

油菜精量播种导种环节种子流有序性分析

廖宜涛^{1,2}, 孙 迈¹, 廖庆喜^{1,2}, 王传奇¹, 郑 娟¹, 武安阳¹

(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: 针对油菜精量播种种子运移环节中排种器排出的单粒有序种子流在导种环节被破坏, 造成播种均匀性降低的问题, 该研究对导种过程种子流有序性进行分析, 明确破坏种子流有序状态的主要原因是种子与导种管管壁的随机碰撞, 而导致碰撞发生的主要因素是导种管曲线、内径和长度。导种过程离散元仿真试验表明, 在相同内径及长度的导种管中, 种子通过直线型导种管较 S 型导种管碰撞次数变异系数平均降低 2.1 个百分点, 时间变异系数平均降低 1.8 个百分点; 较抛物线型导种管平均碰撞次数变异系数降低 0.5 个百分点, 平均时间变异系数降低 0.5 个百分点; 在相同曲线及长度的导种管中, 种子通过 32 mm 内径导种管较 25 mm 碰撞次数变异系数降低 7.2 个百分点, 时间变异系数降低 2.6 个百分点; 在相同曲线及内径的导种管中, 无论缩短导种管的哪一部分长度均能降低碰撞次数及碰撞次数变异系数。种子流通过某一导种管的碰撞次数变异系数越大, 时间变异系数越大, 种子流下落轨迹越离散, 种子流有序性越差, 导种管曲线对种子流有序性的影响小于内径及长度。台架试验结果表明, 采用直线型导种管较 S 型导种管粒距合格指数平均提高 3.2 个百分点, 漏播指数和重播指数平均降低 2.0 和 1.2 个百分点; 较抛物线型导种管粒距合格指数平均提高 2.8 个百分点, 漏播指数和重播指数平均降低 2.0 和 0.8 个百分点; 内径 38 mm 的导种管较 25 mm 导种管, 粒距合格指数提高 11.4 个百分点, 漏播指数和重播指数分别降低 4.6 和 6.8 个百分点; 长度 20 cm 的导种管较 80 cm 导种管, 粒距合格指数提高 27.6 个百分点, 漏播指数和重播指数分别降低 10.6 和 17.0 个百分点; 随导种管长度增加或内径缩小, 粒距逐渐从以设定株距为中心的正态分布渐变为重播指数较高的指数分布。为降低导种环节影响, 建议油菜精量播种机导种管曲线采用直线型、内径不小于 25 mm、长度不超过 40 cm。研究结果揭示了导种管结构对种子流有序性的影响机制, 可为导种装置设计与优化提供参考。

关键词: 试验; 油菜; 导种管; 播种均匀性; 导种环节

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305214

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-23-0023-13

廖宜涛, 孙迈, 廖庆喜, 等. 油菜精量播种导种环节种子流有序性分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23): 23-35. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305214 <http://www.tcsae.org>

LIAO Yitao, SUN Mai, LIAO Qingxi, et al. Ordering of seed flow in seed guiding of precision sowing for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(23): 23-35. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305214 <http://www.tcsae.org>

0 引言

油菜是主要的油料作物, 发展油菜产业对保障国家油料供给安全具有重要意义^[1-2]。油菜机械化生产是油菜产业提质增效的核心, 其中播种装备是油菜全程机械化的基础。气力式油菜精量联合直播技术集成旋耕整地、正负气压组合式油菜单粒精量排种、同步施肥和开畦沟等多项技术, 具有节本、增效、轻简等优势, 近年来在生产中得到广泛应用^[3]。

农作物的高产稳产取决于品种、肥料等多个因子, 形成密度适宜、分布均匀的植株群体是实现高产稳产的关键^[4-5]。在油菜机械化、规模化、轻简化生产模式下, 传统人工间苗、补苗等株距均匀性调控措施难以实施, 均匀分布的植株群体主要通过机械化单粒精量播种形成。

油菜精量直播机作业过程中, 吸种环节完成单粒取种, 后续环节实现种子流有序状态的保持。针对吸种环节, 前期通过高速摄影试验明确了吸种环节影响机制, 确定吸种负压可靠性系数计算模型, 单粒吸种概率达到 92% 以上^[6]; 通过改进型孔结构, 使卸种后排种合格指数稳定在 90% 以上^[7]。但实践中发现油菜精量直播的田间出苗均匀性与台架试验排种均匀性存在差距, 田间调查表明油菜株距概率密度服从重播概率较高的指数分布^[8], 而不是以合理株距为中心值的正态分布, 因此播种均匀性需通过对后续导种环节的研究进一步提升。

目前国内外播种机多采用低位直接投种或高位安装导种装置。导种管具有结构简单、安装方便的特点, 柔性导种管还具有改变导种路径、便于整机布局的优势^[9]; 气力式播种机中高位安装导种管可以避免尘土堵塞。明晰导种环节中种子流有序状态的破坏因子和作用规律, 进而控制种子流全自由度或局部自由度是提升播种均匀性的关键^[10-12]。当前导种管研究多为结构设计, 如通过高速摄影或理论分析构建排种器投种轨迹, 研制拟合曲线导种管^[13-15]; 结合“零速投种”理论设计导种管^[16];

收稿日期: 2023-05-26 修订日期: 2023-10-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000403); 国家自然科学基金项目(51975238); 国家油菜产业技术体系专项(CARS-12); 湖北省农机装备攻关项目(HBSNY202207)

作者简介: 廖宜涛, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代农业装备设计与测控研究。Email: liaoctao@mail.hzau.edu.cn

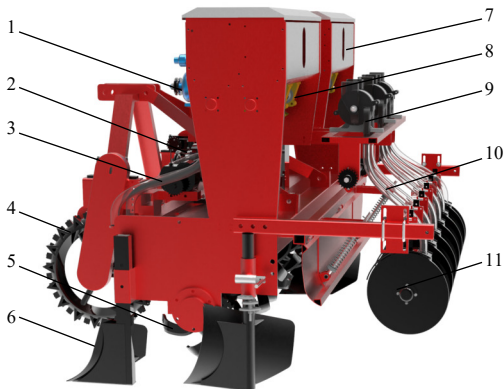
应用逆向工程设计导种管^[17]；在导种管内增添V型凹槽与柔性播轮^[18]；将导种管拆分为结合段与投送段并由转动副连接，利用驱动机构进行整体平移和旋转运动^[19]。以上方法均可减少种子与导种管管壁的随机碰撞。此外，有研究发现新导种管比磨损后导种管的播种质量好^[20]，结构设计不合理的导种管播种质量甚至低于无导种管^[21]，具有抛物线轮廓的导种管比竖直导种管的播种质量好^[22]。以上研究对象多为中大粒径种子，油菜等小粒径种子质量轻，有序运移过程更易受到扰动破坏^[23]，相关研究相对较少，且缺乏导种管结构对种子流有序性影响规律的理论研究。

为探究导种管结构对种子流有序状态的影响规律，采用理论分析、离散元仿真和台架试验，分析种子流通过不同导种管结构后的状态，揭示导种管对种子流有序状态的影响机制，以期为油菜等小粒径种子播种机导种管装置设计与优化提供参考。

1 卸种与导种过程分析

1.1 油菜精量联合直播机结构及工作原理

油菜精量联合直播机结构示意图如图1所示。排种器安装在支撑架上，距地面约900 mm，通过导种管与开沟器连接。目前播种机采用内径25 mm、长度80 cm的PVC钢丝软管作为播种机导种装置。



1. 风泵 2. 变速装置 3. 排肥管 4. 地轮 5. 旋耕装置 6. 畦沟犁 7. 肥箱 8. 排肥器 9. 正负气压组合式精量排种器 10. 导种管 11. 开沟器
1. Air pump 2. Speed changing device 3. Fertilizing tube 4. Ground wheel 5. Rotary tilling device 6. Ditching plow 7. Fertilizer box 8. Fertilizer apparatus 9. Positive and negative pressure combination precision seed metering device 10. Seed tube 11. Opener

图1 油菜精量联合直播机结构示意图

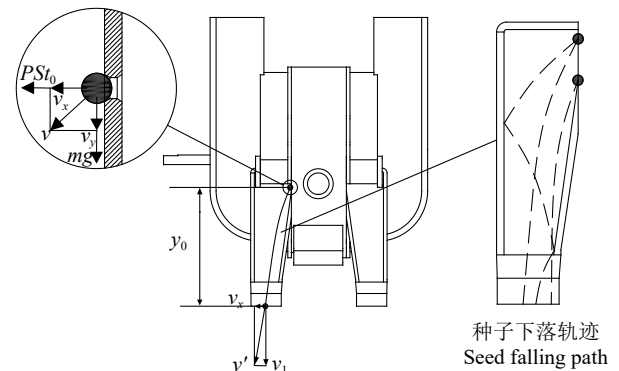
Fig.1 Structure diagram of rapeseed precision combined direct seeding machine

工作时，风机提供排种器所需正负压，地轮驱动排肥器与排种器，肥料经排肥管撒至土壤表面，由旋耕系统搅入土壤；种子经导种管输送至开沟器，开沟器在旋耕系统形成的种床上开沟、覆土，使种子到达适宜播深位置，畦沟犁同步开出畦沟。

