doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.018

小麦宽苗带气吸式精量排种器设计与试验

郑 娟[1] 赖虹宇[1] 李 甜[1] 李运通[1] 廖庆喜[1,2] 廖宜涛[1,2]
（1. 华中农业大学工学院，武汉 430070；2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室，武汉 430070）

摘要：针对小麦宽苗带播种主要以传统外槽轮排种器搭配导种管末端匀种装置为主，存在种流无序、排量不稳定、供种脉冲，影响播种质量，基于拖带扰动充种、负压吸种和种子自重投种原理，设计一种气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器。构建了锥形排种盘作用下小麦种子充种、携种和投种过程的力学模型，明确种子在充种和携种过程所需的临界负压与排种盘锥度、种子质量、三轴尺寸、型孔尺寸、工作转速和型孔分度圆直径有关。利用EDEM仿真对比分析锥形排种盘不同锥度对小麦种群离散度影响程度，探究了带动层、静止层和拖带层种群中种子运动规律，结果表明当排种盘锥度为45°时，可兼顾种群扰动性好和被吸附种子运移阻力小的优势。Fluent仿真分析锥盘不同型孔类型的表面流速变化规律。以各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数、排种均匀性变异系数为评价指标，开展排种器结构参数和工作参数对排种性能的影响试验。试验结果表明，直径1.8 mm的垂直状型孔各项评价指标优于倾斜状型孔；播种量随吸种负压和工作转速的增大呈线性增大趋势，当工作转速为30~40 r/min、吸种负压为5.2~5.6 kPa时，播种量可达220~290 g/min；最佳工作参数组合为工作转速30 r/min、吸种负压5.4 kPa，各试验评价指标分别为1.93%、1.26%、9.52%；田间对比试验结果表明气力锥盘式排种器宽苗带播种时较外槽轮排种器宽苗带播种均匀性提升，苗带内播种均匀性变异系数分别为11.77%、22.51%，满足小麦精量播种要求。

关键词：小麦排种器；宽苗带；气吸式
中图分类号：S223.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S1-0165-12

Design and Test of Precision Seed Metering Device for Wheat Wide Seedling Belt with Air Suction

ZHENG Juan[1] LAI Hongyu[1] LI Tian[1] LI Yuntong[1] LIAO Qingxi[1,2] LIAO Yitao[1,2]
(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Existing wheat wide seedling belt seeding is mainly based on the traditional grooved wheel seed metering with the seed leveling device at the end of seed guide tube, there are problems of seed flow disorder, unstable displacement, and seed supply pulse, which affect sowing quality. A pneumatic cone-disc type precision seed metering device for wheat wide seed belt was designed based on the principles of negative pressure seed suction and self-weight seeding. A mechanical model of wheat seed filling was constructed under the action of a cone-disc, and the structural parameters of the main components of the cone disc seeding device were determined. Mechanical analysis showed that the critical negative pressure value required for seed filling and carrying was related to the taper of the seeding disk, seed mass, triaxial size, hole size, working speed and hole graduation circle diameter. EDEM simulation was used to comparatively analyze the impact of different tapers of the cone-disk on the dispersion of wheat populations, and analyze the movement patterns of seeds in the driving layer, stationary layer and drag layer populations. The results showed that when the taper of the seeding disk was 45°, it can take into account the advantages of good population disturbance and low migration resistance of adsorbed seeds. For different types of holes in the cone disk, seeding performance tests were carried out by using the coefficient of variation of the consistency of the seeding amount in each row, the coefficient of variation of the stability of the total seeding amount,

收稿日期：2024-07-20 修回日期：2024-09-15
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFD2000403)、国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)和湖北省农机装备攻关项目(HBSNY202207)
作者简介：郑娟(1992—)，女，博士生，主要从事油菜播种技术与装备研究，E-mail: zhengjuan@webmail.hzau.edu.cn
通信作者：廖宜涛(1982—)，男，教授，博士生导师，主要从事现代农业装备设计与测控研究，E-mail: liaoetao@mail.hzau.edu.cn

and the coefficient of variation of the seeding uniformity as evaluation indicators. The test results showed that the evaluation of vertical holes with a size of 1.8 mm was better than that of oval holes. The impact of the working parameters of the seed metering device such as seed suction negative pressure and working speed on the seeding performance was explored. The results showed that the seeding amount showed a linear increase trend with the increase of negative pressure and speed. The working speed was 30~40 r/min. When the pore adsorption negative pressure was 5.2~5.6 kPa, the seeding rate can reach 220~290 g/min. the best combination of working parameters was obtained by orthogonal test as working speed of 30 r/min, negative pressure of adsorption of 5.4 kPa, and the evaluation indexes of each test were 1.93%, 1.26% and 9.52%, respectively. Field comparison tests showed that the sowing uniformity of the wide seedling belt of the pneumatic cone-disc seed metering device was improved compared with the wide seedling belt of the outer grooved wheel seed metering device, and can meet the requirements for sowing small amounts of wheat concentrate.

Key words: seed metering device for wheat; wide seedling belt; air suction

0 引言

小麦是我国重要的粮食作物，种植面积居世界第一[1]。小麦产量受群体数量[2]和个体生产力[3]影响，为提升单产，目前小麦播种多采用大播量方式，播种量可达200~250 kg/hm^2；籽粒易拥挤在一定区间，群体密度过大，籽粒间争夺光温资源导致发育受限、无效分蘖，出现产量降低情况[4]。

为提升小麦播种均匀性，国内学者在条播、穴播基础上提出了精量、宽、窄行等种子播种方式[5-7]，文献[8-11]从栽培农艺方面提出通过扩大播幅、增大行距实现植株分散均匀、分蘖成穗率高从而促进产量提升，得到广泛认可和推广应用。在农业机械化播种技术领域，国内精量播种技术模式与装备研发逐渐兴起，该技术以增加行距和促进匀播为核心，解决群体和个体发育间的矛盾，实现高产，可积极促进提升单产和提高机播质量目标[12]。因此小麦宽苗带精量播种成为农机农艺融合提升小麦单产的有效途径。

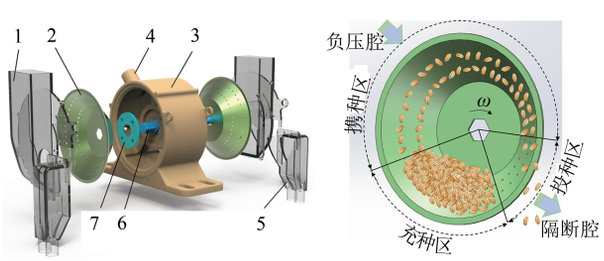
排种器是实现宽苗带精量技术的关键部件，目前小麦宽苗带播种主要利用外槽轮排种器搭配导种管末端匀种装置实现。外槽轮排种器存在脉动性，易导致缺苗断垄或种子密集分布，且存在卡种破种等现象。采取机械式排种结构改进设计、可控制吸种粒数的气力式、机械气力组合式排种原理等方法，可改善现有小麦宽苗带播种行间分布随机性强、均匀性差等问题。文献[13-14]设计的交错窝眼轮式精量排种器搭配内置四分管道进行排种作业，实现单粒取种且各行间种子互不干扰从而提高苗带间种子均匀性，提出勾型窝眼轮式精量排种方式，使小麦行间有序分布；文献[15]采用机械气力组合原理，设计气吸滚筒式小麦精量排种器等；文献[16]采用气力充种和离心充种方式使种子有序排出。科研人员为提升宽苗带横向匀种效果尝试各种方案，如对鸭掌型宽苗带撒播器的核心组件进行球面型弹籽板结构改进[17]，利用种子自重打散原理设计倾斜三角式分种装置[18]，通过气动加速投种实现小麦高速精准着床[19]。以上研究精量排种结构多为滚筒轮式结构，采用不定量排种方式，受种群重力影响、种子运移阻力较大，对有序定量小麦排种研究相对较少，气力式小麦排种过程运动规律有待分析。

针对上述问题，基于气吸式排种有序定量特点，综合滚筒式和垂直圆盘式排种优势，本文设计气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器，确定其主要结构参数，进行各排种环节的运动学分析，利用EDEM软件仿真分析排种盘锥度对小麦种群扰动和运移阻力的影响，分析其扰动过程运动规律，通过室内台架试验和田间试验验证排种盘结构参数、排种器工作参数对排种性能的影响，以期为小麦精少量宽苗带播种提供参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器结构主要包括充种室、落种口、锥形排种盘、气室等，结构如图1a所示，排种器采用对称结构，即两个锥形排种盘共用整个气室，其中每个锥形排种盘有2排吸种型孔，能实现并行4列单粒取种后同步排出，实现小麦宽苗带精量排种。



