一致性变异系数

δ_c——倒梯形各行纵向排量一致性变异系数

优化后结果显示，模型整体拟合显著性显著提升。排量一致性模型中（表 5），回归项 P 由 0.010 降至 0.003，各参数中播量、导种通道宽度和气缝结构 P 分别为 0.007、0.015 和 0.007，均表现为显著。如表 6 所示，横向均匀性模型整体 $P < 0.001$，F 为 33.27，说明模型显著性高；其中负压、播量和中间导种通道宽度 P 分别为 0.019、< 0.001 和 0.049，均对行内均匀性具有显著影响，模型解释力显著增强。

表 5 优化后各行排量一致性变异系数方差分析结果

Tab. 5 ANOVA results of coefficient of variation of displacement consistency in each row after optimization

来源	自由度	平方和	均方和	F	P
回归	7	762.3	108.90	3.48	0.003 **
B	1	245.6	245.63	7.85	0.007 **
C	1	194.8	194.84	6.23	0.015 *
D	2	329.1	164.57	5.26	0.007 **
BC	1	225.0	225.00	7.19	0.009 **
BD	2	274.6	137.31	4.39	0.016 *
误差	73	2 284.6	31.30		
合计	80	3 046.9			

表 6 优化后行内横向变异系数方差分析结果

Tab. 6 ANOVA of within-row horizontal coefficient of variation after optimization

来源	自由度	平方和	均方和	F	P
回归	3	764.58	248.860	33.27	< 0.001 **
A	1	43.11	43.112	5.76	0.019 *
B	1	673.42	673.422	90.03	< 0.001 **
C	1	30.05	30.046	4.02	0.049 *
误差	77	557.95	7.480		
合计	80	1 322.53			

为进一步验证优化效果，绘制 2 种指标 Pareto 显著性分析图（图 10、11）。以红线为置信水平对应的临界值，柱形超过该线表示因子影响显著。优化前，大多数因子柱形低于临界线，说明影响较弱；优化后，所有因子柱形均超过临界值，表明主要因素作用显著。对比两类指标可见，播量在两者中均为最显著因子，对纵向排量一致性和行内横向均匀性均具有决定性作用。气缝结构在纵向排量一致性分析中影响最突出，而横向变异系数模型中播量标准化效应最大。

在优化模型中，仅播量与导种通道宽度为显著

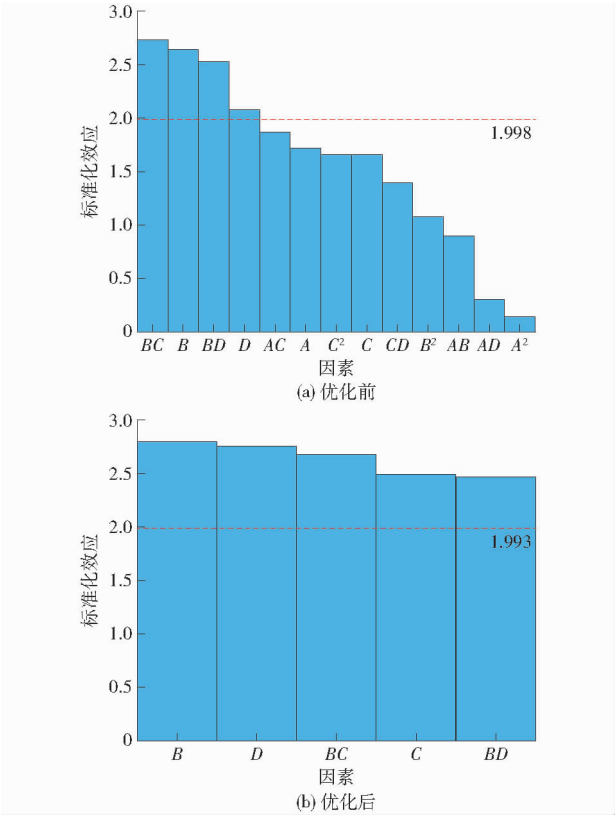


图 10 各行纵向排量一致性变异系数优化前后 Pareto 对比

Fig. 10 Pareto comparison before and after optimization of coefficient of variation for consistent displacement across rows