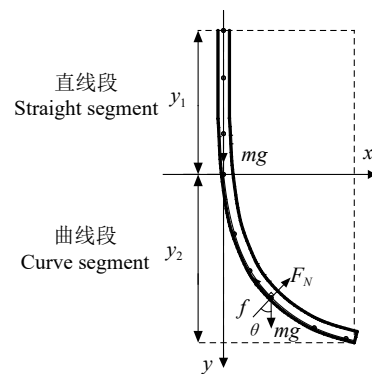
由于传动系统安装限制及作业地块土壤粘附性，采用排种器高位安装和导种管导种。导种管有抛物线型、直线型和S型等，为揭示导种管结构对种子流有序性的影响，需要对种子运动过程进行分析。

1.2 卸种过程分析

种子在负压及种群重力作用下完成吸种，随排种盘转动经过携种区并运移至正压卸种区，此时种子在正压气流吹力作用下获得垂直排种盘方向的速度，结合重力作用和圆周运动获取的竖直方向速度，使种子离开型孔后做斜抛运动，如图2a所示。前期高速摄影研究发现，当卸种正压在100~250 Pa时，种子下落轨迹主要有以下三种情况：1) 大多数种子落种轨迹不与落种口内壁发生接触，2) 部分种子在正压气吹力作用下获得较大水平速度与左侧板发生碰撞，3) 部分种子未在正压气吹力作用下及时落种，随排种盘转动被右侧板顶端蹭落，其中第2和第3种情况为小概率事件^[24]，因此本文仅讨论第1种情况的卸种过程。



a. 卸种过程
a. Seed discharging process



b. 导种过程
b. Seed guiding process

注： m 为单粒种子质量，kg； g 为重力加速度， $m\cdot s^{-2}$ ； P 为型孔处压强，Pa； S 为型孔面积， m^2 ； t_0 为种子脱离型孔时间，s； y_0 为型孔距排种器出口距离，m； v_x 为种子离开型孔与排种器时水平方向速度， $m\cdot s^{-1}$ ； v_y 为种子离开型孔时竖直方向速度， $m\cdot s^{-1}$ ； v 为种子离开型孔时合速度， $m\cdot s^{-1}$ ； v_1 为种子离开排种器时竖直方向速度， $m\cdot s^{-1}$ ； v' 为种子离开排种器时合速度， $m\cdot s^{-1}$ ； y_1 为导种管直线段长度，m； y_2 为导种管曲线段竖直长度，m； F_N 为管壁对种子的支持力，N； θ 为曲线某点法线方向与竖直方向夹角， $(^\circ)$ ； f 为摩擦力，N。
Note: m is the weight of a single seed, kg; g is the acceleration of gravity, $m\cdot s^{-2}$; P is the pressure at the hole, Pa; S is the hole area, m^2 ; t_0 is the seed release time, s; y_0 is the distance between the hole and the outlet of the seed metering device, m; v_x is the horizontal velocity of the seed leaving the hole and the seed metering device, $m\cdot s^{-1}$; v_y is the vertical velocity of the seed leaving the hole, $m\cdot s^{-1}$; v is the resultant velocity of the seed leaving the hole, $m\cdot s^{-1}$; v_1 is the vertical velocity of the seed leaving the seed metering device, $m\cdot s^{-1}$; v' is the resultant velocity of the seed leaving the seed metering device, $m\cdot s^{-1}$; y_1 is the length of the straight segment of the seed tube, m; y_2 is the vertical length of the curve segment of the seed tube, m; F_N is the supporting force of tube on seed, N; θ is the angle between the normal direction and the vertical direction of a certain point of the curve, $(^\circ)$; f is the friction force, N.

图2 卸种过程与导种过程

Fig.2 Seed discharging and guiding process

根据式 (1) 计算种子离开型孔时水平方向初速度 v_x 与竖直方向初速度 v_y ；忽略空气阻力，种子在竖直方向只受重力作用，由式 (2) 计算种子离开落种口进入导种管的竖直分速度 v_1 。

$$\begin{cases} v_x = PS t_0 / m \\ v_y = 2\pi Rn / 1000 \end{cases} \quad (1)$$

$$v_1 = \sqrt{v_y^2 + 2gy_0} \quad (2)$$

式中 R 为排种盘半径，mm； n 为排种盘转速，r/min。

1.3 导种过程分析

选取常用的抛物线型导种管进行分析，其轮廓主要由竖直段和曲线段组成，如图 2b 所示。假设种子为理想刚体，质量分布均匀，只滑动不滚动。

1.3.1 不考虑种子与导种管碰撞的运动分析

种子竖直进入导种管，在导种管的运动分为 2 个阶段，第 1 阶段为种子接触管壁之前的自由落体运动，第 2 阶段为种子沿导种管曲线段的曲线运动。

第 1 阶段：种子只受重力作用，由式 (3) 计算种子离开直线段速度 v_2 及通过直线段时间 t_1 。

$$\begin{cases} v_2^2 - v_1^2 = 2gy_1 \\ y_1 = v_1 t_1 + g t_1^2 / 2 \end{cases} \quad (3)$$

将式 (2) 代入式 (3) 可得：

$$\begin{cases} v_2 = \sqrt{(2\pi Rn)^2 + 2g(y_0 + y_1)} \\ t_1 = \sqrt{\frac{2y_1}{g} + \frac{(2\pi Rn)^2 + 2gy_0}{g^2}} - \frac{\sqrt{(2\pi Rn)^2 + 2gy_0}}{g} \end{cases} \quad (4)$$

由式 (4) 可知，种子通过直线段的时间与速度主要由排种盘转速 n 及直线段长度 y_1 决定。

第 2 阶段：种子在重力、摩擦力和支持力的作用下沿曲线段做非匀变速曲线运动^[25]。以竖直段和曲线段交点为原点建立平面坐标系，设曲线段曲线方程为

$$y = ax^2 + bx \quad (5)$$

式中 a 为二次项系数， b 为一次项系数。

对种子进行受力分析：

$$\begin{aligned} F_N - mg \cos \theta &= mv_3^2 / \rho \\ \rho &= (1 + y'^2)^{3/2} / y'' \\ f &= \mu F_N \end{aligned} \quad (6)$$

式中 v_3 为种子在曲线段的速度，m/s； ρ 为曲线段的曲率半径，m； μ 为动摩擦系数。

种子在曲线段的运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta - \mu m v_3^2 \cdot \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \quad (7)$$

推导可得种子在曲线段的速度 v_3 为

$$v_3 = \sqrt{e^{2\mu \arctan(2ax+b)} \cdot \int (4agx + 2gb - 2g\mu) e^{2\mu \arctan(2ax+b)} dx + C} \quad (8)$$

式中 C 为任意常数。

种子的滑移距离 s 为

$$s = \int \sqrt{1 + (2ax + b)^2} dx = \frac{1}{4a} (2ax + b) \sqrt{(2ax + b)^2 + 1} + \frac{1}{4a} \ln \left(\sqrt{(2ax + b)^2 + 1} \right) + \frac{1}{2} x + \frac{b}{4a} \quad (9)$$

种子通过曲线段的时间 t_2 为

$$t_2 = \frac{s}{v_3} \quad (10)$$

由式 (10) 可知，种子通过曲线段的速度 v_3 和时间 t_2 主要与曲线方程的 a 和 b 有关，因此当导种管曲线不同时种子通过导种管的时间与离开导种管的速度也不相同。

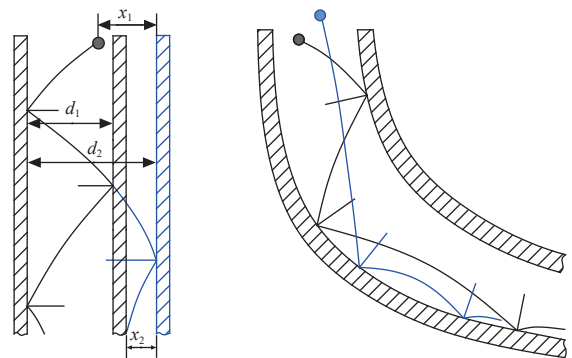
1.3.2 考虑种子与导种管碰撞的运动分析

实际种子进入导种管时具有水平速度并与管壁发生碰撞，由于油菜种子表皮和管壁不光滑，种子与管壁的碰撞不是完全弹性碰撞，碰撞瞬间种子动能损失；碰撞前后的速度关系^[26]为：

$$\begin{cases} v_n = e_n \cdot v_{n0} \\ v_t = e_t \cdot v_{t0} \end{cases} \quad (11)$$

式中 v_n 为碰撞后种子法向速度，m/s； v_t 为碰撞后种子切向速度，m/s； e_n 为法向碰撞恢复系数； e_t 为切向碰撞恢复系数； v_{n0} 为碰撞前种子法向速度，m/s； v_{t0} 为碰撞前种子切向速度，m/s。

相比内径大的导种管，种子通过内径较小的导种管时发生的碰撞次数更多，如图 3a 所示；以种子在竖直段的运动为例，种子通过竖直段的时间 t_1 为式 (12)；由式 (13) 可以知，导种管内径与种子在导种管内的碰撞次数 k 呈反比，当内径增大时，种子与导种管管壁的碰撞次数减少。



a. 种子与不同内径导种管壁的碰撞
a. Collision between seed and different inner diameter of seed tube
b. 种子在曲线段与导种管壁的碰撞
b. Collision between seed and curve segment of seed tube

注： x_1 为种子进入导种管时在水平速度反方向上距离管壁的水平距离，mm； x_2 为种子与导种管最后一次碰撞至种子离开导种管时间内的水平运动距离，mm； d_1 、 d_2 为两导种管内径，mm。
Note: x_1 is the horizontal distance between the seed and seed tube in the opposite direction of the velocity when the seed entering the seed tube, mm; x_2 is the horizontal distance between the seed and seed tube in the direction of the velocity when the seed leaving the seed tube, mm; d_1 、 d_2 is the inner diameter of the two seed tubes, mm.