(a) 排种器整体结构示意 (b) 排种工作过程

图1 气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器结构及工作原理

Fig. 1 Structure and working principle of pneumatic cone disk type precision metering device for wheat wide seedling belt

1. 充种室 2. 锥形排种盘 3. 气室 4. 负压抽气口 5. 落种管 6. 排种轴 7. 轴承端盖

1.2　工作过程及工作原理

气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器运行时，种子经种箱堆积在充种室内部，锥形排种盘在传动轴带动下旋转，排种盘旋转产生的离心力带动静止种群，达到离散化状态，以克服小麦种子流动性差难以被型孔有效吸附的问题；风机抽气端通过负压抽气口连接气室负压腔，气室内部通过隔板将负压区域与无压区隔开。吸种型孔进入充种区域并在负压气流和种群挤压的共同作用下逐一吸附离散的小麦种子，随后在负压吸附下随排种盘同步转动，经过携种区域，进入投种区域后负压气流被隔板隔断，种子在自重作用下逐一脱离排种型孔，形成稳定连续的种子流，掉入落种管完成排种过程。

2　关键部件设计

2.1　锥形排种盘设计

锥形排种盘主要参数有排种盘直径、排种盘锥度、型孔直径和数量等，如图2所示。

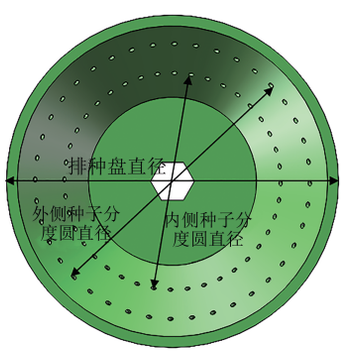


图2　排种盘尺寸示意图

Fig. 2　Schematic of seed plate

2.1.1　排种盘直径

排种盘直径直接决定排种器整体尺寸、种子所受离心惯性力和型孔间距及数量等。排种盘直径越大则充种区域弧段越长[20]，种子在排种器中经过充种区域的时间（充种时间）可表示为

$$t_1 = \frac{l_c}{v_1} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} l_c = d_x\varphi_1 \\ v_1 = \pi n + \dfrac{2d_x}{60} \end{cases} \tag{2}$$

式中　t_1——充种时间，s

l_c——充种区域弧长，m

v_1——型孔处线速度，m/s

d_x——型孔所在分度圆半径，m

φ_1——充种区域弧度，rad

n——排种盘转速，r/min

代入式（1）可知充种时间计算式为

$$t_1 = \frac{30\varphi_1}{\pi n} \tag{3}$$

由式（2）可知，种子充种时间与排种器转速、充种弧度有关，充种弧度一定时，排种型孔经过充种区的时间与排种盘转速成反比；转速一定时，排种盘直径越大型孔线速度越大，种子与型孔接触时间缩短，充种性能降低。

根据设计经验，现有排种盘直径一般为0.08~0.26 m[21]，小麦种子流动性较差，为增加排种型孔与种子接触时间，在保证充种性能前提下，减小排种器整体尺寸，排种盘直径（排种盘正向放置时边缘直径）取0.14 m。

2.1.2　排种盘锥度

排种盘锥度直接影响种群扰动情况进而影响充种性能。锥度较小时排种功能面近似于滚筒式排种器，种群受锥面支持力较大，在锥盘带动下完成类圆周运动，可有效提高种群平均动能和离散程度，进而提高充种率；锥度较大时排种功能面类似于垂直圆盘式排种器，锥面对种群的扰动较小，不利于充种，另一方面吸附在型孔上的种子受种群的挤压阻力随着锥度的增大而增大，易出现种子被过度挤压而脱离型孔造成漏吸的现象。在理论分析基础上，选取锥度30°、45°、60°（图3）的排种盘进行仿真试验，明确排种盘最佳锥度。

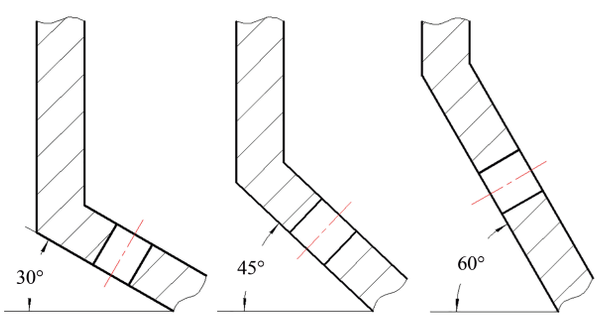


图3　排种盘锥度示意图

Fig. 3　Seed disc taper indication

2.1.3　型孔直径和数量

排种盘上分布的型孔直径与吸种所需负压有关，型孔尺寸直接影响吸种效果[22]。在相同负压条件下，型孔越小则型孔附近的负压气流越大，单位面积吸附效果较好，但型孔尺寸过小时，吸种面积减少会导致漏吸，因此排种盘型孔直径应根据种子尺寸确定。根据经验公式，型孔直径与种子尺寸关系为

$$D = ab \tag{4}$$

式中　D——型孔直径，mm

a——系数，取0.64~0.66

b——种子平均宽度，mm

选取长江中下游区常用的小麦品种郑麦9023为试验对象，种子多为椭圆形，且纵向有脐沟，静止状态多以脐沟平躺为主，测得其脐沟面平均宽度为2.5~3.1 mm。型孔直径为1.6~1.98 mm，通过对不同型孔尺寸的排种盘进行排种性能对比试验，最终确定最佳型孔直径为1.8 mm。

型孔数量直接影响播量，型孔数量较少时，若要满足相同播量则需要提高转速，转速较快则型孔与种子接触时间减少，影响充种效果；型孔数量越多时，满足相同

播量则可适当降低转速，型孔与种子接触时间增大，提高充种率。由于种子呈不规则状，无法完全贴合型孔表面，考虑到型孔过多对风机负载要求较大，因此应结合小麦种植农艺要求确定型孔数量。

参照文献[14]中宽苗带种植模式，结合现有小麦播种机作业幅宽1.8 m，确定宽苗带数为5，苗带宽度为0.08 m，幅宽为0.3 m，每苗带内播种4列。播种粒数和型孔数量计算式为

$$\begin{cases} M = \dfrac{10^6 Q}{q} \\ N = \dfrac{60 v_c}{Ln(1-\varepsilon)} \end{cases} \tag{5}$$

其中 $$L = \frac{10000 \times 5 \times 4}{MF}$$

式中 M——播种粒数，粒/hm^2

Q——播种量，取120~150 kg/hm^2

q——小麦种子千粒质量，取47.6 g

F——播种机作业幅宽，取1.8 m

L——播种粒距，m

N——排种器型孔数量

v_c——播种机作业速度，m/s

ε——地轮滑移率，%

可得小麦理论播种粒距为0.035~0.044 m，取整为0.04 m，参考目前拖拉机前进速度3 km/h，排种器工作转速30 r/min，可得排种盘单排型孔数量为40。

2.1.4 型孔分布形式及种子迁移轨迹

根据上述排种盘整体结构和排种型孔数量，各行排种型孔在锥形排种盘上呈圆周均匀分布，如图4所示。

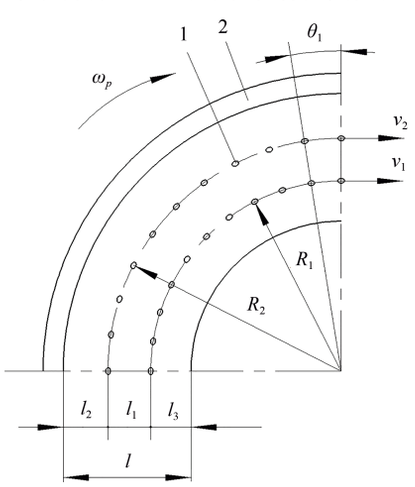


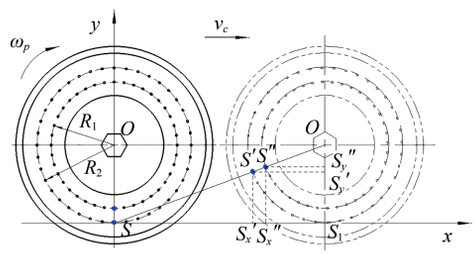
图4 排种盘型孔分布形式

Fig. 4 Distribution of seed plate holes

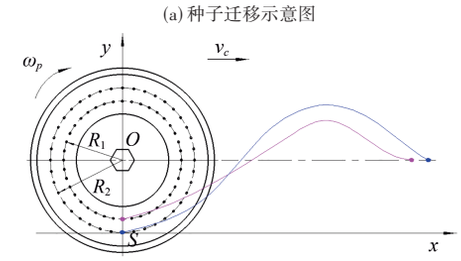
1. 锥形排种盘主体 2. 型孔

由锥形面水平方向投影距离可知l为0.03 mm，根据设计经验可知排种型孔的位置一般离排种盘边缘0.01~0.02 m，排种型孔分度圆直径一般为0.09~0.23 m[23]。排种型孔分度圆直径越大充种性能越差，两排型孔分度圆直径差异较大，会导致两排型孔充种性能差异较大，最终选择两排型孔分度圆半径R_1=0.045 m和R_2=0.055 m。