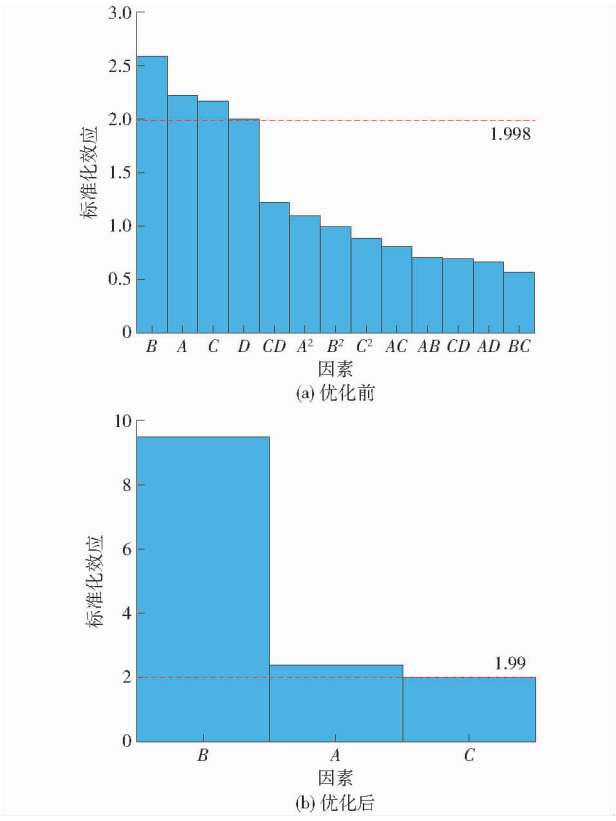


图 11 行内横向变异系数优化前后 Pareto 对比

Fig. 11 Pareto comparison before and after within-row horizontal variation coefficient optimization

因素。依据式(9)对二者进行等值线及曲面分析(图 12)。结果表明,播量与通道宽度交互作用明显,可用于确定最优组合以提升各行排量一致性。对负压、播量和导种通道宽度 3 因素对行内横向变异系数的交互作用进行分析(图 13)。结果表明:当导种通道宽度固定为 12 mm 时(图 13a),随着播量增加,颜色逐渐变浅,变异系数下降,高播量配合较高负压可显著降低行内横向变异系数;当播量为 115.05 kg/hm^2 时(图 13b),随负压与导种通道宽度减小,变异系数显著下降,说明适当降低二者有助于改善行内分布均匀性;当负压为 -1.1 kPa 时(图 13c),随播量增加变异系数下降,导种通道宽度减小亦可略微降低变异系数。基于数学模型(式(10))进行三因素曲面分析(图 14)。结果显示,狭窄通道宽度、低负压与高播量的组合既可显著提高各行排量一致性,又可降低行内横向变异系数,从而实现播种均匀性整体优化。

根据上述试验与回归方程拟合可得,当负压为 -0.8 kPa、播量为 150 kg/hm^2、导种通道宽度为11 mm 且气缝形状为矩形时,气缝吸附式小麦宽苗带投种装置的纵向排量一致性及行内横向分布均匀性均达到最优,验证了该参数组合优越性能。