图 3 种子与导种管壁的碰撞过程分析

Fig.3 Analysis of the collision between seed and seed tube

$$\begin{cases} t_1 = \left(\frac{r-x_1}{v_x} + \frac{r}{v_{x_1}} + \dots + \frac{r}{v_{x_{k-1}}} + \frac{x_2}{v_{x_k}} \right) \cdot \frac{1}{1000} & (12) \\ v_{x_k} = e_n^k \cdot v_x \end{cases}$$

$$t_1 = \left(\frac{r(1-e_n^k)}{v_x(1-e_n)e_n^{k-1}} + \frac{x_2}{e_n^k \cdot v_x} - \frac{x_1}{v_x} \right) \cdot \frac{1}{1000} \quad (13)$$

式中 r 为导种管内径, mm; v_{x_k} 为种子第 k 次碰撞导种管壁后的水平速度, m/s; k 为碰撞次数。

由于种子进入导种管后的运动方向不完全相同, 进而与导种管碰撞的次数不同, 不同种子最终经过导种管曲线段的滑移距离不同, 如图 3b 所示。

根据能量守恒定律有:

$$mgy_2 - \int_0^s f ds = \frac{1}{2}mv_3^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (14)$$

由式 (14) 可知, 种子滑移距离不同则通过曲线段速度 v_3 不同, 最终离开导种管时间也不同。

综上所述, 破坏种子流有序状态的主要原因是种子与导种管管壁的随机碰撞, 而导致碰撞的主要因素为导种管曲线、内径和长度等结构参数。

2 导种过程仿真分析

种子在导种管内的速度波动可以反馈种子与管壁碰撞的剧烈程度, 种子通过导种管的时间变异系数可反馈种子流的离散程度。为明确导种管结构对种子流有序状态的影响, 应用 EDEM 仿真软件开展种子通过不同结构导种管的仿真试验。

2.1 仿真模型与参数

油菜种子是一种球形种子, 表壳干燥无粘附作用, 将种子简化为直径为 2 mm 的球形颗粒, 按正态分布, 标准差为 0.05^[7], 选取 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型作为种子与管壁的接触模型, 导种管材料为 PVC, 长度 80 cm; 种子与导种管特征参数如表 1 所示^[27]。

表 1 油菜种子与导种管仿真参数

项目 Items	参数 Parameters	数值 Values
种子颗粒 Seed particle (SP)	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1060
PVC 管 PVC tube (PVC)	泊松比	0.47
	剪切模量/Pa	2.9×10^9
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1030
种子颗粒-种子颗粒 SP and SP	碰撞恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.50
	动摩擦因数	0.01
种子颗粒-PVC 管 SP and PVC	碰撞恢复系数	0.39
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.01

2.2 试验方法

结合实际导种管在播种机的安装位置将导种管曲线划分为 3 类: S 型 (S-shaped curve, SC)、抛物线型 (parabola-shaped curve, PC)、直线型 (linear-shaped curve, LC)。仿真试验选取 7 条具有明显差异的曲线, 如图 4 所示, 为确保种子流不发生堵塞, 曲线上各点切线与水平方向构成的夹角均大于油菜自然休止角 26.7°^[28]。

当前油菜精量联合直播机采用内径 25 mm、管长

80 cm 左右的导种管。以导种管曲线、内径为试验因素开展仿真试验, 选取油菜播种机常规设计配置的 19、25 和 32 mm 三种 PVC 钢丝软管标准内径。设置颗粒工厂每秒生成 20 粒种子, 总计 50 粒, 种子的水平初速度为 0, 竖直初速度由式 (2) 计算, 排种盘半径为 70 mm、排种盘转速为 25 r/min、型孔距落种口末端距离为 110 mm, 带入式 (2) 得 $v_1=1.48$ m/s。试验获取 50 粒种子通过不同曲线及内径导种管的碰撞次数、时间及速度变化曲线。

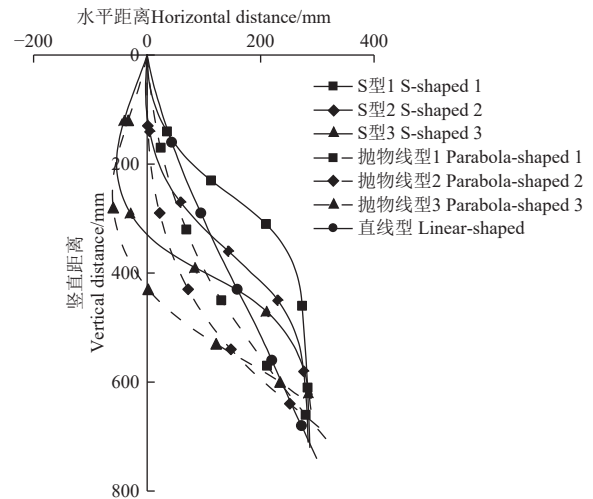


图 4 导种管仿真曲线

Fig.4 Simulation curve of seed tube

2.3 试验结果与分析

试验发现种子流通过导种管时存在由于碰撞导致种子顺序发生置换的现象, 如图 5 所示, 第 1 粒种子先于第 2 粒进入导种管, 但在管内发生 3 次碰撞造成速度损失, 致使第 2 粒种子先于第 1 粒离开导种管。

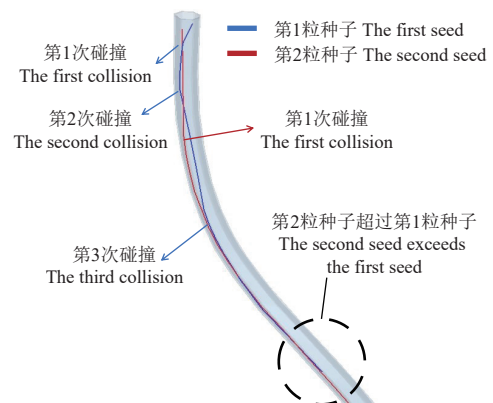
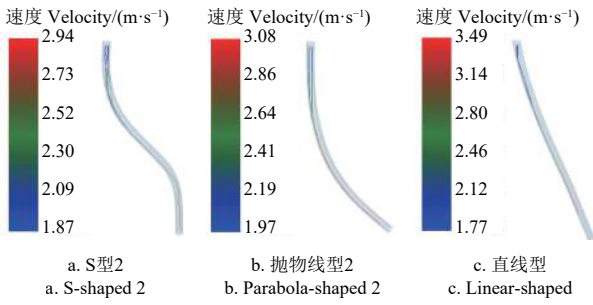


图 5 碰撞导致的种子顺序置换

Fig.5 Seed sequence displacement due to collision

2.3.1 种子流通过不同曲线导种管的仿真结果与分析

在 EDEM 后处理界面, 将种子颗粒显示设置为全步数线型, 种子颗粒的实时速度变化如图 6。从图 6 中可以看出种子在重力作用下速度逐渐提升, 与管壁碰撞后速度瞬间降低, 最终沿管壁或自由落体离开导种管。通过对比发现, 碰撞主要发生在管道折弯处; 抛物线型导种管相比 S 型少一处折弯, 因此前者碰撞次数相比后者少; 种子与直线型导种管碰撞主要发生在首次接触管壁时, 小范围碰撞后沿管壁离开导种管。



注：导种管内径和长度分别为 25 mm、80 cm。
Note: Seed tube inner diameter and length are 25 mm and 80 cm, respectively.