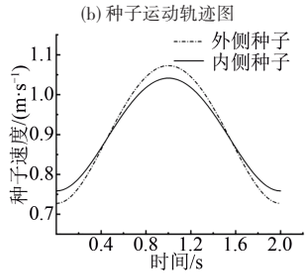
排种器工作过程中，相对拖拉机静止，并与拖拉机以v_c向前运动t_c时长，排种盘在前进过程中绕圆心O自转，型孔上种子运动简图如图5a所示。



(a) 种子迁移示意图



(b) 种子运动轨迹图



(c) 种子运动速度

图5 种子迁移和运动轨迹图

Fig. 5 Seed migration and movement trajectory diagrams

内外侧种子运动方程可表示为

$$\begin{cases} l_{SS_1} = v_c t_c \\ \theta' = \dfrac{\omega_p \pi t_c}{30} \\ S_x' = l_{SS_1} - l_{S_x'S_1} = v_c t_c - R_2 \sin\theta' \\ S_y' = l_{O'S_1} - l_{O'S_y'} = R_2 - R_2 \cos\theta' \\ S_x'' = l_{SS_1} - l_{S_x''S_1} = v_c t_c - R_1 \sin\theta' \\ S_y'' = l_{O'S_1} - l_{O'S_y''} = R_2 - R_1 \cos\theta' \end{cases} \tag{6}$$

式中 S_x'、S_y'——时刻t_c外侧型孔x、y方向坐标，m

S_x''、S_y''——时刻t_c内侧型孔x、y方向坐标，m

θ'——型孔转动圆心角，rad

ω_p——排种盘角速度，rad/s

t_c——运动时间，s

假设拖拉机前进速度v_c为0.9 m/s，排种器工作转速ω_p为30 r/min，结合式(6)利用Matlab绘制种子随时间的运动轨迹交叉旋转线，如图5b所示。S为种子所在初始位置，S'为外侧种子末时刻位置，S''为内侧种子末时刻位置。

对内外侧种子的位置参数方程求导可得到种子在运动过程中速度为

$$\begin{cases} v_x' = v_c - \dfrac{\omega_p \pi R_2}{30}\cos\dfrac{\omega_p \pi t_c}{30} \\ v_y' = \dfrac{\omega_p \pi R_2}{30}\sin\dfrac{\omega_p \pi t_c}{30} \\ v_x'' = v_c - \dfrac{\omega_p \pi R_1}{30}\cos\dfrac{\omega_p \pi t_c}{30} \\ v_y'' = \dfrac{\omega_p \pi R_1}{30}\sin\dfrac{\omega_p \pi t_c}{30} \end{cases} \tag{7}$$

简化可得

$$\begin{cases} v' = \sqrt{v_c^2 + \left(\dfrac{\omega_p \pi R_2}{30}\right)^2 - 2\dfrac{v_c \omega_p \pi R_2}{30}\cos\dfrac{\omega_p \pi t_c}{30}} \\ v'' = \sqrt{v_c^2 + \left(\dfrac{\omega_p \pi R_1}{30}\right)^2 - 2\dfrac{v_c \omega_p \pi R_1}{30}\cos\dfrac{\omega_p \pi t_c}{30}} \end{cases} \tag{8}$$

式中　v_x'、v_y'——时刻 t_c 外侧型孔 x、y 方向速度，m/s

v_x''、v_y''——内侧型孔 x、y 方向速度，m/s

v'、v''——时刻 t_c 外侧、内侧种子速度，m/s

将公式导入 Matlab 绘制出速度变化图（图 5c），在 0~0.4 s 和 1.6~2 s 区间内，内侧种子速度大于外侧，分析原因是种子与拖拉机的相对速度与拖拉机前进速度方向相反，0.4~1.6 s 区间外侧种子速度大于内侧，种子与拖拉机的相对速度与拖拉机前进速度方向相同，外侧种子轨道半径较内侧略大，因此外侧种子速度略大于内侧种子，分析图 5c 可知内外侧种子速度相差不大，且在投种瞬间速度相差不大。

2.2　种子填充力学分析

为分析小麦种子在填充过程中的力学变化规律，确定影响排种性能的主要因素，为确定排种器结构参数及工作参数提供理论依据，基于理论力学分析种子受力情况，以种子所在位置为基准点绘制横截面，以平行于截面和垂直于截面两个方向进行受力分析，建立种子填充力学方程，各过程受力如图 6 所示。

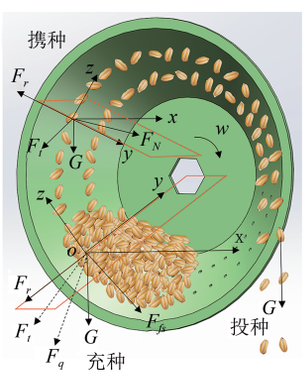
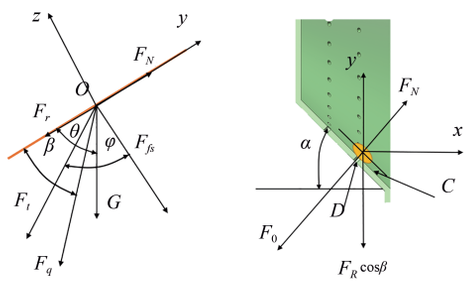


图 6　种子运动受力

Fig. 6　Force analysis of seed

2.2.1　充种环节力学分析

充种环节决定型孔抓取种子能力，直接影响排种合格指数。充种室中的种子在型孔两端的压差作用下被吸附在型孔上，被吸附种子在抵御种群的挤压后脱离种群完成充种过程，被吸附种子受力如图 7 所示。



(a) 平行于截面方向　　(b) 垂直于截面方向

图 7　充种过程受力分析

Fig. 7　Force analysis of seed in filling process

充种阶段小麦种子吸附在型孔上需满足边界条件

$$\left(F_0 + F_{ns} + F_R\cos\alpha - F_N\right)\frac{D}{2} = F_R C\cos\beta\sin\alpha \tag{9}$$

其中

$$\begin{cases} F_0 = P_0\dfrac{\pi D^2}{4} \\ F_{ns} = \dfrac{F_{fs}}{\lambda_s} \\ F_R = G + F_r + F_{fs} \\ G = mg \\ F_r = m\omega^2 R_x = \dfrac{Gv^2}{gR_x} \end{cases} \tag{10}$$

式中　G——种子重力，N

F_N——排种盘支持力，N

F_R——竖直方向合外力，N

F_r——惯性离心力，N

F_{fs}——种子间摩擦阻力，N

F_{ns}——种子间挤压力，N

F_t——F_r 与 G 合力，N

F_q——F_t 与 F_{fs} 合力，N

F_0——型孔负压吸附力，N

α——排种盘锥度，(°)

β——F_q 与横截面夹角，(°)

C——种子重心与排种盘之间距离，m

R_x——型孔半径，x 取 1 或 2

考虑外界振动对排种器的影响，加入排种器运行可靠性系数 K_1（取 1.6~2.0）和吸种可靠性系数 K_2（取 1.8~2.0），整理可得

$$P_0 = \frac{8CK_1K_2}{\pi D^3}\left[\left(\sin\alpha - \frac{D}{2C}\cos\alpha\right)\cos\beta\sqrt{\lambda_s^2F_{ns}^2 + G^2 + \frac{G^2v^4}{g^2R_x^2}\cos\theta + 2\lambda_s F_{ns}\sqrt{G^2 + \frac{G^2v^4}{g^2R_x^2} + \frac{2G^2v^2}{gR_x}\cos\theta\cos\varphi}} - \frac{D}{2C}F_{ns} + \frac{D}{2C}F_N\right] \tag{11}$$