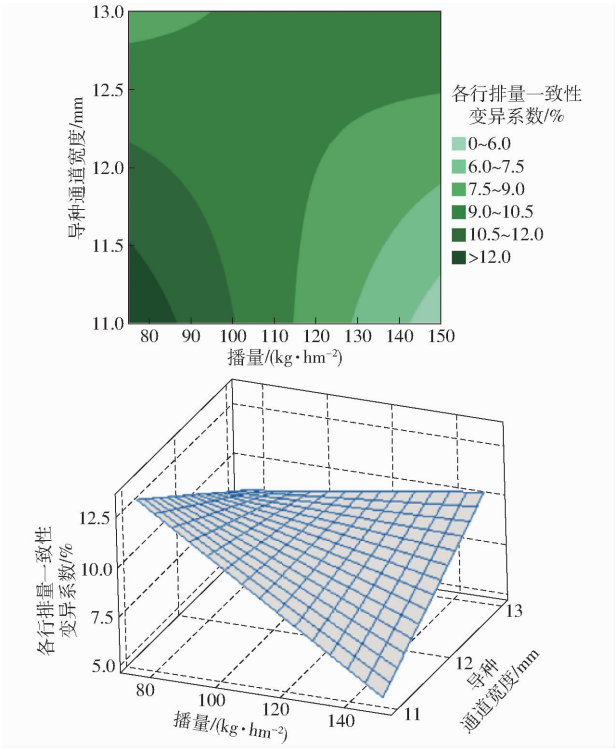
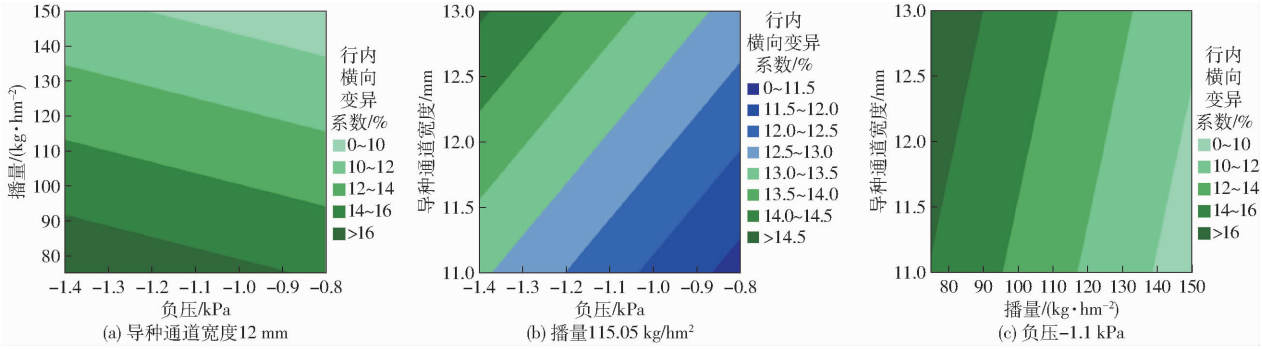


图 12　矩形气缝下各行排量一致性变异系数模型等值线及曲面

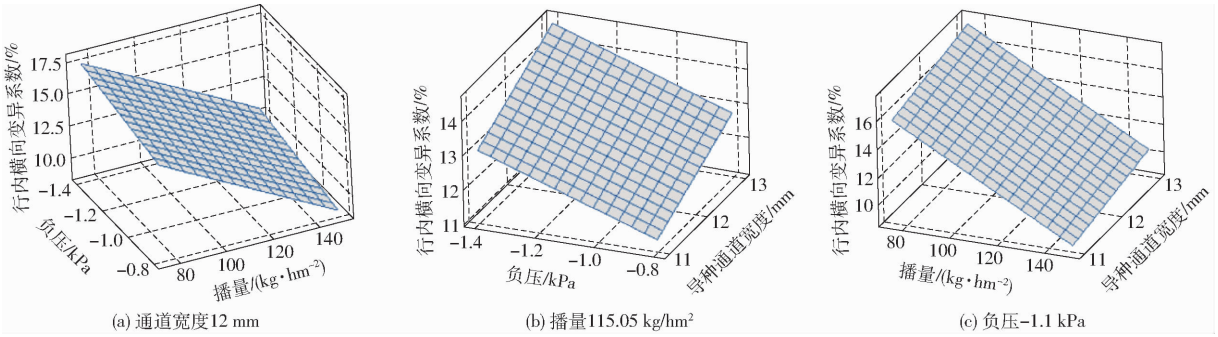
Fig. 12　Contour lines and surfaces of model for coefficient of variation of displacement in each row under a rectangular air gap



(a) 导种通道宽度12 mm　(b) 播量115.05 kg/hm^2　(c) 负压-1.1 kPa

图 13　试验因素交互作用行内横向变异系数等值线

Fig. 13　Contour lines representing factor interaction effects on within-row horizontal coefficient of variation



(a) 通道宽度12 mm　(b) 播量115.05 kg/hm^2　(c) 负压-1.1 kPa

图 14　试验因素交互作用行内横向变异系数曲面

Fig. 14　Response surfaces of within-row horizontal coefficient of variation to factor interactions