图 6 种子在不同曲线导种管内的速度变化

Fig.6 Seed velocity changes in seed tube with different curves

随机选取 5 粒种子，绘制其经过曲线导种管后的速度变化曲线，如图 7 所示。速度增长最平缓是直线型曲线，波动最大的是 SC3 和 PC3；曲线越接近直线型，种子的速度波动越小，表明种子与管壁的碰撞次数越少。由图 7 还可以看出，种子通过不同曲线导种管的速度波动区间基本包含整个导种运移过程，因此缩短导种管任意段长度，均能减少平均碰撞次数及碰撞次数变异系数，降低碰撞对种子流有序状态的影响。表 2 为 50 粒种子通过各曲线导种管的平均碰撞次数与时间，数据表明各种子通过 LC 的平均碰撞次数最少，为 12.1 次，变异系数最小，为 14.6%。

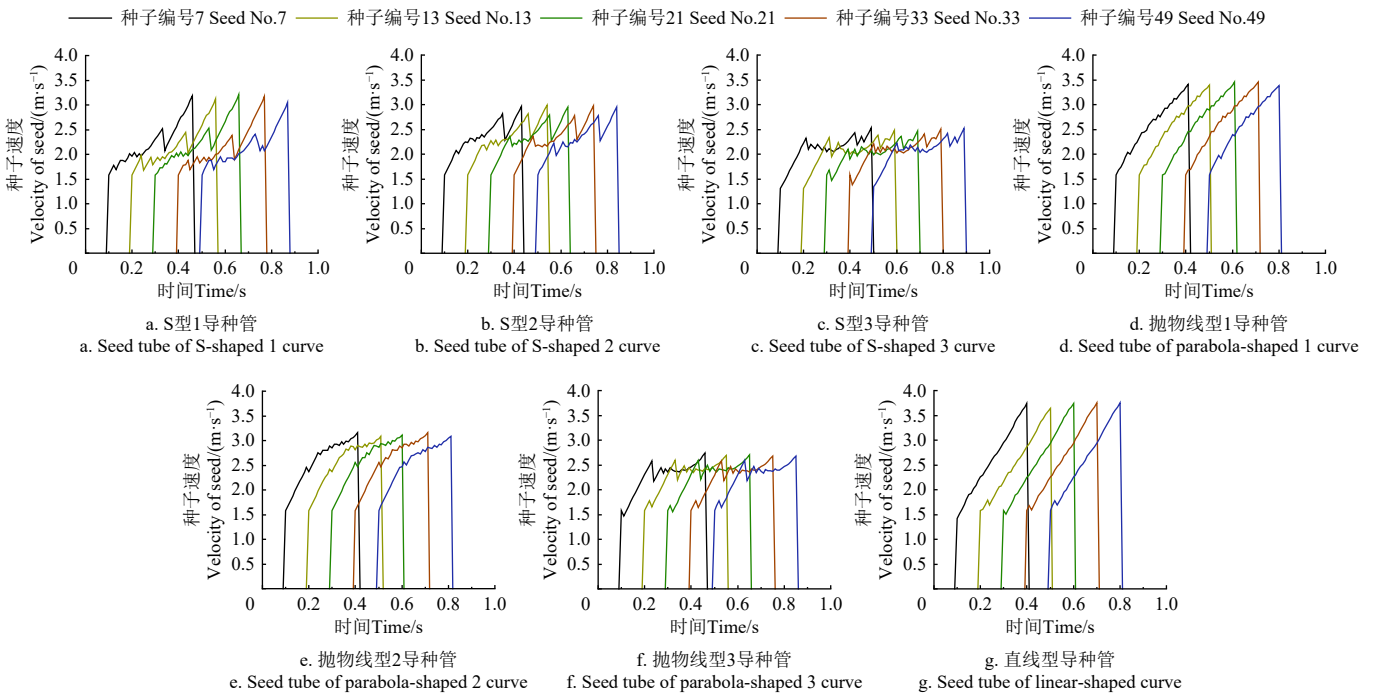


图 7 种子通过不同曲线导种管的速度变化曲线

Fig.7 Velocity curve of seeds through seed tube with different curves

表 2 种子通过不同曲线导种管的平均碰撞次数与时间
Table 2 Mean number of collisions and time of seeds through seed tube with different curves

导种管曲线 Curve of seed tube	平均碰撞次数 Mean number of collisions	碰撞次数变异系数 Coefficient of variation of collision number/%	平均时间 Mean time/s	时间变异系数 Coefficient of variation of time/%
S 型 1 S-shaped 1	16.4	17.7	0.379	3.8
S 型 2 S-shaped 2	14.5	16.2	0.350	1.0
S 型 3 S-shaped 3	17.8	16.1	0.412	2.4
抛物线型 1 Parabola-shaped 1	13.7	14.7	0.318	0.8
抛物线型 2 Parabola-shaped 2	13.2	15.0	0.319	0.9
抛物线型 3 Parabola-shaped 3	15.6	15.6	0.372	1.9
直线型 Linear-shaped	12.1	14.6	0.313	0.7

通过 SC3 的平均碰撞次数最多，为 17.8 次，变异系数为 16.1%；通过 SC1 的平均碰撞次数为 16.4 次，变异

系数最大，为 17.7%；各曲线中种子通过 LC 的平均时间最短，为 0.313 s，变异系数最小，为 0.7%；通过 SC3 的平均时间最长，为 0.412 s，变异系数为 2.4%；通过 SC1 的平均时间为 0.379 s，变异系数最大，为 3.8%。导种管内径与长度相同时，种子通过直线型导种管相比 S 型平均碰撞次数平均减少 4.1 次，碰撞次数变异系数平均降低 2.1 个百分点，平均时间减少 0.067 s，时间变异系数平均降低 1.8 个百分点；相比抛物线型平均碰撞次数平均减少 2.1 次，碰撞次数变异系数平均降低 0.5 个百分点，平均时间减少 0.023 s，时间变异系数平均降低 0.5 个百分点。通过表 2 可知，种子流与导种管的碰撞次数变异系数越大，时间变异系数也越大，即种子流在导种管内的碰撞越随机，种子流的下落轨迹越离散，进而种子流离开导种管的有序状态越差。

2. 3. 2 种子流通过不同内径导种管的仿真结果与分析

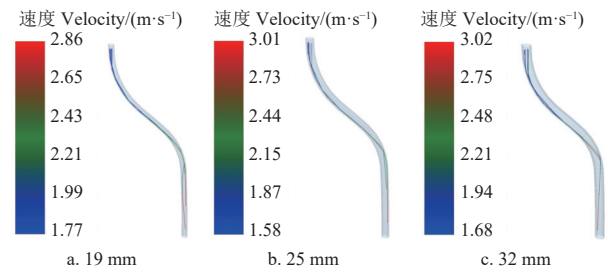
图 8 为种子流通过不同管内径的 S 型 1 导种管时的速度变化图。由图 8 可知，部分种子通过 19 mm 内径导

种管时会出现碰撞一侧管壁后又与另一侧发生碰撞的情况, 导种种子流的下落轨迹逐渐离散; 种子通过大内径导种管时下落轨迹较集中。

随机选取 5 粒种子, 绘制其经过各内径导种管后的速度变化曲线, 如图 9 所示。种子通过导种管折弯处时, 与小内径导种管的碰撞次数明显多于大内径导种管。数据表明, 种子通过 19、25 和 32 mm 内径导种管的平均碰撞次数分别为 22.0、16.4 和 9.4 次, 变异系数分别为 25.3%、17.7% 和 10.5%; 通过导种管的平均时间分别为 0.387、0.379 和 0.366 s, 变异系数分别为 7.9%、3.8% 和 1.2%; 种子通过 32 mm 导种管相比 25 mm 平均碰撞次数减少 7 次, 碰撞次数变异系数降低 7.2 个百分点; 平均时间减少 0.013 s, 时间变异系数降低 2.6 个百分点。

综上, 内径越小, 种子与导种管管壁的碰撞次数变异系数越大, 通过导种管的平均时间变异系数越大, 种

子流的下落轨迹越离散, 进而种子流有序状态越差。通过对比种子流通过不同导种管曲线和不同导种管内径的碰撞次数变异系数和时间变异系数发现, 导种管曲线对种子流有序状态的影响小于内径的影响。



注: 导种管曲线为 S 型 1, 长度为 80 cm。

Note: Seed tube curve is S-shaped 1, and seed tube is length 80 cm.

图 8 种子在不同内径导种管的速度变化

Fig.8 Seed velocity changes in seed tube with different inner diameters

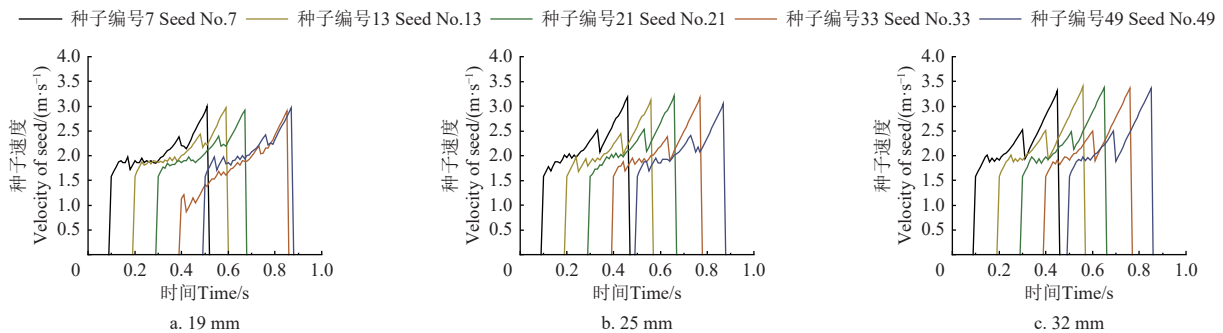


图 9 种子通过不同内径导种管的速度变化曲线

Fig.9 Velocity curve of seeds through seed tubes with different inner diameters

3 台架试验

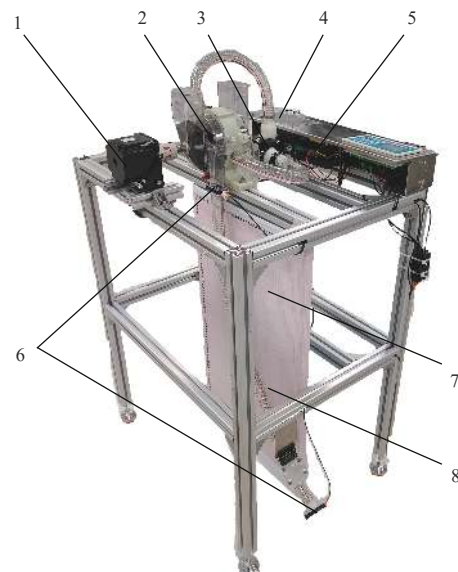
3.1 试验装置

为进一步分析导种管对种子流有序状态的影响, 搭建导种过程研究试验台架, 如图 10, 台架由正负气压组合式精量排种器、导种管、微控制器、排种驱动模块、人机交互模块与落粒检测模块 6 部分组成, 控制系统总体结构框架如图 11。