当型孔运动到水平方向正左方时，F_{fs}与G竖直向下，与截面夹角为90°，此时$F_R\cos\beta=F_r$，$\theta=90°$，化简可得此时吸种临界负压为

$$P_0=\frac{8CK_1K_2}{\pi D^3}\left[\left(\sin\alpha-\frac{D}{2C}\cos\alpha\right)\frac{Gv^2}{gR_x}-\frac{D}{2C}F_{ns}-\frac{D}{2C}F_N\right] \tag{12}$$

当种子位于排种盘正下方时，θ、φ和β均等于0，$\cos\theta$和$\cos\varphi$达到最大值，可得到吸附种子最大临界负压，即$\cos\theta=\cos\varphi=\cos\beta=1$，代入简化公式得

$$P_0=\frac{8CK_1K_2}{\pi D^3}\left[\left(\sin\alpha-\frac{D}{2C}\cos\alpha\right)\sqrt{\lambda_s F_{ns}+\sqrt{G^2+\frac{G^2v^4}{g^2R_x^2}+\frac{2G^2v^2}{gR_x^2}}}-\frac{D}{2C}F_{ns}-\frac{D}{2C}F_N\right] \tag{13}$$

分析以上两个极限位置的临界负压表达式可知，吸种临界负压在排种器下方时达到最大值，在正左方水平位置达到最小，在此过程中，$\cos\theta$、$\cos\varphi$和$\cos\beta$逐渐减小，故从最低点到左侧水平位置吸附种子所需的临界负压不断减小。

分析最大临界负压表达式可知排种盘在相同转速下型孔分度圆直径越大，种子线速度越大，型孔与种子作用时间缩短，此时吸附种子所需要的负压气流较大。假设F_{ns}和F_N不变，在工作参数确定情况下，吸附种子所需临界负压只与排种盘锥度有关，而当α在0°~90°区间内，$\sin\alpha-\frac{D}{2C}\cos\alpha$的导函数恒大于0，$\sin\alpha-\frac{D}{2C}\cos\alpha$单调递增，即随着锥度增加所需的临界负压也相应增加，当$\alpha=0°$，即当锥形排种盘趋向于滚筒式时，充种所需要的临界负压最小，当$\alpha=90°$即锥形排种盘趋向于垂直圆盘式时，充种所需要的临界负压最大，与实际相符合，因此为提高充种性能，排种盘锥度应适当减小。考虑实际工作中斜面支持力和种群挤压力的影响，若排种盘锥度过小，受种群重力影响会造成种子运移阻力过大，导致被吸附的小麦种子有脱离排种型孔的趋势；若排种盘锥度过大，盘面对种群扰动性太差会出现种群平均动能过低充种性能较差的问题。

综上可知，在充种区域吸附种子的临界负压与小麦种子物理特性、型孔直径、排种盘锥度、型孔分度圆直径和排种器工作参数相关。

2.2.2 携种环节力学分析

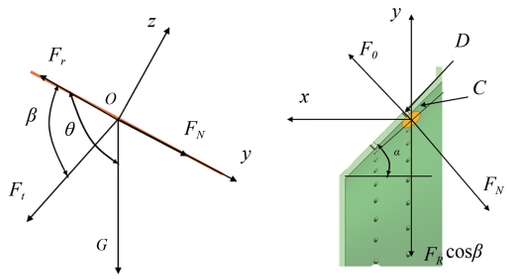
被吸附种子摆脱种群积压顺利进入携种区域后，随排种盘做匀速圆周运动直至到达投种区域，此过程种子受力如图8所示。

种子顺利通过携种区域需满足边界条件

$$\left(F_0-F_R\cos\beta\cos\alpha-F_N\right)\frac{D}{2}=F_RC\sin\alpha \tag{14}$$

其中

$$\begin{cases}F_R=G+F\\F_t=\left|G+F_r\right|=\sqrt{G^2+F_r^2+2GF_r\cos\theta}\end{cases} \tag{15}$$



(a) 平行于截面方向 (b) 垂直于截面方向

图8 携种过程受力分析

Fig. 8 Force analysis of seed in carrying process

引入运行可靠性系数K_1和吸种可靠性系数K_2后，代入式(13)可得

$$P_0=\frac{8CK_1K_2}{\pi D^3}\left[\left(\sin\alpha+\frac{D}{2C}\cos\alpha\right)\cos\beta\cdot\sqrt{G^2+\frac{G^2v^4}{g^2R_x^2}+2\frac{G^2v^2}{gR_x}\cos\theta}+\frac{D}{2C}F_N\right] \tag{16}$$

分析可知，种子在携种区域所需的临界压力和种子重力、型孔尺寸、排种盘转速、型孔分度圆直径等有关，当种子运动到携种区最高点时，重力G和离心力F_r共线，$F_R\cos\beta=G-F_r$，$\cos\theta$、$\cos\beta$最小，此时临界负压达到最小，代入式(16)简化可得

$$P_0=\frac{8CK_1K_2}{\pi D^3}\left[\frac{D}{2C}F_N-\left(\sin\alpha+\frac{D}{2C}\cos\alpha\right)\left(G-\frac{Gv^2}{gR_x}\right)\right] \tag{17}$$

从携种区起点至最高点过程中β由锐角过渡到平角，$\beta=90°$时记为点P。分析携种区起点至最高点的临界负压变化规律，在工作参数确定情况下，忽略工作过程中排种盘对种子支持力的变化，$\cos\theta<0$且不断减小，由起点至$\beta=90°$即P点时，$\cos\beta>0$，旋转至点P后至最高点时，$\cos\beta<0$，在此过程中$\cos\beta$逐渐减小，由式(17)可知，临界负压在最高点时达到最小值，种子由携种区起点至最高点和最高点到携种区终点的受力规律是对称的，因此当$\theta=270°$时临界负压最大，因此将充种区域设计在$\theta>270°$后，隔断负压，种子在自重作用下可顺利脱离型孔完成投种。

综上，随排种盘转动种子所需临界吸种负压呈先减后增规律，且在正上方时所需临界负压最小，进入投种区域瞬间所需临界负压达到最大，种子顺利通过携种区域所需负压与充种环节一致。

2.2.3 投种环节力学分析

考虑小麦千粒质量较大，同时为降低排种过程中的风机能耗，依靠种子自重投种，种子进入投种区后，气室内负压气流受隔板的阻隔，在投种区域形成无压区，排种盘运行角速度ω，种子脱离型孔做初速度为ωR_x的匀加速直线运动，运移与下落时间t为$\omega R_x t+\frac{gt^2}{2}$。可知排种盘工作转速和型孔分度圆直径是影响投种种子位移的重要因素。

3　锥形排种盘模拟仿真试验

3.1　基于EDEM的排种盘锥度

EDEM以动态松弛法和牛顿定律为理论基础，将连续介质离散为小颗粒，计算颗粒间的力分析连续介质的运动和形变，近年来在排种器结构和工作参数对籽粒运动特性影响分析中应用较多[24-25]。

3.1.1　仿真模型构建

气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器左右对称，为节约仿真时间，采用单侧进行充种仿真试验。长江中下游常用小麦品种与排种器材料间的力学参数如表1所示。

3.1.2　排种盘锥度对种群扰动的影响

由种子填充力学分析可知，排种盘锥度是影响排种性能的重要结构参数，现有气吸式排种器多以垂直圆盘式和滚筒式排种器为主。垂直圆盘式排种器工作过程中种子受种群的挤压力较小，但对种群扰动能力较差，充种较滚筒式排种器困难，而滚筒式排种器对种群扰动能力较强，进而充种效果较好，但被吸附种子易受种群挤压力影响进而导致脱落。

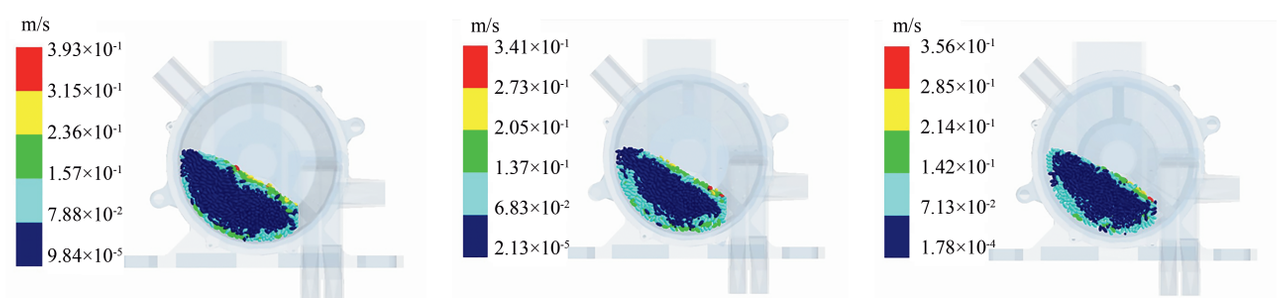
结合垂直圆盘式结构和滚筒式结构优点，提出一种锥形排种盘结构，在增大种群扰动的同时有效降低种子运移阻力。选取锥度30°、45°、60°排种盘进行仿真试验，以种群平均动能与种子运移阻力作为评价指标，探究排种盘最佳锥度。