4 试验验证

4.1 投种装置模型优化

在前期负压式投种装置台架试验中,当负压腔气压接近 -1 kPa 时,小麦种子易被气缝吸附,导致通道堵塞。通过 DT-8890A-8920 型数显压力表监测发现,种子通过气缝斜面时会引起负压腔气压波动,形成非预期的强吸附作用,一旦气压升至临界值,种子被吸附在气缝斜面上,造成堵塞。

产生该现象的原因在于仿真与台架试验边界条件差异:Fluent 仿真中负压腔出口设为恒定负压,可保持稳定气压;而台架试验依赖风机抽气,负压仅能在初始阶段达到目标值,过程中无法恒定,导致种子运动偏离仿真结果。针对这一问题,将投种装置负压气吸改为正压吹气,在种子入口设置环形进气口,其余结构保持原有分种功能。

4.2 试验材料

(1)排种器采用 12 V 电动外槽轮式小麦播种器,配备可调手轮,可通过调节手轮控制播量。

(2)通过光固化 3D 打印加工导种通道宽度优化为 11 mm 的模型,材料为光敏树脂。

(3)试验台架通过传送带模拟播种机行进工况,主体结构由铝型材搭建。种箱下方固定电动排种器,投种装置入口与排种器出种口对接。传送带铺设白布以接收落下种子,模拟宽苗带土壤环境及镇压轮压实效果。投种装置正压气源采用捷霸离心高压漩涡风机,气流入口压力通过数显压力表实时监控,实现精确调控。试验台架结构见图 15。

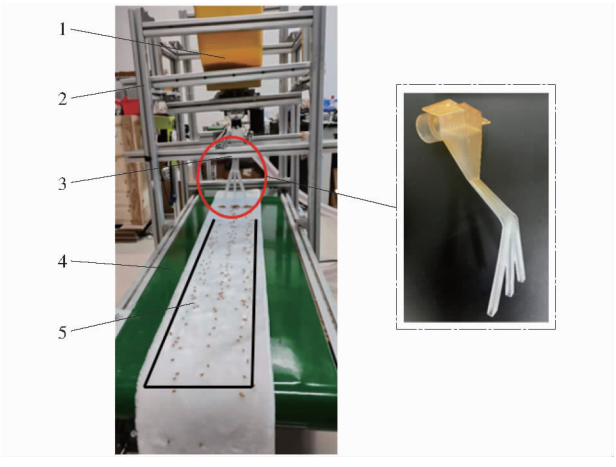


图 15 气缝吸附式小麦宽苗带投种装置台架试验

Fig. 15 Bench test of air gap adsorption type wheat wide seedling strip planting device

1. 种箱 2. 试验台架 3. 投种装置 4. 传送带 5. 种带

4.3 试验方法

试验开始前,利用计时器和高精度电子秤调节电动播种器播量至目标值,重复 3 次确认准确性。随后启动风机,通过数显压力表实时调节投种装置气流入口正压至目标值,再连接播种器电源并开启传送带。传送带运行时,白布同步运动以接收 3 行种子,模拟实际播种情境。白布到达预定位置后,停止所有设备,在白布上划定长 70 cm 的矩形区域作为投种效果评估计算区,每组试验重复 3 次。评估指标包括各行纵向排量一致性变异系数与行内横向变异系数,计算方法与仿真试验一致,矩形沿长度方向分为 5 段计算行内横向变异系数,具体示意如图 16 所示。

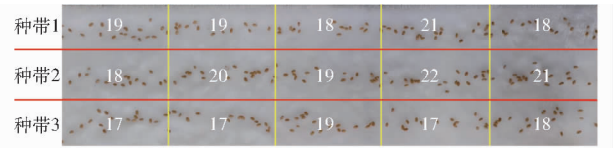


图 16 试验后评价指标统计示意图

Fig. 16 Statistical diagram of post-trial evaluation indicators

依据前期仿真结果,矩形气缝结构在各行纵向排量一致性及行内横向变异系数方面表现最佳。为进一步分析气流参数对投种性能的影响规律,确定矩形气缝结构为后续试验研究对象。台架试验以气流入口正压和播量为主要试验因素,采用全因子设计,因素水平见表 7。