排种驱动模块由直流调速风机与步进电机组成, 提供排种器工作所需正、负压及转速; 人机交互模块采用串口屏作为触摸屏, 设置排种器工作参数及接收、显示、存储时间数据; 落料检测模块采用 PG-602 光电传感器作为检测元件, 与信号放大器 PG-610 配合工作, 可实现对直径 0.5 mm 以上不透明物体的有效检测, 检测反应时间小于 1 ms^[29]; 采用 STM32F103ZET6 作为微控制器。

首先通过触摸屏设置试验所需排种器转速与负压参数, 通过串口通讯发送至微控制器, 微控制器调节步进电机与直流调速风机至所需工作状态后排种器开始工作, 光电传感器检测种子流通过情况, 并产生脉冲信号经信号放大器处理后发送至微控制器, 微控制器识别脉冲信号并记录当前时间, 同时将时间信息通过串口发送至触摸屏显示及存储。

PVC 钢丝软管内径为 19、25、32 和 38 mm, 试验品种为“华油杂 62”。



1. 步进电机 2. 正负气压组合式精量排种器 3. 直流风机 4. 触摸屏 5. 微控制器 6. 光电传感器 7. 标定板 8. 导种管
1. Stepper motor 2. Positive and negative pressure combination precision seed metering device 3. DC fan 4. Touch screen 5. Microcontroller 6. Photoelectric sensor 7. Calibration plate 8. Seed tube

图 10 导种过程研究试验台架

Fig.10 Test bench for seed guiding process research

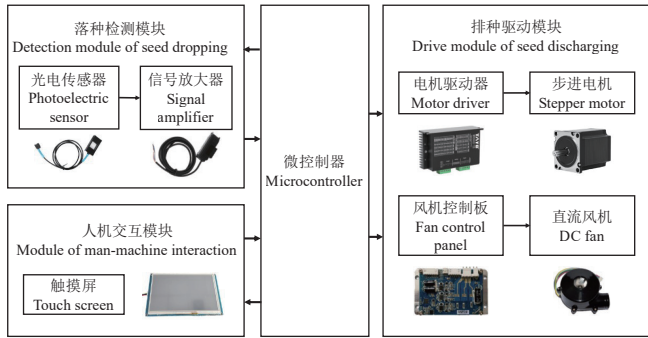


图 11 控制系统总体结构框架

Fig.11 Overall structure of control system

3.2 试验方法

3.2.1 排种试验

为验证排种器单粒排种质量，试验采用置于排种器落种口末端的光电传感器记录种子离开排种器的时间。设定吸种负压为 2 100 Pa，卸种正压为 200 Pa，转速为 25 r/min^[7,24]。由式（15）计算排种器理论排种时间间隔 Δt ^[30]：

$$\Delta t = \frac{60}{nZ} \quad (15)$$

式中 n 为排种盘转速，r/min； Z 为型孔个数，本文 $Z=50$ ，将各参数代入式（15）可得 $\Delta t=0.048$ s。

设油菜标准粒距为 L ，根据《GB/T 6973-2005 单粒（精密）播种机试验方法》，粒距大于 $1.5L$ 的情况视为“漏播”，粒距小于 $0.5L$ 的情况视为“重播”；理想情况下一个标准粒距 L 对应一个排种器理论排种时间间隔 Δt ，因此本文将实际排种时间间隔大于 $1.5\Delta t$ 的情况视为“漏播”，小于 $0.5\Delta t$ 的情况视为“重播”。即当前种子离开排种器的时间与上粒种子离开的时间间隔处于 $0.024\sim 0.072$ s 之间时粒距判定为合格，时间间隔大于 0.072 s 视为“漏播”，时间间隔小于 0.024 s 视为“重播”。

试验以排种合格指数、漏播指数、重播指数为指标，每组试验测试 300 粒种子，重复 3 组。

3.2.2 单因素试验

试验采用排种器落种口末端及导种管出口处的光电传感器检测种子进入导种管与离开导种管的时间，获取种子经过导种管的时间数据。为分析导种管结构对种子流有序状态的影响，对排种器做以下处理：使用胶带封住排种盘的 48 个型孔，仅保留 2 个型孔正常作业，型孔相隔 180° ，目的在于将系统获取的种子进入与离开导种管的时间一一对应，避免种子通过导种管的时间计算错误；默认排种器实际排种时间间隔等于理论排种时间间隔 0.048 s，目的在于忽略由漏播、重播及其他情况造成种子流不均匀，仅分析导种管结构因素对种子流有序状态的影响。由式（16）计算得出单粒种子通过导种管的时间，由式（17）计算相邻两粒种子离开导种管的时间间隔。

$$\Delta t_i = t'_i - t_i \quad (16)$$

$$\Delta T_{i,i-1} = \Delta t_{i,i-1} + (\Delta t_i - \Delta t_{i-1}) \quad (17)$$

式中 t_i 为第 i 粒种子离开排种器的时刻； t'_i 为第 i 粒种子离开导种管的时刻； $\Delta t_{i,i-1}$ 为第 i 粒种子与第 $i-1$ 粒种子离开排种器的时间间隔，s； Δt_i 为第 i 粒种子通过导种管的时间间隔，s； $\Delta T_{i,i-1}$ 为第 i 粒种子与 $i-1$ 粒种子离开导种管的时间间隔，s。

由于种子与导种管壁的碰撞导致种子通过导种管时间存在差异，而种子通过导种管的时间远大于排种器的排种时间间隔，会出现后粒种子在前粒之前离开导种管（ $\Delta T_{i,i-1} < 0$ ）的种子错位现象。计算时间间隔时，需要对错位种子的时间间隔进行以下处理：

$$\begin{cases} \Delta T_{i,i-1} = -\Delta T_{i,i-1} \\ \Delta T_{i-1,i-2} = \Delta T_{i-1,i-2} - \Delta T_{i,i-1} \\ \Delta T_{i+1,i} = \Delta T_{i+1,i} - \Delta T_{i,i-1} \end{cases} \quad (18)$$

最后对 $\Delta T_{i,i-1}$ 与理论排种时间间隔 Δt 对比，判断其为正常播种、漏播或重播。

以导种管曲线、内径、长度为试验因素开展单因素试验，试验记录 100 粒种子通过导种管的时间信息，试验重复 5 次。试验设计具体如下：

1) 导种管曲线：选取具有一定差异的 6 条 S 型曲线（SC4~SC9）、6 条抛物线型曲线（PC4~PC9）与 1 条直线型曲线（LC），如图 12 所示。试验导种管内径 25 mm、长度 80 cm。

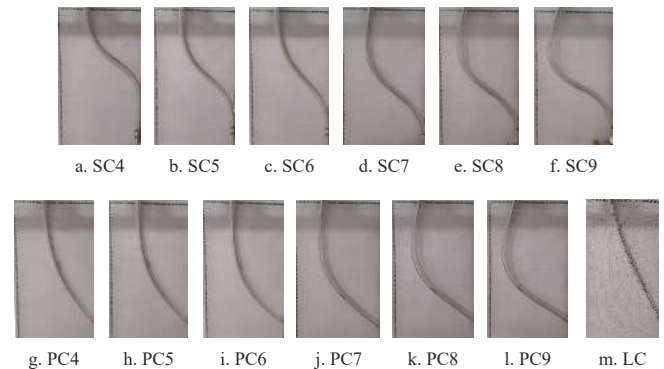


图 12 试验用导种管曲线

Fig.12 Curves of seed tube in test

2) 导种管内径：由于安装位置限制，可用导种管最大内径为 38 mm，选取 38 mm 及 32、25 和 19 mm 内径进行试验；试验导种管长度 80 cm，导种管曲线为直线型。

3) 导种管长度：选取 80、60、40 和 20 cm 四个长度，试验导种管内径 25 mm，导种管曲线为直线型。

3.2.3 多因素试验

种子流有序状态受排种器重播、漏播与导种管结构双重影响，试验考虑排种器漏播与重播情况，将排种盘型孔全部打开，仅使用试验台架置于导种管出口处的光电传感器，进行导种管内径与长度的全因子试验，为保证导种管曲线一致，试验导种管曲线均选择直线型，试验因素水平同单因素试验；试验记录 300 粒种子离开导种管的时间信息，重复 3 次。