表1　小麦种子及材料仿真参数

Tab. 1　Simulation parameters of wheat seeds and materials

类型	参数	数值
颗粒	颗粒密度/(kg·m^{-3})	1 050
	颗粒千粒质量/g	40.1
	颗粒三轴尺寸/(mm×mm×mm)	6×3×3
	颗粒泊松比	0.42
	颗粒剪切模量/Pa	5.01×10^{8}
不锈钢	材料密度/(kg·m^{-3})	7 900
	材料泊松比	0.3
	材料剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
ABS树脂	材料密度/(kg·m^{-3})	1 060
	材料泊松比	0.39
	材料剪切模量/Pa	8.96×10^{8}
颗粒与材料间接触	颗粒与不锈钢静摩擦因数	0.50
	颗粒与不锈钢恢复系数	0.50
	颗粒与不锈钢滚动摩擦因数	0.01
	颗粒与ABS树脂静摩擦因数	0.75
	颗粒与ABS树脂恢复系数	0.30
	颗粒与ABS树脂滚动摩擦因数	0.01

将三维模型保存为通用格式导入EDEM 2020，参考表1定义颗粒与边界材料的接触参数和物理属性，设置排种盘工作转速为30 r/min，为提高仿真速度，采用static方式生成20 000粒小麦种子，并设置种子生成初始速度为2 m/s。配置仿真运行参数，调节时间步长为15%，总仿真时长为10 s，3组仿真过程如图9所示，种群整体呈高速流种子包围低速流种子的规律。



(a) 30°　　(b) 45°　　(c) 60°

图9　不同锥度排种盘种群仿真过程示意图

Fig. 9　Schematics of population simulation process of seed platter with different tapers

提取3~10 s时间步长下充种室内部颗粒的平均速度，如图10所示。由图10可知，种群平均速度呈现周期性变化，排种盘锥度对种群扰动的影响显著，不同锥度排种盘种群平均速度由大到小为30°、45°、60°，结合受力分析可知排种盘锥度越小，斜面对种子支持力在竖直方向上的分力就越大，有利于种子完成圆周运动，因此种子平均速度越大。

3.1.3　排种盘锥度对种群运移阻力的影响

由前述分析可知，随排种盘锥度的减小，种盘对种群的扰动能力越大；为进一步探究排种盘锥度对排种过程的影响，分析被吸附种子在运移过程中所受种群挤压力的变化规律，进行不同锥度排种盘种群运移阻力影响

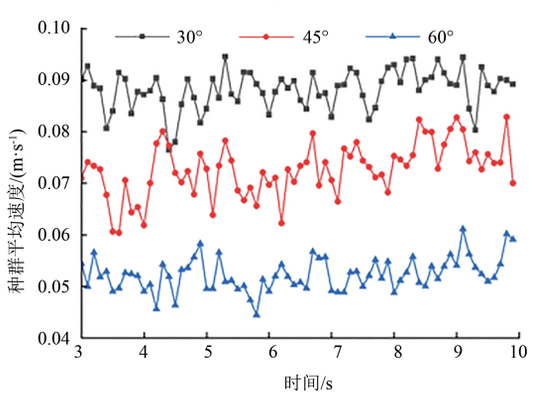


图10　不同锥度排种盘种群平均速度与时间关系曲线

Fig. 10　Relation curves of average seed speed and time of different tapers seed plate

分析。

在Solidworks中进行小麦种子建模，并镶嵌在排种盘型孔上，在EDEM中将小麦种子接触参数和物理参数赋值给种子模型，设置排种器转速为30 r/min，对种子模型添加同样旋转速度，模拟种子被吸附状态。仿真过程中颗粒与材料仿真参数见表1，计算完成后统计排种盘在旋转过程中种子模型与种子颗粒间的挤压力。种子在充种区域才会与种群发生挤压，稳定工作区间内，种子分别在4.3 s进入充种区、5.1 s离开种群进入携种区，故选取4.3~5.1 s进行分析，如图11所示。

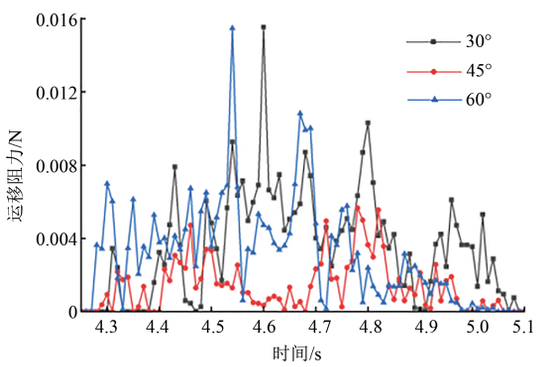


图11 不同锥度排种盘种子运移阻力与时间关系曲线

Fig. 11 Relation curves of seed migration resistance and time of different tapers seed tray

由图11可知，种子在锥度45°排种盘中受到的运移阻力相对较小，波动平缓，在锥度30°和60°排种盘中受到的运移阻力波动较大，实际生产中易造成被吸附种子脱落，从而出现漏播现象。

结合上述排种机理分析和种群扰动仿真结果，排种盘锥度为30°时种群扰动性较好，但由于锥度较小，被吸附种子需突破种群重力束缚的影响，因此运移阻力较大；当排种盘锥度为60°时，对种群的扰动性较差，被吸附种子需抵抗种群惰性力影响，运移阻力也较大；而排种盘锥度为45°时，种群重力沿锥面向下的分力较大而垂直斜面阻碍种子运移的分力相对较小，可兼顾种群扰动较大和被吸附种子的运移阻力较小优势，因此确定锥形排种盘锥度为45°。

3.2 排种盘扰动过程运动规律

由仿真过程观察可知，种群在排种器内部周期性运动，按运动规律将排种器内部种群分为拖带层种群、带动层种群和静止层种群，拖带层种子随着排种盘转动顺时针螺旋转动，带动层种子在拖带层种群摩擦下按顺时针缓慢蠕动，而处于静止层种群处的种子呈原地旋转状态，当种子由最低点运动至种群最高点时，由于斜面支持力不足以提供向心力，沿种群堆积斜面滚落至种群最低点。

在仿真试验后处理界面选取拖带层、带动层和静止层各1粒种子进行分析，统计不同锥度排种盘下种子的运动速度如图12所示。

由图12可知，不同锥度排种盘种子速度由大到小为拖带层、带动层、静止层，以45°排种盘试验结果为研究对象（图12b），拖带层种子经历了由种群最高点滚落至种群最低点的整个过程，速度波动较大，且呈周期性变化。拖带层种子突破种群挤压力后达到种群最高点时速度降至最小，随后顺着种群斜面滚落的过程中种子速度不断增大，当到达种群最低处时速度达到最大。型孔附近种子从最低点到达最高点过程中速度不断降低，脱离种群瞬间种子速度最小，此时种子与负压型孔接触并被吸附，完成充种过程，其他种子重复该周期性过程，完成无序种群到有序种子流的变化。带动层中的种子在种群内部，受力比较均匀因此速度波动较小，但在运动过程中会接触周期性的拖带层种子，因此速度波动也呈周期性变化。静止层种子在种群的正中心且周围都是速度波动较小的带动层种子，因此在静止层的种子速度波动较小且周期性不明显。

不同区域种子在周期性运动过程中可能会跃迁至其他区域，图12a中处于高速流的带动层种子在种间复杂挤压摩擦作用下进入到拖带层区域，这种跃迁现象可增大种群离散程度，有利于充种。不同锥度排种盘同一区域种子运动速度同样遵循上述结论。

