doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.009

机械式小麦射播排种器设计与试验

王英博[1,2]　李洪文[1,2]　王庆杰[1,2]　何　进[1,2]　卢彩云[1,2]　刘凯华[1,2]
(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.农业农村部河北北部耕地保育农业科学观测试验站,北京 100083)

摘要:针对现阶段小麦播种机接触式播种形式存在的覆土后种子深度均匀性差,播种效果易受播种部件影响的问题,同时为简化播种工艺,设计了一种适用于华北地区壤土的非接触式小麦机械射播排种器。阐述了对排种器整体结构和射播工作原理,对排种器关键部件尺寸进行设计,分析了小麦种子在排种器内部携种加速过程及投种过程,得出影响小麦射播效果的因素,并进行仿真与试验台试验。选取排种器转速、前进速度、射播高度为试验因素,播种深度变异系数、排种量变异系数、射播速度、射播深度为指标进行单因素试验与正交试验,并进行了验证试验。试验结果表明,机具前进速度为 1.0 m/s,排种器转速为 1 100 r/min,射播高度为 100 mm 时,播种深度变异系数为 8.3%,排种量变异系数为 13.9%,射播速度为 35.2 m/s,射播深度为 34 mm。试验验证了所设计的机械式射播排种器在华北平原地区壤土作业时,满足小麦播种的作业要求。

关键词:排种器;小麦;射播;排种量变异系数;播种深度变异系数
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)S1-0073-12

Design and Experiment of Wheat Mechanical Shooting Seed-metering Device

WANG Yingbo[1,2]　LI Hongwen[1,2]　WANG Qingjie[1,2]　HE Jin[1,2]　LU Caiyun[1,2]　LIU Kaihua[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Cultivated Land Conservation Agricultural Science Observation and Experiment Station of Northern Hebei Province*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of poor uniformity of depth for wheat cover by soil in the contact seeding form of wheat seeder in China North plain, planting effects were easily affected by some parts of planter, a non-contact mechanical shooting seed-metering device for wheat was developed. Moreover, planting process and structure of planter were also simplified. The key components of the planter was designed, moreover, overall structure and working principle of planter were explained. The shooting performance was influenced by seed distributor and seeding control cage. The process of carrying and accelerating process of planter were analyzed. The rotation speed of seed-metering device, the forward speed, and the shooting height were selected as test factors through theoretical analysis, and the stability of the shooting depth, shooting velocity, average shooting depth and the coefficient of variation of the seed amount were selected as indicators for simulation test and bench test. Moreover, a verification test was conducted in Conservation Tillage Research Center of China Agricultural University, in 2019. The primary and secondary order of influencing factors for each test index were obtained. For the stability of the shooting depth, the significance order was rotation speed of seed-metering device, forward speed, and the shooting height; for the coefficient of variation of the seed amount, the order was forward speed, rotation speed of seed-metering device and shooting height, respectively; for the shooting velocity, the order was forward speed, rotation speed of seed-metering device and shooting height; and for the average shooting depth, the order was forward speed, shooting height and forward speed, rotation speed of seed-metering device and shooting height. In specific, shooting height was a non-significance factor for shooting velocity. The test results showed that when forward speed, rotation speed and shooting height were 1.0 m/s, 1 100 r/min and 100 mm, respectively, the stability of the shooting depth, seeding

收稿日期:2020-08-06　修回日期:2020-09-16
基金项目:现代农业产业技术体系建设项目(CARS03)
作者简介:王英博(1994—),男,博士生,主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究,E-mail:wangyingbocau@163.com
通信作者:李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究,E-mail:lhwen@cau.edu.cn

amount variation coefficient, shooting velocity of wheat seed and average shooting depth was 8.3%, 13.9%, 35.2 m/s and 34 mm, respectively. The experiment verified that the designed mechanical shooting seed-metering device could meet the agronomic requirements of wheat sowing in China North plain. This research provided a method for the design of wheat planter.