表 7 台架试验因素水平

Tab. 7 Bench test factors and levels

水平	因素	
	气流入口正压/kPa	播量/(kg·hm^{-2})
1	0	75
2	0.5	120
3	1.0	150
4	1.5	
5	2.0	

4.4 试验结果分析

选取矩形气缝结构投种装置为研究对象,对台架试验数据进行计算,得到不同正压与播量条件下各行排量一致性变异系数与行内横向变异系数如图 17 所示。

由图 17 可知,正压与播量交互作用对各行排量一致性变异系数有显著影响。当播为量 75 kg/hm^2 时,随着正压由 0 增加至 1 ~ 1.5 kPa,排量一致性变异系数逐渐下降并达到最低值,继续升高至 2 kPa 时略有回升,呈先降后升的抛物线型变化趋势;当播量为 120、150 kg/hm^2 时,变异系数随正压升高持续下降,并在 1.5 ~ 2 kPa 区间达到最低值。总体来看,播量主要通过调节种子流量影响排量一致性,而正压通过改变气流强度影响种子吸附与释放稳定性。

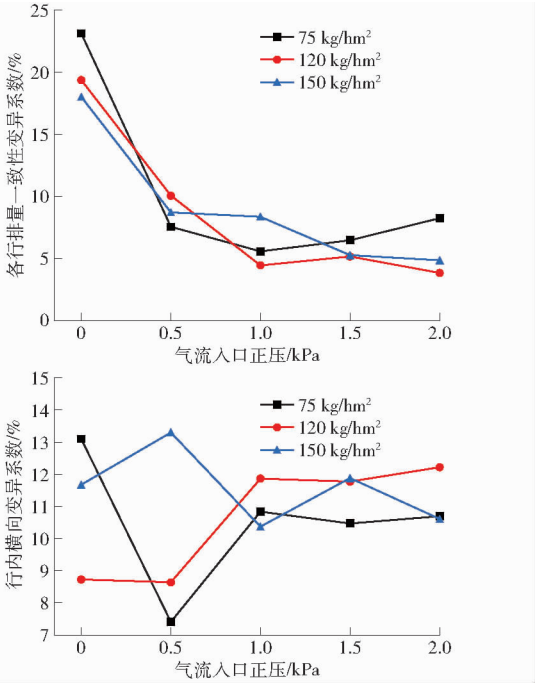


图 17　矩形气缝下变异系数影响曲线

Fig. 17　Influence curves of coefficient of variation under rectangular air gap

两者相互作用形成规律：低播量条件下需中等正压以避免气流紊乱，高播量条件下适度提高正压可提升种子排量稳定性与均匀性。

行内横向变异系数随正压和播量变化规律较为平稳。不同正压（0 ~ 2 kPa）和播量条件下，其波动幅度较小，基本维持在 8% ~ 15% 之间，无显著升降趋势，说明正压和播量对行内横向分布均匀性影响相对较弱。综合分析表明，在矩形气缝结构下，装置在各行间及行内均能保持较高的播种一致性，具备良好的稳定性和适应性。

基于上述分析，在高播量条件下，各行排量一致性变异系数随入口气流正压增加呈递减趋势。为确定变异系数极小值区间，拓展了正压试验范围。台架试验结果表明，当入口正压升至约 2.2 kPa 时，装置内流场出现明显回流，部分气流自种子入口逆向喷出，导致部分小麦种子被气流带出或在排种器出口处滞留。为深入揭示该现象机理，利用数显压力表对不同入口正压下气缝处及种子入口处的压力进行同步测量，并通过数据处理与可视化分析得到两者随正压变化的关系曲线（图 18）。结果表明，气缝压力与种子入口压力均随正压近似线性增长，当入口正压约为 2.25 kPa 时，种子入口压力增速明显加快，表明该值为关键阈值。超过此阈值后，入口正压对种子入口压力的影响显著增强，从而导致流场紊乱加剧。这一现象与装置结构设计密切相关：由于投种装置首段采用减缩式通道结构，气流沿内壁流