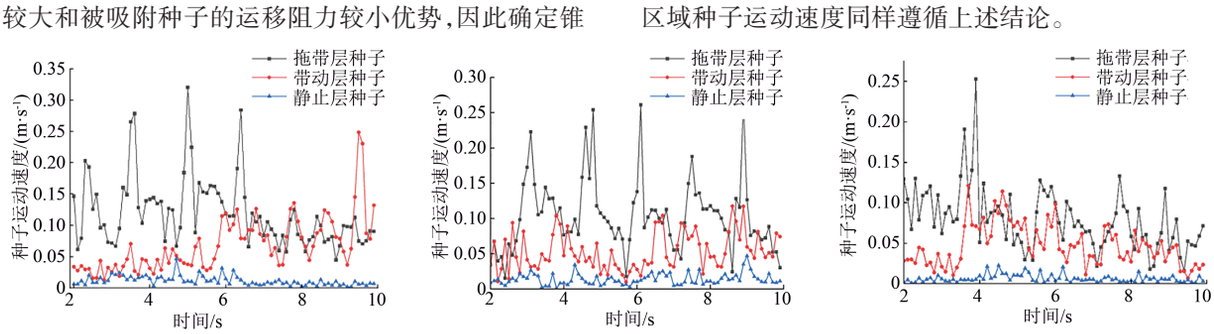


图12 各排种盘中不同区域种子运动规律

Fig. 12 Rules of seed movement in different regions of each seed plate

3.3 基于CFD的排种型孔选型设计

3.3.1 仿真模型及设置

将排种器三维模型导入Workbench中进行排种流体域抽取和简化，分别对充种室流域、气室流域、型孔流域进行网格划分，将网格模型导入Fluent软件中进行求解，为节约仿真时间选择单精度并行运算，采用

Transient计算方法，流体计算模型为k-ε Standard湍流模型，设置型孔流域运动类型为滑移网格，并添加旋转速度为30 r/min。边界条件设置为负压进气口-4.0 kPa，进气口压力与大气压一致，残差监视为1×10^{-4}，计算时间步长为5×10^{-4} s，共迭代4 000次，总计算时间为2 s，排种盘刚好运行1周，迭代计算达到收敛。

3.3.2　排种型孔选型

排种型孔类型和尺寸是排种盘最重要的结构参数，型孔类型有垂直型孔（型孔垂直于锥面）和倾斜型孔（型孔与锥面呈角度β）。为确定排种型孔类型，进行了Fluent仿真试验，在同一工况下统计内侧型孔表面流速的变化情况，如图13所示。

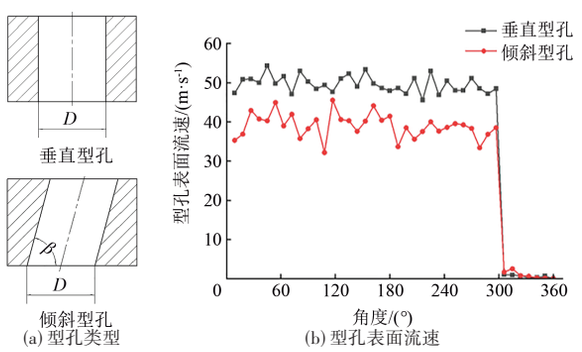


图13　2种型孔表面流速对比

Fig. 13　Comparison of surface velocity of two types of suction holes

由图13可知，垂直型孔表面流速大于倾斜型孔，平均流速约提高19.1%，分析原因是由于负压气流通过垂直型孔时流场无突变，表面流速变化较平稳，倾斜型孔有效吸种面积较大，但型孔与排种盘之间有倾角，气流在型孔流域存在突变和损失。仿真试验结果表明垂直型孔较倾斜型孔更具优势，后续将进行台架试验验证。

4　排种性能试验

4.1　试验材料

采用JPZS-16型计算机视觉排种器试验台对小麦宽苗带精量排种器进行排种性能试验研究，试验装置如图14所示。试验台架油带工作速度为1.5~12.0 km/h，风机负压输出压力为0~50 kPa，质量测量范围0~3 000 g。

试验材料所用小麦品种为长江中下游地区常用的郑麦9023，测得种子含水率为4.56%，种子自然休止角为30.1°。

4.2　试验方法与指标

参考GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》，以各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数、排种均匀性变异系数为评价指标，同时对种子破碎率进行统计，试验重复5次。气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器可排种4行，从左至右编号为1~4。

测试时利用容器收集并称重每行1 min内排出的种子，排量一致性变异系数可表示为

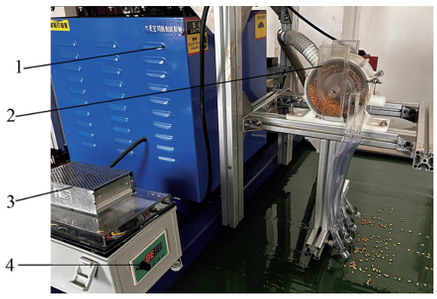


图14　试验装置

Fig. 14　Experimental device

1. 试验台架　2. 气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器　3. 开关电源　4. 脉冲发生器

$$K_a=\frac{S_1}{\overline{p}}\times100\% \tag{18}$$

其中

$$\begin{cases}\overline{p}=\dfrac{1}{l}\sum\limits_{i=1}^{l}p_i\\ S_1=\sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{l}\left(p_i-\overline{p}\right)}{l-1}}\\ p_i=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{j=1}^{n}m_{ij}\end{cases} \tag{19}$$

式中　K_a——排量一致性变异系数，%

S_1——各行排量标准差，g/min

$\overline{p}$——排量平均值，g

p_i——第i行n次排种量测量均值，g/min

n——试验次数，取5

m_{ij}——第i行第j次排种量，g/min

l——排种行数

将1 min内排出的种子进行称量，总排量稳定性变异系数可表示为

$$K_b=\frac{S_2}{\overline{p}_t}\times100\% \tag{20}$$

其中

$$\begin{cases}\overline{p}_t=\dfrac{p_j}{n}\\ S_2=\sqrt{\dfrac{\sum\limits_{j=1}^{n}\left(p_j-\overline{p}_t\right)^2}{n-1}}\\ p_j=\sum\limits_{i=1}^{l}m_{ij}\end{cases} \tag{21}$$

式中　K_b——总排量稳定性变异系数，%

S_2——总排种量标准量，g/min

$\overline{p}_t$——排种总量平均值，g/min

p_j——第j次排种总量，g/min

将油带速度调节至3 km/h，根据排种器实际工作转速计算理论粒距，待稳定工作后，统计排种200 mm长度内各行小麦的粒数，排种均匀性变异系数可表示为

$$K_c=\frac{1}{l}\sum_{i=1}^{l}K_{3i} \tag{22}$$

其中
$$\begin{cases} K_{3i} = \dfrac{S_{3i}}{N_l} \times 100\% \\ S_{3i} = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{n}\left(N_{ij} - \overline{N}_l\right)^2}{n-1}} \end{cases}$$

式中 K_c——排种均匀性变异系数平均值,%

K_{3i}——第i行的排种均匀性变异系数,%

S_{3i}——第i行排种均匀性标准差

N_{ij}——第i行第j次在检测长度内种子数量

$\overline{N}_i$——第i行第j次检测长度内种子数量平均值

田间试验20 d后开展小麦田间均匀性测量,在各苗带内随机选取20段,每段200 mm,统计各段小麦苗株数。测量结果变异系数为

$$V = \frac{S}{\overline{X}} \times 100\% \tag{23}$$

其中
$$\begin{cases} \overline{X}_i = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{20} X_{ij}}{20}} \\ S_i = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{20}\left(X_{ij} - \overline{X}\right)^2}{n-1}} \end{cases} \tag{24}$$

式中 V——测量结果变异系数,%

$\overline{X}_i$——测量结果平均值,株

X_{ij}——各个测量区间株数,株

S_i——测量结果标准差,株

4.3 试验结果与分析

4.3.1 试验设计

结合前文分析,分析排种器的结构参数(型孔直径、型孔类型)和工作参数(工作转速、吸种负压)等因素对排种性能的影响。

当工作转速为30 r/min、负压为4.4 kPa、油带速度为3 km/h时分析不同型孔直径(1.6、1.7、1.8、1.9、2.0 mm)和型孔类型(垂直型孔和倾斜型孔)对排种性能的影响。