4 结果与分析

4.1 排种试验结果与分析

试验结果如表 3 所示。

表 3 排种试验结果

Table 3 Result of seed discharge test

试验组 Test group	平均时间 Mean time/s	排种合格指数 Qualified index of seed discharging/%	漏播指数 Missing index/%	重播指数 Multiple index/%
1	0.048	90.3	6.0	3.7
2	0.048	90.0	5.7	4.3
3	0.047	91.7	5.3	3.0
平均值 Mean value	0.048	90.7	5.7	3.6

由表 3 可知,排种器排种合格指数为 90.7%,漏播指数为 5.7%,重播指数为 3.6%;实际排种时间间隔均在 0.048 s 左右,与理论排种时间间隔相符。

将获取的 3 组数据做散点图,如图 13 所示。由图 13 可以看出,存在时间间隔大于 0.072 s 的情况,说明型孔漏吸 1 或 2 粒种子;时间间隔小于 0.024 s,说明型孔发生重吸现象;多数时间间隔介于 0.024~0.072 s,为合格区间;区间内存在部分时间间隔在 0.050 s 上下较大浮动,造成此现象的原因,一方面,种子尺寸存在差异,在正压作用下吹出型孔的速度不相同,导致落种轨迹发生变化或与落种口发生碰撞,延缓了种子离开排种器的时间;另一方面,种子并未在理论位置下落,造成种子流不均匀。

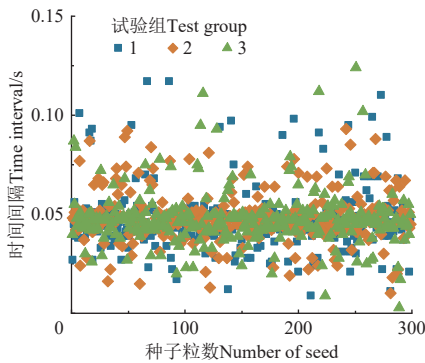


图 13 时间数据分布散点图

Fig.13 Time data distribution scatter plot

4.2 单因素试验结果与分析

4.2.1 导种管曲线对种子流有序状态的影响

不同导种管曲线下的播种质量指标如图 14 所示。从漏播指数与重播指数涨幅可以看出,种子流经过导种管的运移作用后造成的重播现象高于漏播。LC 对播种质量指标的影响最小;越接近 LC 的曲线影响越小,说明曲线折弯越小,种子在导种管内碰撞次数越少;相反,导种管折弯越大,如 SC9,种子流在导种管内碰撞次数越多,对种子流有序状态的破坏越大,试验结果与仿真试验相符。总体来看,直线型导种管最有利于种子流有序状态的保持,相比 S 型粒距合格指数平均提高 3.2 个百分点,漏播指数平均降低 2.0 个百分点,重播指数平均

降低 1.2 个百分点;相比抛物线型粒距合格指数平均提高 2.8 个百分点,漏播指数平均降低 2.0 个百分点,重播指数平均降低 0.8 个百分点。首先应根据安装位置选择合适的导种管曲线,考虑导种管曲线是否会引起种子流滞塞,在安装位置允许的情况下可优先选择直线型曲线。

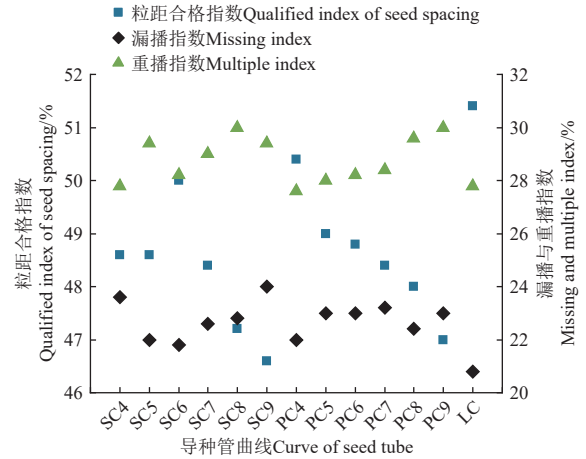


图 14 种子流通过不同曲线导种管后的播种质量指标
Fig.14 Quality index of seeds through seed tube with different curves

4.2.2 导种管内径对种子流有序状态的影响

不同导种管内径下的播种质量指标如图 15 所示,粒距合格指数、漏播指数与重播指数均随内径增大呈线性变化,粒距合格指数呈增长趋势,漏播指数与重播指数呈降低趋势,表明随内径增大播种质量得到提升;相比 25 mm 内径导种管,38 mm 导种管粒距合格指数提高 11.4 个百分点,漏播指数降低 4.6 个百分点,重播指数降低 6.8 个百分点。

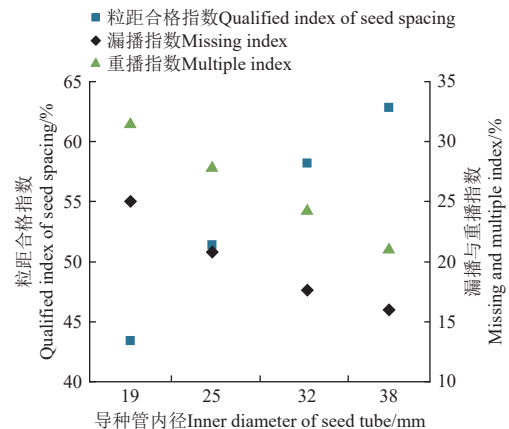


图 15 种子流通过不同内径导种管的播种质量指标
Fig.15 Quality index of seeds through seed tube with different inner diameters

种子流离开不同内径导种管的时间间隔频率分布图如图 16 所示;随内径增大,频率分布逐渐从指数分布转变为以 48 ms 为中心的正态分布,即种子粒距分布随内径增大逐步由指数分布转变为正态分布,表明适当增大导种管内径,能够提升种子流有序状态保持效果,但内径大小应与播种机安装位置关系相匹配。

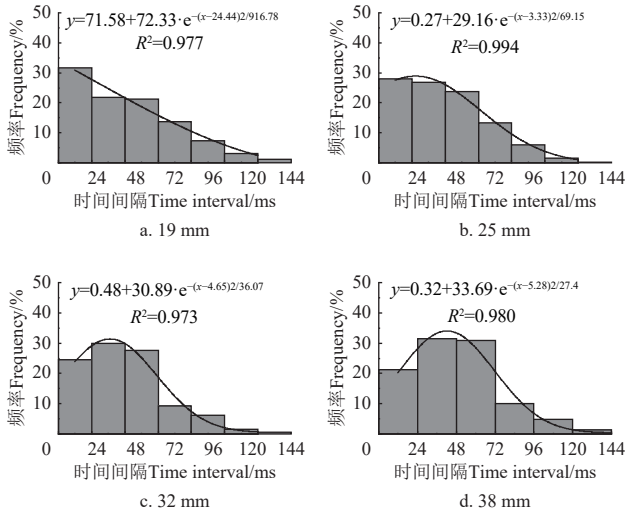


图 16 种子离开不同内径导种管的时间间隔频率分布图
Fig.16 Time interval frequency distribution of seeds leaving seed tube with different inner diameters

4.2.3 导种管长度对种子流有序状态的影响

不同导种管长度下的播种质量指标曲线如图 17 所示，3 个播种质量指标均与导种管长度呈线性关系，当导种管长度增加时，粒距合格指数呈降低趋势，漏播指数与重播指数呈上升趋势；随导种管长度从 20 cm 增加到 80 cm，粒距合格指数从 79.0% 降至 51.4%，降低 27.6 个百分点；降低 27.6 个百分点漏播指数从 10.2% 升至 20.8%，增加了 10.6 个百分点；重播指数从 10.8% 升至 27.8%，增加了 17.0 个百分点；从漏播指数与重播指数的涨幅可知，随长度增加种子与导种管碰撞加剧引发的重播现象多于漏播现象。

种子流离开不同长度导种管的时间间隔频率分布图如图 18 所示；随长度增加，频率分布逐渐分散，重播与漏播现象逐渐增加，长度增至 80 cm 时接近指数分布，表明导种管过长不利于种子流有序状态的保持；因此在不发生干涉情况下排种器应安装在距地面较近位置，以减少导种管长度，提升播种质量。

通过对比种子流通过不同曲线、内径、长度导种管后的播种质量指标发现，导种管曲线对种子流有序状态的影响低于内径与长度，这主要是由于油菜种子流动性强造成的。

4.3 多因素试验结果与分析

统计各因素组合下播种质量指标，利用 Origin 2022

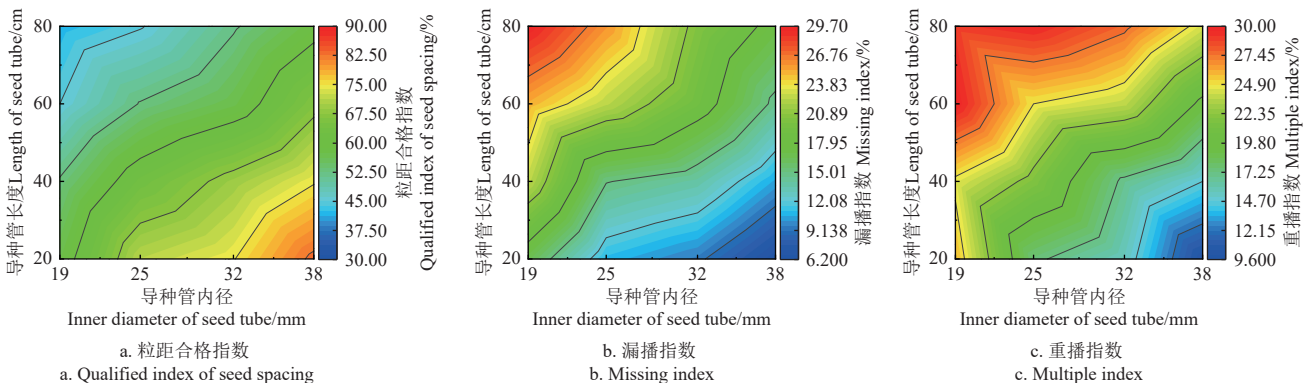


图 19 不同导种管结构参数的播种质量指标变化趋势
Fig.19 Variation trend of quality index of seed tube with different structural parameters