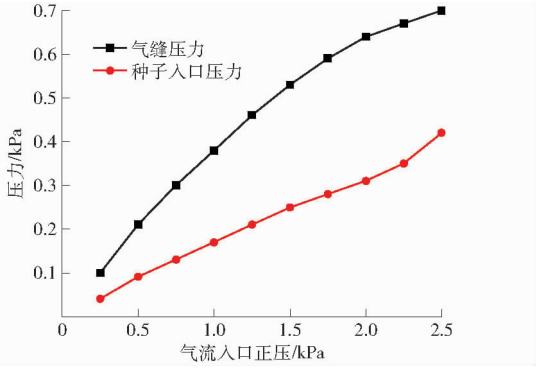


图 18　压力测试关系曲线

Fig. 18　Stress test relationship curves

动时受限于气缝斜面狭窄，部分气流无法顺利排出，形成回流。当入口正压进一步升高时，回流效应增强，干扰下落种子运动轨迹，降低排种稳定性和分布均匀性。

为研究气流入口正压对投种效果的影响，利用摄影机逐帧观察不同气压下种子在投种装置前段的运动轨迹，并进行无气流与高压气流对比试验，如图 19 所示。

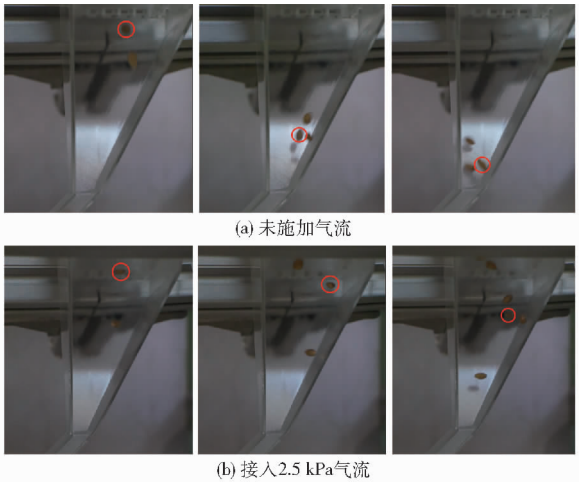


图 19　不同气流条件下小麦投种效果对比

Fig. 19　Comparison of wheat seeding effects under different airflow conditions

由图 19 可知，在无气流条件下，种子受重力主导，轨迹稳定，下落过程中仅与装置内壁接触一次，顺利进入气缝斜面区域；而在气压 2.5 kPa 下，种子受到回流影响，进入装置后产生水平方向位移，与内壁多次碰撞后进入主流道，被高速气流加速吹落，轨迹紊乱，显著降低投种精度。

5　结论

（1）针对小麦宽苗带播种机投种过程中存在的种子弹跳与分布不均问题，设计了一种气缝吸附式小麦宽苗带投种装置。依据离散元仿真结果对装置结构进行了优化，验证了设计方案的可行性。

(2)采用 Rocky DEM 与 Fluent 耦合仿真,对播量、负压、气缝结构及中间导种通道宽度进行全因子试验,以各行排量一致性和行内横向变异系数评估投种效果。结果表明,当负压为 -0.8 kPa、播量为 150 kg/hm^2、中间导种通道宽度为 11 mm 且气缝结构为矩形时,投种装置的各行排量一致性变异系数和行内横向变异系数均处于最小,表明该参数组合能够有效优化投种均匀性。

(3)台架试验结果表明,低播量下,各行排量一致性变异系数随正压呈先降后升;高播量下随正压递减;行内横向变异系数受试验因素影响不显著,维持在 8% ~15% 区间;当入口正压大于 2.25 kPa 时,投种装置内部会产生回流,干扰下落种子运动轨迹,降低排种稳定性和分布均匀性。

参 考 文 献

[1] ZHANG X, YANG Y, WANG Q, et al. Design and experiment of pneumatic seed clearing mechanism for pin-hole tube wheat plot precision sowing device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023,16(4):85 -95.

[2] 张宝昌, 胡培杰, 陈为鹏, 等. 宽苗带小麦免耕施肥播种机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022,43(2):22 -27.
ZHANG Baochang, HU Peijie, CHEN Weipeng, et al. Design and experiment of no-tillage fertilizing and sowing machine for wheat wide-belt planting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(2):22 -27. (in Chinese)

[3] 熊淑萍,曹文博,张志勇,等. 行距和播种量对冬小麦冠层光合有效辐射垂直分布、生物量和籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021,32(4):1298 -1306.
XIONG Shuping, CAO Wenbo, ZHANG Zhiyong, et al. Effects of row spacing and seeding rate on vertical distribution of photosynthetically active radiation, biomass and grain yield in winter wheat canopy[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(4):1298 -1306. (in Chinese)

[4] XI X, GU C, SHI Y, et al. Design and experiment of no-tube seeder for wheat sowing[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 204:104724.