由受力分析可知影响排种性能的工作参数主要为吸种负压和排种器工作转速,故主要分析吸种负压和工作转速对排种量和排种性能指标的影响。

结合预实验结果,选取吸种负压为4.0~5.6 kPa,以0.4 kPa为梯度取5个水平,选取工作转速为20~40 r/min,以5 r/min为梯度取5个水平开展工作参数对排种量的影响试验。为进一步探究工作参数的较优参数组合,结合排种量影响试验参数范围和结果,确定油带速度为3 km/h,吸种负压为5.2~5.6 kPa,转速为30~40 r/min,以上述排种性能指标为试验指标,考虑因素之间的相互作用,进行双因素三水平正交试验,采用正交表$L_9(3^4)$,试验因素水平如表2所示。

表2 因素水平

Tab. 2 Factors and levels

水平	因素	
	转速A/(r·min^{-1})	负压B/kPa
1	30	5.2
2	35	5.4
3	40	5.6

4.3.2 试验结果

排种盘结构参数排种性能试验结果如图15所示。由图15可知,垂直型孔结构各项评价指标均优于倾斜型孔,原因为倾斜型孔与锥面呈一定角度而导致负压气流损失较大,吸附效果弱于垂直型孔,随着倾斜型孔尺寸的增大,排量一致性变异系数和排种均匀性变异系数呈先降后升的趋势,当型孔直径为1.8 mm时均达最小值,而总排量稳定性变异系数变化不明显,排种均匀性变异系数受落种部件和导种管的影响较大,因此确定型孔直径为垂直型孔,型孔尺寸为1.8 mm。

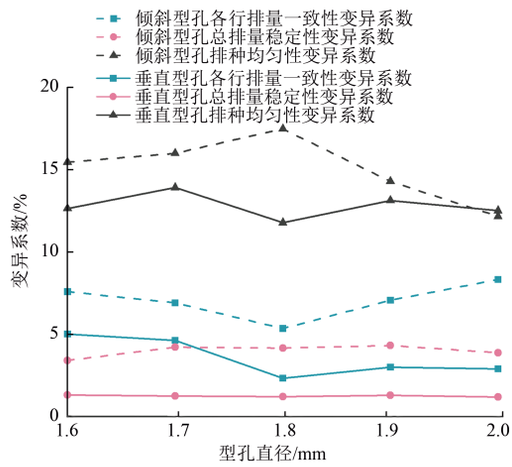


图15 排种盘结构参数对排种性能指标影响

Fig. 15 Effects of structure parameters of seeding disk on seeding performance

工作转速和吸种负压对排种量影响的试验结果如图16所示。由图16可知,播种量随着吸种负压和工作转速的增加呈线性增大的趋势,当负压较低时存在漏吸现象,排种量随负压增加呈先快速增大后缓慢增大的规律,当转速为30~40 r/min、负压为5.2~5.6 kPa时,排种量达到220~290 g/min,本设计中1.8 m作业幅宽分布5个宽苗带,播种量可达122.2~161.1 kg/hm^2,满足小麦精量播种要求。

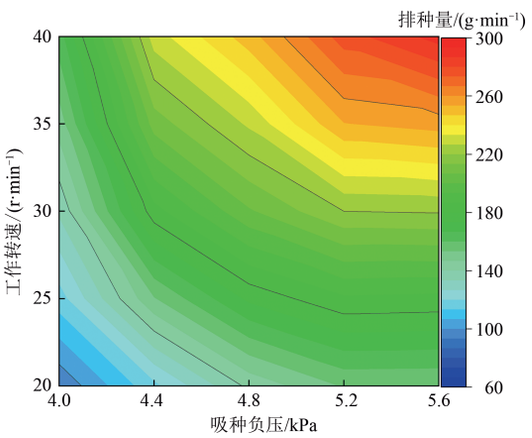


图16 工作参数对排种量的影响

Fig. 16 Effects of working parameters on seeding quantity

工作转速和吸种负压的正交试验设计、极差分析如表3、4所示，趋势曲线如图17所示。由图17可知，影响小麦宽苗带排种器排量一致性变异系数和排种均匀性变异系数的主次因素均为工作转速、吸种负压，影响总排量稳定性变异系数的主次因素为工作转速、工作转速和吸种负压交互作用；在试验水平范围内破损率均小于0.03%；当工作转速为30 r/min、吸种负压为5.4 kPa时，各行排量一致性和各行排种均匀性均较优；当工作转速为30 r/min、吸种负压为5.2 kPa时，总排量稳定性变异系数最低，考虑到总排量变异系数在试验过程中变化不大，均低于2%，综合确定该排种器最佳工作参数组合为工作转速30 r/min、吸种负压5.4 kPa，此时排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数、排种均匀性变异系数分别为1.93%、1.26%、9.52%。

表3　正交试验安排与结果

Tab. 3　Orthogonal experiment

试验号	因素				各行排量一致性变异系数/%	总排量稳定性变异系数/%	排种均匀性变异系数/%	破损率/%
	A	B	$(A\times B)_1$	$(A\times B)_2$				
1	1	1	1	1	2.13	1.14	10.53	0.012
2	1	2	2	2	1.93	1.26	9.52	0.013
3	1	3	3	3	2.34	1.32	11.13	0.011
4	2	1	2	3	2.38	1.29	12.50	0.028
5	2	2	3	1	2.07	1.34	11.61	0.009
6	2	3	1	2	2.48	1.35	11.13	0.017
7	3	1	3	2	3.21	1.44	14.62	0.008
8	3	2	1	3	2.81	1.32	12.45	0.012
9	3	3	2	1	3.46	1.33	12.50	0.019

表4　极差分析结果

Tab. 4　Range analysis result

评价指标		A	B	$(A\times B)_1$	$(A\times B)_2$
各行排量一致性变异系数	k_1	2.13	2.57	2.47	2.55
	k_2	2.31	2.27	2.59	2.54
	k_3	3.16	2.76	2.54	2.51
	R	1.03	0.49	0.12	0.04
总排量稳定性变异系数	k_1	1.24	1.29	1.27	1.27
	k_2	1.33	1.31	1.29	1.35
	k_3	1.36	1.33	1.37	1.31
	R	0.12	0.04	0.10	0.08
排种均匀性变异系数	k_1	10.39	12.55	11.37	11.55
	k_2	11.75	11.19	11.51	11.76
	k_3	13.19	11.59	12.45	12.03
	R	2.80	1.36	1.08	0.48

4.3.3　田间试验

为验证排种器田间作业情况，并测试小麦宽苗带播种与条播时种子田间均匀性情况，于2022年11月3日在华中农业大学现代农业科技园试验基地开展田间播种试验，将锥盘式小麦宽苗带精量排种器与传统小麦外槽轮排种器安装在课题组前期研制的油麦联合直播机平台上，进行对比试验，试验前测得土壤含水率为10.3%，小麦品种与上述测试品种保持一致。田间试验如图18所示。

根据小麦宽苗带农艺要求，调节开沟宽度为80 mm，苗带间距为300 mm，调节电机转速控制两排种器播种量一致，统计田间小麦单位长度内株数（图19），对比两种播种方式的播种均匀性差异。

由图19可知，气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器和外槽轮排种器在测量距离内平均株数分别为20.15、21.05，苗带内播种均匀性变异系数分别为11.77%、22.51%，气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器播种均匀性优于小麦宽苗带播种常用的外槽轮排种器。

5　结论

（1）开展锥形排种盘对种群离散程度的仿真试验，排种盘锥度为45°时，兼具种群扰动性好和种子运移阻力小的优点；分析充种区种群扰动过程运动规律，明确种群由无序堆积到有序种子流状态时的速度变化。