绘制播种质量指标随导种管内径和长度的等高线图，如图 19 所示。当导种管长度固定时，随导种管内径增大，粒距合格指数上升，漏播与重播指数下降；当导种管内径相同时，随导种管长度增大，粒距合格指数下降，漏播与重播指数上升；当内径为 38 mm、长度为 20 cm 时达到试验最佳效果，粒距合格指数为 82.7%，漏播指数为 7.2%，重播指数为 10.1%。

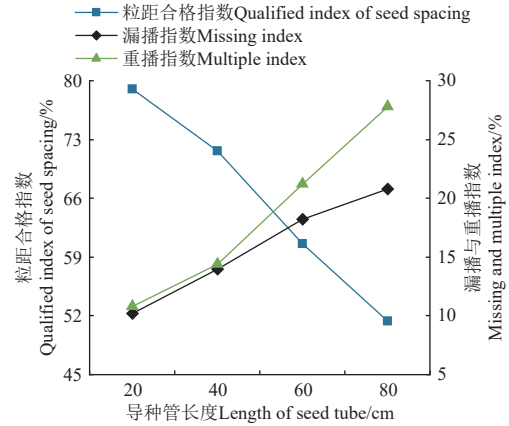


图 17 种子流通过不同长度导种管的播种质量指标
Fig.17 Quality index of seeds through seed tube with different lengths

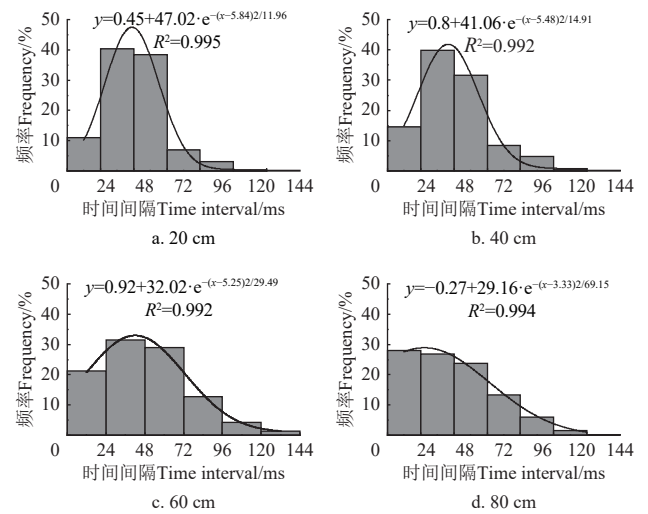


图 18 种子通过不同长度导种管的时间间隔频率分布图
Fig.18 Time interval frequency distribution of seeds leaving seed tube with different lengths

根据《NYT 503-2015 单粒（精密）播种机作业质量》，目标粒距在 10 cm 以下的种子要求其粒距合格指数不低于 60.0%，重播指数不超过 30.0%，漏播指数不超过 25.0%。为满足以上要求，油菜精量联合直播机其内径应不小于 25 mm、长度不大于 40 cm；然而实际田间播种还存在种子触土弹跳、机具振动等情况影响^[31-33]，

因此对导种管的要求会更严格。

由表 4 可知，导种管内径、导种管长度均对粒距合格指数、漏播指数、重播指数影响极显著；导种管内径和导种管长度的交互作用对粒距合格指数与漏播指数影响显著。结合等高线图可知，增大导种管内径、缩短导种管长度，有利于提升播种质量。

表 4 试验结果方差分析

Table 4 Analysis of variance of test results

方差来源 Sources	粒距合格指数 Qualified index of seed spacing				漏播指数 Missing index				重播指数 Multiple index			
	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	F	P
模型 Model	6 285.26	15	133.26	<0.000 1	1 494.95	15	58.11	<0.000 1	1 705.42	15	48.86	<0.000 1
z_1	2 937.16	3	311.38	<0.000 1	629.97	3	122.43	<0.000 1	870.71	3	124.74	<0.000 1
z_2	3 266.27	3	346.27	<0.000 1	817.60	3	158.89	<0.000 1	819.67	3	117.43	<0.000 1
$z_1 \times z_2$	81.83	9	2.89	0.013	47.38	9	3.07	0.009	15.03	9	0.72	0.689
误差 Error	100.61	32			54.89	32			74.45	32		
总计 Total	6 385.87	47			1 549.84	47			1 779.88	47		

注： z_1 为导种管内径， z_2 为导种管长度， $0.01 \leq P < 0.05$ 为显著， $P < 0.01$ 为极显著。

Note: z_1 is the inner diameter of seed tube, mm; z_2 is the length of seed tube, cm; $0.01 \leq P < 0.05$ means significant; $P < 0.01$ means extremely significant.

5 结 论

1) 排种器卸种过程和导种过程理论分析结果表明，导种管曲线、内径及长度等是影响种子流在导种环节有序状态的主要因素。导种过程离散元仿真试验发现，导种管内径和长度相同时，种子通过直线型导种管比 S 型导种管的碰撞次数变异系数平均降低 2.1 个百分点，时间变异系数平均降低 1.8 个百分点；比抛物线型导种管碰撞次数变异系数平均降低 0.5 个百分点，时间变异系数平均降低 0.5 个百分点。导种管曲线和长度相同时，种子通过内径 32 mm 的导种管比 25 mm 导种管碰撞次数变异系数降低 7.2 个百分点，时间变异系数降低 2.6 个百分点。种子与导种管的碰撞次数变异系数越大，时间变异系数越大，下落轨迹越离散，种子流有序状态越差；导种管曲线对种子流有序状态的影响小于内径的影响。

2) 以导种管曲线、内径、长度为因素开展单因素试验，发现直线型导种管比 S 型导种管粒距合格指数平均提高 3.2 个百分点，漏播指数和重播指数平均降低 2.0 和 1.2 个百分点；比抛物线型导种管粒距合格指数平均提高 2.8 个百分点，漏播指数和重播指数平均降低 2.0 和 0.8 个百分点。相较于 25 mm，38 mm 内径导种管粒距合格指数提高 11.4 个百分点，漏播指数和重播指数分别降低 4.6 和 6.8 个百分点；相较于 80 cm，20 cm 长度导种管粒距合格指数提高 27.6 个百分点，漏播指数和重播指数分别降低 10.6 和 17.0 个百分点。导种管曲线对种子流有序状态的影响小于内径与长度。导种管内径缩小或长度增加时，种子离开导种管的时间间隔频率分布逐渐从间隔相对均匀的正态分布逐渐转变为重播指数增大的指数分布。

3) 以导种管内径、长度为因素开展多因素试验，结果表明，内径为 38 mm、长度为 20 cm 时试验效果最佳，粒距合格指数为 82.7%，漏播指数为 7.2%，重播指数为

10.1%；建议实际采用导种管内径应不小于 25 mm、长度不大于 40 cm。

考虑到机具田间播种均匀性受机具振动、种子土壤碰撞、覆土扰动、机组前进速度等不可控因素的影响，本文仅在静态条件下定量研究了导种管结构对种子流有序状态影响，后续将结合田间作业场景进一步研究复杂动态环境下油菜等小粒径种子平稳运移技术，以提升油菜精量播种的种子分布均匀性。

[参 考 文 献]

- [1] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 613-617.
WANG Hanzhong. New-demand oriented oil seed rape industry developing strategy[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 613-617. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张哲, 殷艳, 刘芳, 等. 我国油菜多功能开发利用现状及发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 618-623.
ZHANG Zhe, YIN Yan, LIU Fang, et al. Current situation and development countermeasures of Chinese rapeseed multifunctional development and utilization[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 618-623. (in Chinese with English abstract)
- [3] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李福建, 徐东忆, 吴鹏, 等. 机械耕作和播种方式对稻茬小麦光合生产和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021,