[5] LI H, KOROHOU T, LIU Z et al. Analysis of multiangle wheat density effects based on drill single-seed seeding[J] Agriculture-Basel, 2024,14(2):176.

[6] 赵晓顺, 赵达卫, 池丹丹, 等. 基于 EDEM -Fluent 耦合仿真的小麦宽苗带精量电控排种系统设计与试验[J]. 河北农业大学学报, 2022,45(1):105 -114,120.
ZHAO Xiaoshun, ZHAO Dawei, CHI Dandan, et al. Design and experiment of electrically controlled precision seed-metering system for wide-belt wheat based on EDEM -Fluent coupling simulation[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2022, 45(1):105 -114,120. (in Chinese)

[7] 郑娟, 赖虹宇, 李甜, 等. 小麦宽苗带气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(增刊 1):165 -176,335.
ZHENG Juan, LAI Hongyu, LI Tian, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device for wheat wide-belt sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(Supp. 1):165 -176,335. (in Chinese)

[8] 刘彩玲, 魏丹, 都鑫, 等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(1):75 -84.
LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and experiment of hook-type cup-wheel wheat precision seeder for wide-belt sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(1):75 -84. (in Chinese)

[9] 夏俊芳,魏有帅,郑侃,等. 宽苗带小麦播种机多行匀播分控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 145 -156.
XIA Junfang, WEI Youshuai, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of multi-row uniform seeding control system for wide-belt wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 145 -156. (in Chinese)

[10] ZHENG F, CHU J, GUO X, et al. Combining wide seedling strip planting with a higher plant density results in greater yield gains in winter wheat[J]. Annals of Agricultural Science, 2024,69(1):1 -10.

[11] 冯伟, 李世莹, 王永华, 等. 宽幅播种下带间距对冬小麦衰老进程及产量的影响[J]. 生态学报, 2015,35(8):2686 -2694.
FENG Wei, LI Shiying, WANG Yonghua, et al. Effects of row spacing under wide-row sowing on senescence process and yield of winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(8):2686 -2694. (in Chinese)

[12] WANG Y, LI W, DENG Y, et al. Higher seed rates enlarge the effects of wide-belt sowing on root length density, thereby improving nitrogen uptake and use efficiencies in winter wheat[J]. Plants (Basel, Switzerland), 2024,13(17):2476.

[13] WANG Z, KHAN S, SUN M, et al. Optimizing the wheat seeding rate for wide-space sowing to improve yield and water and nitrogen utilization[J]. International Journal of Plant Production, 2021,15(4):553 -562.

[14] 翟萌萌. 基于 EDEM 的小麦宽幅精量播种装置优化设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学, 2018.
ZHAI Mengmeng. Optimization design and experiment of wheat wide-belt precision seeding device based on EDEM[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[15] 牛琪, 王庆杰, 陈黎卿, 等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017,48(11):52 -59.
NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of wheat seeder with straw mulching after sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(11):52 -59. (in Chinese)

[16] 姜萌, 刘彩玲, 魏丹, 等. 小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(11):53 -62.
JIANG Meng, LIU Cailing, WEI Dan, et al. Design and experiment of precision seeding and fertilizing machine for wheat wide-belt sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(11):53 -62. (in Chinese)

[17] 张春岭，刘涛，郑子浩，等. 交错凸齿式宽苗带小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报，2024,40(5):47－59.
ZHANG Chunling, LIU Tao, ZHENG Zihao, et al. Design and experiment of staggered-tooth precision seed-metering device for wheat wide-belt sowing[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(5):47－59. (in Chinese)

[18] 赵鹏飞，邓敏，王孟盛，等. 气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2025,56(7):38－47.
ZHAO Pengfei, DENG Min, WANG Mengsheng, et al. Design and experiment of pneumatic inclined-plate uniform seed-metering device for wheat wide-belt sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(7):38－47. (in Chinese)

[19] ŁUKASZ G, PIOTR M, DARIUSZ C, et al. Effect of using deflector in the distributor head of a pneumatic seed drill on the oat seed sowing unevenness[J]. Scientific Reports, 2023,13(1):15471.