Key words: seed-metering device; wheat; shooting seed; variation coefficient of seeding amount; variation coefficient of shooting depth

0 引言

小麦是我国重要的粮食作物之一,其种植区域分布广泛,产量位居粮食作物的第 2 位。在小麦的生长过程中,除小麦品种外,播种机播种效果对小麦的生长和产量均有着至关重要的影响[1-3]。

国外的小麦播种机发展较快,主要采用气力式排种器,如德国雷肯 Solitair 9 系列气力式精量播种机,其作业效率较高,但机型较大,结构较为复杂,作业成本较高;而少部分小麦条播机采用窝眼轮式排种器,作业时调节较为方便,但作业时容易出现漏播的现象,机具较大,同样不适用于我国华北地区小地块播种作业[4-5];国内小麦播种机多数采用机械式排种器,其中常用的类型为槽轮式排种器,其结构简单,作业成本较低,但播种均匀性、稳定性相较于气力式排种器较差[6-8];部分排种器也采用了气吸型孔形式,由于小麦粒径较小,容易发生堵塞。而现阶段,上述国内外小麦播种机均采用排种器与开沟器配合的接触式播种形式,开沟器开沟后,在重力的作用下种子从排种器落种口落入沟内,播种机后部采用覆土镇压的形式;作业后会将播种带土壤向内挤压,导致土壤覆土深度均匀性较差,影响种子入土后的位置,从而影响小麦的出苗、生长;此外,种子在下落过程中易与输种管、开沟器接触,改变种子运动位置,从而影响播种效果[9-11],同时种子落入种沟内的位置也受到开沟效果的影响。

相关学者研究了非接触式的播种形式,通过高速气流对小麦种子进行加速,满足播种作业要求,只是现阶段还未有应用成熟的非接触式气力排种器[12-13]。

为简化播种机结构及播种工艺,取消开沟器、覆土器等部件,本文提出一种机械式射播的非接触式播种方法,以改变传统接触式小麦条播作业模式。并根据华北平原地区,壤土作业宽幅条播小麦的播种农艺要求,设计一种机械式小麦射播排种器,通过对排种器分种轮、定向送种轮等关键部件及其参数进行设计,对小麦在排种器内部携种加速过程及排种过程进行运动学分析,进而得出影响小麦播种效果的因素,通过仿真试验与试验台试验确定排种器作业的较优参数,并对其进行验证试验。

1 整体结构与工作原理

排种器整体结构如图 1 所示,由种箱、输种管、排种器壳体、分种轮、定向送种轮、叶片、投种口、转轴所组成。投种口距离底面高度为 100 mm,可以减少其他环境因素对投种作业的影响,动力由链轮传递,通过转轴带动分种轮与叶片进行高速转动。种子通过输种管落入分种轮内,在重力的作用下进入分种轮的凹槽内,并随分种轮进行转动。当分种轮运转到定向送种轮开口部分时,种子在离心力的作用下被甩入排种器的内部腔体,随着高速转动的叶片加速运动。叶片共 8 个,均布在定向送种轮外侧,各个叶片连续不间断同时又均匀的加速种子,最后通过投种口高速射入田间。排种器叶片的转速可通过动力输入进行调节,以适应不同的作业速度,进行宽幅条播,排种器作业时小麦最大播量为 200 kg/hm^2。