- 37(5): 41-49.
- LI Fujian, XU Dongyi, WU Peng, et al. Effects of mechanical tillage and sowing methods on photosynthetic production and yield of wheat in rice stubble[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(5): 41-49. (in Chinese with English abstract)
- [5] CHEN T, ZHU Y, DONG R, et al. Belt uniform sowing pattern boosts yield of different winter wheat cultivars in Southwest China[J]. *Agriculture (Basel)*, 2021, 11(11): 1077.
- [6] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(24): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- [7] 高丽萍, 施彬彬, 廖庆喜, 等. 正负气压组合油菜精量排种器锥孔盘排种性能[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 22-33.
- GAO Liping, SHI Binbin, LIAO Qingxi, et al. Seeding performance of conical-hole seeding plate of the positive and negative pressure combination precision seed metering device for rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(6): 22-33. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨松, 廖庆喜, 陈立, 等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机播种油菜的田间植株分布规律[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 23-28.
- YANG Song, LIAO Qingxi, CHEN Li, et al. Distribution of rapeseed sowed by 2BFQ-6 precision planter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(11): 23-28. (in Chinese with English abstract)
- [9] 苑严伟, 白慧娟, 方宪法, 等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 1-18.
- YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [10] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 1-14.
- LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [11] TANG H, XU F D, XU C S, et al. The influence of a seed drop tube of the inside-filling air-blowing precision seed-metering device on seeding quality[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 204: 107555.
- [12] 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 8-15.
- CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(22): 8-15. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张顺, 李勇, 王浩宇, 等. 水稻内充气力式精量穴播排种器导种管的设计与试验[J]. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2021, 47(1): 71-80.
- ZHANG Shun, LI Yong, WANG Haoyu, et al. Design and experiment on the seed spout of inside-filling pneumatic type precision hole-seeding meter device for rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2021, 47(1): 71-80. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨文彩, 张效伟, 仲广远, 等. 三七育苗播种机导种管设计与试验[J]. *华南农业大学学报*, 2022, 43(1): 120-132.
- YANG Wencai, ZHANG Xiaowei, ZHONG Guangyuan, et al. Design and experiment of seed tube of seedling planter for Panax notoginseng[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2022, 43(1): 120-132. (in Chinese with English abstract)
- [15] YAZGI A. Effect of seed tubes on corn planter performance[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2016, 32(6): 783-790.
- [16] 丁钟凯. 2BZJ-10 型播种机设计及导种管结构参数研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- DING Zhongkai. The Study on the Design of the 2BZJ-10 Seeder and the Structural Parameter of the Grain Conductor[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘立晶, 杨慧. 基于 Geomagic Design 软件的导种管三维逆向工程设计[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 40-45.
- LIU Lijing, YANG Hui. 3D reverse engineering design on seed tube based on Geomagic Design software[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(11): 40-45. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵淑红, 陈君执, 王加一, 等. 精量播种机 V 型凹槽拨轮式导种部件设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(6): 146-158.
- ZHAO Suhong, CHEN Junzhi, WANG Jiayi, et al. Design and experiment on V-groove dialing round type guiding-seed device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6): 146-158. (in Chinese with English abstract)

- [19] 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 the combined seed guiding tube for precision metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(24): 14-24. (in Chinese with English abstract)
- [20] KOCHER M F. Corn seed spacing uniformity as affected by seed tube condition[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2011, 27(2): 177-183.
- [21] YAZGI A, DEMIR V, DEĞIRMENCIOĞLU A. Comparison of computational fluid dynamics-based simulations and visualized seed trajectories in different seed tubes[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2020, 44(6): 599-611.
- [22] CARPES D P, ALONÇO A d S, ROSSATO F P, et al. Effect of different conductor tubes on the longitudinal distribution of corn seeds[J]. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, 2017, 21(9): 657-662.
- [23] 雷小龙, 廖宜涛, 丛锦玲, 等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(12): 16-26.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(12): 16-26. (in Chinese with English abstract)
- [24] 余佳佳, 丁幼春, 廖宜涛, 等. 基于高速摄像的气力式油菜精量排种器投种轨迹分析[J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33(3): 103-108.
YU Jiajia, DING Youchun, LIAO Yitao, et al. High-speed photography analysis of dropping trajectory on pneumatic metering device for rapeseed[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, 33(3): 103-108. (in Chinese with English abstract)
- [25] 鞠锡庆. John Deere 7000 型精密播种机的导种管分析[J]. *农业机械学报*, 1981, 12(2): 78-82.
JU Xiqing. Analysis of seed spouts of John Deere 7000 precision seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1981, 12(2): 78-82. (in Chinese with English abstract)
- [26] 黄福有, 张路青, 周剑, 等. 基于摩擦与变形耗能的滚石切向恢复系数影响因素[J]. *地球科学*, 4583, 47(12): 4583-4595.
HUANG Fuyou, ZHANG Luqing, ZHOU Jian, et al. Influence factors of tangential restitution coefficient of rolling stone based on friction and deformation energy dissipation[J]. *Earth Science*, 4583, 47(12): 4583-4595. (in Chinese with English abstract)
- [27] LEI X L, HU H J, WU W C, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 203: 22-33.
- [28] 姚露. 油菜旋转盘式精量集排器设计及其工作机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
YAO Lu. Design and Working Mechanism of Spinning Disc Precision Centralized Metering Device for Rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [29] 朱龙图, 廖庆喜, 刘海, 等. 油菜机械离心式集排器排种量控制系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(10): 19-29.
ZHU Longtu, LIAO Qingxi, LIU Hai, et al. Design and test of the seeding amount control system for the rape mechanical metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(10): 19-29. (in Chinese with English abstract)
- [30] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜. 基于时变窗口的油菜精量排种器漏播实时检测方法[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(24): 11-21.
DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(24): 11-21. (in Chinese with English abstract)
- [31] 周龙. 基于离散元法的玉米种子建模及播种过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
ZHOU Long. DEM-based Modelling of Maize Seeds and the Simulation Analysis and Experimental Study of the Seed-Sowing[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [32] 闫东旭. 大豆种子颗粒建模及投种、覆土镇压过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
YAN Dongxu. Particle Modelling of Soybean Seeds and the Simulation Analysis and Experimental Study of the Seed-Throwing and Pressing[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [33] 颜丙新, 武广伟, 付卫强, 等. 基于 EDEM 的玉米精播高位投种着床位置影响因素研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 47-54.
YAN Bingxin, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Influencing factors of corn implantation distribution for high-height planting based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S2): 47-54. (in Chinese with English abstract)

Ordering of seed flow in seed guiding of precision sowing for rapeseed

LIAO Yitao^{1,2}, SUN Mai¹, LIAO Qingxi^{1,2}, WANG Chuanqi¹, ZHENG Juan¹, WU Anyang¹

(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: A seed metering device is often equipped with a combination of positive and negative pressure in the planter for rapeseed. The chaotic seeds can be discharged via negative pressure suction seed and positive pressure blowing seed in a uniform and orderly manner. However, the orderly state of seed flow is easy to be broken in the process of seed guiding, resulting in unsuitable seed spacing. It is very necessary to clarify the seed guiding process for the higher seeding quality. This study aims to theoretically analyze the influence of structural seed tubes on the orderly state of seed flow. It was found that the main reason for the damage to the orderly state of seed flow was the random collision between seeds and seed tubes in the seed guiding. The influencing factors on the collision were the curve, inner diameter, and length of the seed tube. A simulation test was then carried out on the movement of seeds in the seed tube. Once the more linear curve of the seed tube was, and the thicker inner diameter was, the smaller number of collisions was, and the shorter time of passing through the seed tube was. Specifically, the coefficient of variation was reduced by 2.1 percentage points for the collision number of seeds through the seed tube with the linear-shaped curve in the same inner diameter and length, compared with the S-shaped curve. The coefficient of variation of time was reduced by 1.8 percentage points on average. Compared with the parabola-shaped curve, the coefficient of variation of collision number was reduced by 0.5 percentage points on average, and the coefficient of variation of time was reduced by 0.5 percentage points on average. The coefficient of variation of collision number of seeds was reduced by 7.2 percentage points through 32 mm seed tube in the same curve and length, compared with 25 mm, and the coefficient of variation of time was reduced by 2.6 percentage points. The simulation test showed that the larger the coefficient of variation of the collision times of seed flow through a seed tube was, the larger the coefficient of variation of time was, the more discrete the seed flow trajectory was, and the worse the orderly state of seed flow was. Therefore, there was less influence on the orderly state of seed flow in the curve of the seed tube, compared with the inner diameter and length. The bench test was consistent with the simulation. Compared with the S-shaped curve, the qualified index of seed spacing of the linear-shaped curve increased by 3.2 percentage points on average, the missing index and the multiple index decreased by 2.0 and 1.2 percentage points, respectively. Compared with the parabola-shaped curve, the qualified index of seed spacing of the linear-shaped curve increased by 2.8 percentage points, the missing index and the multiple index decreased by 2.0 and 0.8 percentage points, respectively. Compared with 25 mm, the qualified index of seed spacing of 38 mm seed tube increased by 11.4 percentage points, the missing index and the multiple index decreased by 4.6 and 6.8 percentage points, respectively. Compared with 80 cm, the qualified index of seed spacing of 20 cm seed tube increased by 27.6 percentage points, the missing index and the multiple index decreased by 10.6 and 17.0 percentage points, respectively. In addition, the frequency distribution of the time interval gradually changed from normal distribution with relatively uniform interval to exponential distribution with the increase of the multiple index, when the inner diameter decreased or the length increased. The optimal seed guiding was achieved, where the inner diameter of the seed tube should not be less than 25 mm, whereas, the length should not be more than 40 cm. This finding can provide a strong reference for the subsequent development and optimization design of seed tubes.

Keywords: experiments; rapeseed; seed tube; sowing uniformity; seed guiding process