[20] AHMAD F, ADEEL M, QIU B, et al. Sowing uniformity of bed-type pneumatic maize planter at various seedbed preparation levels and machine travel speeds[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021,14(1):165－171.

[21] LIU L, YANG H, MA S. Experimental study on performance of pneumatic seeding system[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016,9(6):84－90.

[22] 祝清震，武广伟，陈立平，等. 小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计与优化[J]. 农业工程学报，2019,35(1):1－11.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Design and optimization of elastic plate structure for wide-belt wheat broadcast seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(1):1－11. (in Chinese)

[23] 吕鹏，鞠正春，高瑞杰，等. 山东省大田条件下小麦宽幅精播适宜播种量研究[J]. 山东农业科学，2018,50(5):34－37.
LÜ Peng, JU Zhengchun, GAO Ruijie, et al. Study on suitable seeding rate for wide-row precise wheat sowing under field conditions in Shandong Province[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018,50(5):34－37. (in Chinese)

[24] 赵晓顺，于华丽，张晋国，等. 槽缝气吸式小麦精量排种器[J]. 农业机械学报，2013,44(2):48－51,74.
ZHAO Xiaoshun, YU Huali, ZHANG Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precision seed-metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):48－51,74. (in Chinese)

[25] 王勇，李建东，杨薇，等. 小麦种子物理特性参数测定及在播种机排种器设计中的应用[J]. 农业工程，2021,11(6):109－114.
WANG Yong, LI Jiandong, YANG Wei, et al. Measurement of physical characteristics of wheat seeds and their application in the design of seed metering devices for planters[J]. Agricultural Engineering, 2021,11(6):109－114. (in Chinese)

[26] 陈玉龙，韩杰，兰玉彬，等. 精密排种器组合式导种管设计与试验[J]. 农业工程学报，2022,38(24):14－24.
CHEN Yulong, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Design and experiment of combined seed guide tube for precision seed meter[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(24):14－24. (in Chinese)

[27] WANG C, LU C, LI H, et al. Preliminary bench experiment study on working parameters of pneumatic seeding mechanism for wheat in rice-wheat rotation areas[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(1):66－72.

[28] GU F, ZHAO Y, WU F, et al. Simulation analysis and experimental validation of conveying device in uniform crushed straw throwing and seed-sowing machines using CFD－DEM coupled approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193:106720.

[29] 王龙宝，杨翰瑜，王庆杰，等. 小麦气流辅助直线投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024,55(6):111－120.
WANG Longbao, YANG Hanyu, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of airflow-assisted linear seed placement device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(6):111－120. (in Chinese)

(上接第 27 页)

[23] 梁方，雷淇奥，郑思远，等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2019，35(21)：1－8.
LIANG Fang, LEI Qi'ao, ZHENG Siyuan, et al. Design and experiment of electro-hydraulic profiling system with consistent pressure for drilling depth of furrow opener[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 1－8. (in Chinese)

[24] 何芝强. PID 控制器参数整定方法及其应用研究[D]. 杭州：浙江大学，2005.
HE Zhiqiang. Parameters tuning of PID controller and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)

[25] 齐文超，李彦明，张锦辉，等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J]. 农业机械学报，2019，50(10)：17－23.
QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 17－23. (in Chinese)

[26] 黄友锐，陆森，韩涛，等. 基于 GOHBA－Fuzzy－PID 算法的施肥系统控制优化研究[J]. 农业机械学报，2025,56(11)：320－328.
HUANG Yourui, LU Sen, HAN Tao, et al. Optimization of fertilization control system using GOHBA－Fuzzy－PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(11):320－328. (in Chinese)

[27] 曹鑫鹏. 东北黑土区免耕播深控制关键技术与装置研究[D]. 北京：中国农业大学，2023.
CAO Xinpeng. Research on key technology and device of no-tillage seeding depth control in northeast black soil region of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2023. (in Chinese)