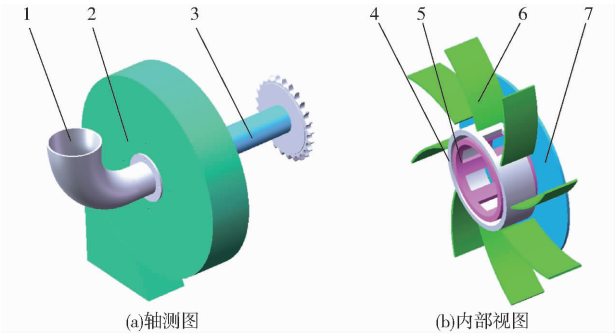


图 1 排种器结构图

Fig. 1 Structure of seed-metering device

1. 输种管 2. 排种器壳体 3. 转轴 4. 定向送种轮 5. 分种轮 6. 叶片 7. 转盘

2 关键部件设计

2.1 射种仿真试验

采用仿真形式,分析射播作业的条件与可行性,为后续排种器结构参数的设计提供支撑。在中国农业大学涿州试验区选取旋耕后土壤表层 0 ~ 100 mm 土壤进行物理参数的测量标定,土壤含水率为 17.6%,土壤紧实度为 30.2 kPa,属于典型的壤土土壤;选取小麦品种农大 215 进行小麦种子的物料参数测量,并采用 EDEM 进行土壤颗粒模型及种子模型的建立;设置射种仿真过程土壤与种子间的静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数分别为:0.4、0.4、

0.1；种子间的静摩擦因数、滚动摩擦因数与恢复系数分别为 0.6、0.5、0.2；土壤间的静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数分别为 0.4、0.35、0.2，仿真土层高度为 100 mm。根据非接触式小麦播种技术的相关参考，结合前期预试验的研究，以射种高度、射种角及射种速度为试验因素[12-14]，由于空气阻力，种子射种高度不宜过高，因此结合前期研究与文献[12]，初步选取射种高度为 50、100、150、200 mm；射种角为 45°、60°、75°、90°；射播速度选择 15、20、25、30、35、40 m/s，进行射播效果的前期仿真试验。根据华北地区冬小麦播种的农艺要求，作业时播深一般不低于 30 mm，仿真过程结束后测量不同因素参数条件下种子射入土层的深度，并对结果进行整理分析，以得出射播深度与各个因素间的相关性关系，图 2 为射种高度为 200 mm 时的试验过程，单因素仿真试验结果如图 3 所示。

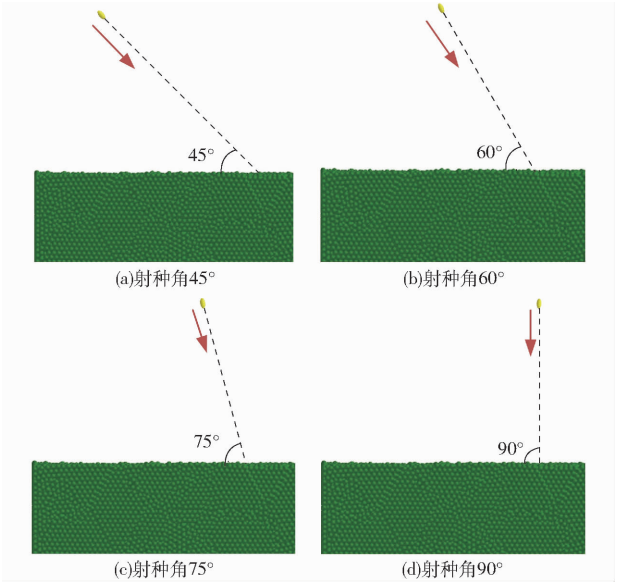


图 2　单因素仿真试验(射种高度 200 mm)

Fig. 2　Simulation experiment for one factor experiment

根据播种深度的农艺要求，通过对上述仿真结果分析可知，在射播速度、射种角相同的情况下，射种高度越小，射种深度越深。且射种速度、射种角均与射种深度呈正相关关系，在各个射播角条件下，射种高度为 50 mm 时，射播速度大于 20 m/s 均能满足作业要求。在射种高度为 100 mm 时，射播速度需大于 25 m/s；在射种高度为 150 mm 时，射播速度同样需大于 25 m/s；在射种高度为 200 mm 时，射播速度需大于 30 m/s。在不同射种角条件下，射种角为 90° 时的播种深度效果最好；而在射种高度为 50 mm，射播速度大于 40 m/s 时，播种深度超过 50 mm。考虑到排种器在田间作业的复杂情况，初步选取种子射播速度应不低于 30 m/s，射播高度不高于 150 mm；随着射种角的增加，达到同样射播深度所需射播速度逐渐降低；在射种角为 90°时，相同射种速度与高度条件下，其射播深度最大，因此，在作业时初步选取射种角范围为 60°～90°。