（2）开展排种器结构参数（型孔类型、型孔尺寸）和工作参数（工作转速、吸种负压）台架试验可知，锥形排种盘的型孔类型为垂直型孔、尺寸为1.8 mm时，排种器

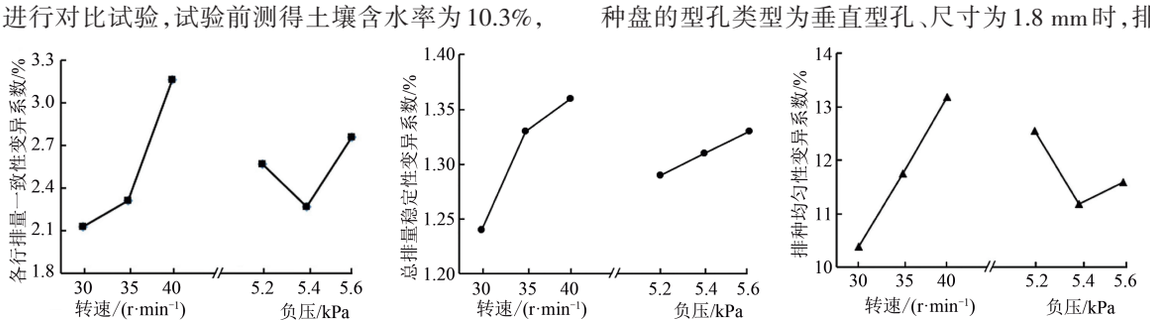


图17　趋势图

Fig. 17　Trend charts



(a) 田间试验场景 (b) 出苗效果

图 18 田间试验

Fig. 18 Field tests

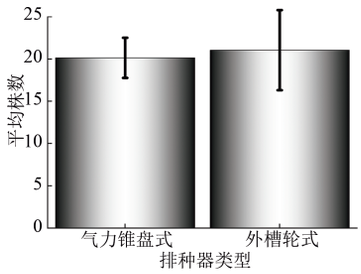


图 19 不同排种器的播种均匀性统计

Fig. 19 Statistics of seeding uniformity of different seed metering devices

性能指标较佳；当工作转速为 30~40 r/min、吸种负压为 5.2~5.6 kPa 时，小麦排种量可达到精量播种要求。正交试验结果表明，当工作转速 30 r/min、吸种负压 5.4 kPa 时，各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数、排种均匀性变异系数分别为 1.93%、1.26%、9.52%。

(3)与传统机械槽轮式宽苗带排种器田间对比试验可知，气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器播种均匀性较外槽轮排种器有明显提升，能满足小麦宽苗带精量播种要求。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 2022年国际统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2022.

[2] MELASH A, MENGISTU D, ABERRA D, et al. The influence of seeding rate and micronutrients foliar application on grain yield and quality traits and micronutrients of durum wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 85: 221 - 227.

[3] ZHU Yuangang, CHU Jinpeng, DAI Xinglong, et al. Delayed sowing increases grain number by enhancing spike competition capacity for assimilates in winter wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2019, 104 (2): 49 - 62.

[4] 王凯，贾永红，罗四维，等. 播种方式和种植密度对冬小麦根系生长和产量的影响[J]. 麦类作物学报，2023, 43(2): 225 - 232.
WANG Kai, JIA Yonghong, LUO Siwei, et al. Effect of sowing pattern and planting density on root growth and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(2): 225 - 232. (in Chinese)

[5] 胡红，李洪文，李传友，等. 稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报，2016, 32(4): 24 - 32.
HU Hong, LI Hongwen, LI Chuanyou, et al. Design and experiment of broad width and precision minimal tillage wheat planter in rice stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 24 - 32. (in Chinese)

[6] 石吕，薛亚光，魏亚凤，等. 基于宽窄行种植模式下稻秸非均匀性覆盖对土壤特性及小麦产量的影响[J]. 核农学报，2021, 35(7): 1668 - 1677.
SHI Lv, XUE Yaguang, WEI Yafeng, et al. Effects of rice straw non-uniform mulch on soil characteristics and wheat yield based on wide-narrow row planting pattern[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2021, 35(7): 1668 - 1677. (in Chinese)

[7] 孔令英，赵俊晔，于振文，等. 宽幅播种条件下种植密度对小麦群体结构和光能利用率的影响[J]. 麦类作物学报，2020, 40(7): 850 - 856.
KONG Lingying, ZHAO Junye, Yu Zhenwen，ea al. Effect of planting density on population structure and light use efficiency of wheat under wide-width sowing conditions[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(7): 850 - 856. (in Chinese)

[8] 余松烈. 现代小麦栽培科学及其发展展望[M]. 济南：山东科学技术出版社，2004.

[9] 段剑钊，李世莹，郭彬彬，等. 宽幅播种对冬小麦群体质量及产量的影响[J]. 核农学报，2015，29(10)：2013 - 2019.
DUAN Jianzhao, LI Shiying, GUO Binbin, ea al. Effect of wide belt planting on population quality and yield in winter wheat[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(10): 2013 - 2019. (in Chinese)

[10] 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. Effect of spacing intervals on the ageing process and grain yield in winter wheat under wide bed planting methods[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2686 - 2694. (in Chinese)

[11] 郑侃，刘国阳，国立伟，等. 土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报，2022, 53(2): 128 - 138.
ZHENG Kan, LIU Guoyang, GUO Liwei, et al. Design and experiment of wide-boundary seldom-tillage wheat planter with soil-shunting function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 128 - 138. (in Chinese)

[12] 石玉华，初金鹏，尹立俊，等. 宽幅播种提高不同播期小麦产量与氮素利用率[J]. 农业工程学报，2018，34(17)：127 - 133.
SHI Yuhua, CHU Jinpeng, YIN Lijun, et al. Wide-range sowing improving yield and nitrogen use efficiency of wheat sown at different dates[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 127 - 133. (in Chinese)

[13] 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 test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 75 - 84. (in Chinese)

[14] 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, ea al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 53 - 62. (in Chinese)

[15] 程修沛，卢彩云，孟志军，等. 气吸型孔组合式小麦精密排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报，2018，34(24)：1 - 9.
CHENG Xiupei, LU Caiyun, MENG Zhijun, et al. Design and parameter optimization on wheat precision seed meter with combination of pneumatic and type hole[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 1 - 9. (in Chinese)

(下转第 335 页)

irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2017(1): 25 - 27,32. (in Chinese)
[26] 姚约东,葛家理.低渗透油藏不稳定渗流规律的研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(2): 55 - 58,62.
YAO Yuedong, GE Jiali. Non-steady flow in low-permeability reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2003, 27(2): 55 - 58,62. (in Chinese)
[27] 裴青宝,刘伟佳,张建丰,等.多点源滴灌条件下红壤水分溶质运移试验与数值模拟[J]. 农业机械学报, 2017 ,48(12): 255 - 262.
PEI Qingbao, LIU Weijia, ZHANG Jianfeng, et al. Movement and numerical simulation of soil water solute migration under multipoint drip irrigation in red soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017 ,48(12): 255 - 262. (in Chinese)
[28] 贾洪涛,张鹏飞,代智光.容重对红壤区地下滴灌水分入渗能力影响研究[J]. 节水灌溉, 2019(4): 36 - 40.
JIA Hongtao, ZHANG Pengfei, DAI Zhiguang. Study on the influence of bulk density on water infiltration capacity under subsurface drip irrigation for red soil region[J]. Water Saving Irrigation, 2019(4): 36 - 40. (in Chinese)
[29] 费良军,康守旋,聂卫波,等.基于Green-Ampt的膜孔灌三维入渗模型建立与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 69 - 75.
FEI Liangjun, KANG Shouxuan, NIE Weibo, et al. Development and verification of 3D Green-Ampt based membrane pore infiltration model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 69 - 75. (in Chinese)
[30] 李斯. 基于HYDRUS模型不同土壤有效水边界对沙壤土滴灌湿润体特性影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
LI Si. Study of sandy soil drip irrigation wetting characteristic on different soil available water boundaries based on HYDRUS model[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

(上接第176页)

[16] 侯加林,马端旭,李慧,等.气力离心组合式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):35 - 45.
HOU Jialin, MA Duanxu, LI Hui, et al. Design and experiments of a pneumatic centrifugal combined precision seed metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 35 - 45. (in Chinese)
[17] 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. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 1 - 11. (in Chinese)
[18] 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 on straw post-covering wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52 - 59. (in Chinese)
[19] 王超,李洪文,何进,等.稻麦轮作区气动式小麦精准投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5): 43 - 53.
WANG Chao, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of pneumatic wheat precision seed casting device in rice-wheat rotation areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 43 - 53. (in Chinese)
[20] 刘瑞,刘忠军,刘立晶,等.玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):50 - 59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 50 - 59. (in Chinese)
[21] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等.基于TRIZ-AD的集成式油菜气力精量排种装置设计[J]. 农业工程学报,2023,39(14):49 - 59.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design of the integrated precision pneumatic seed metering device for rapeseed using TRIZ-AD[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 49 - 59. (in Chinese)
[22] 廖宜涛,廖庆喜,王磊,等.气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报,2018,34(24):10 - 17.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Investigation on vacuum singulating effect influencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10 - 17. (in Chinese)
[23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社,2007.
[24] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等.播种机排种技术研究态势分析与趋势展望[J]. 农业工程学报,2022,38(24):1 - 13.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Trend analysis and prospects of seed metering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 1 - 13. (in Chinese)
[25] ZHAO Hongbo, HUANG Yuxiang, LIU Zhengdao, et al. Applications of discrete element method in the research of agricultural machinery-a review[J]. Agriculture, 2021, 11: 425