2.2　分种轮、定向送种轮设计

种子从种箱中落入分种轮内，在重力和离心力的作用下，种子落入分种轮上开设的凹槽。因此，分种轮的转速与开口尺寸和播种量有密切关系。其结构如图 4 所示，参考排种器的整体尺寸与小麦播种幅宽要求，为配合定向送种轮，分种轮直径设计为 155 mm，宽度为 80 mm；为使排种时能形成稳定的种子流，保证充种效果及排种量的稳定性，在分种轮的周径设有等间距的 8 个开口，相邻 2 个开口的相位角为 45°。根据小麦播种农艺要求[15-16]，每个开口的长度设计为 30 mm、宽度为 50 mm，为减小种子在分种轮凹槽内的磨损，提高充种效率，对分种轮内径开口位置进行内倒角处理。为保证分种轮内的小麦

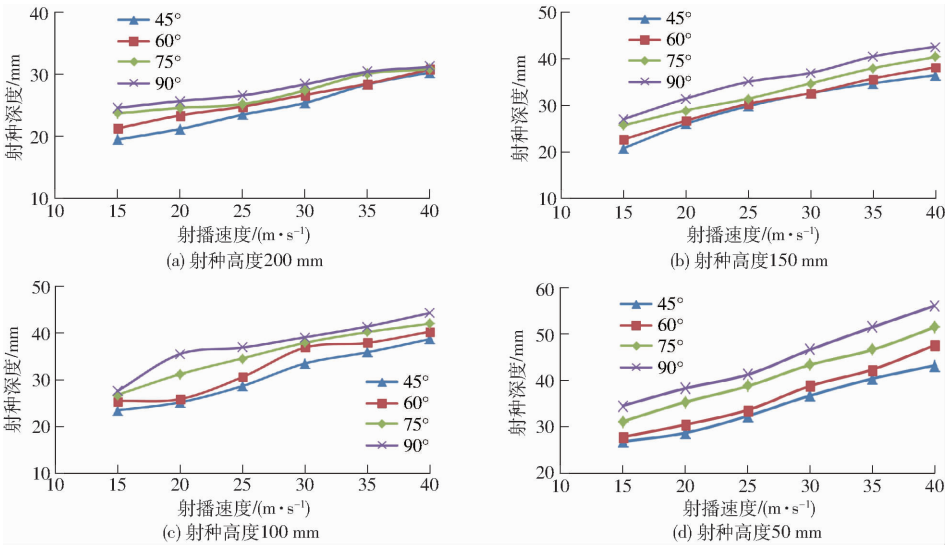


图 3　单因素仿真试验结果

Fig. 3　Simulation results for one factor experiment

种子的充种效果,顺利加速至叶片区域,需使开口部分的体积稍大于分种轮内部圆柱体积,充分充种,因此确定分种轮内径为 135 mm。

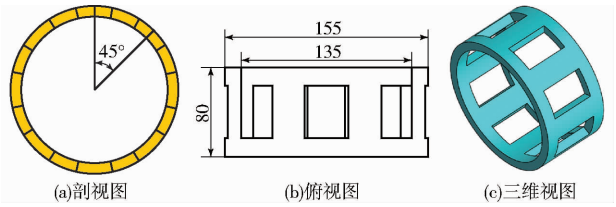


图 4 分种轮结构图

Fig. 4 Structure of seed distributor

定向送种轮结构如图 5 所示,定向送种轮与排种器的壳体固定连接,在其周径开设有 1 个尺寸与分种轮凹槽宽度一致的开口,开口角为 30°,可使分种轮凹槽内的小麦种子在离心力的作用下加速,种子速度较高时,可通过开口进入排种器的腔体内部,达到清种目的。为避免与分种轮发生干涉,定向送种轮内径为 160 mm,内表面采用镀锌处理,尽量避免损伤小麦种子。为尽量减小种子在开口的时间,使其尽快与旋转叶片接触加速运动,设定向送种轮与叶片间的径向距离为 5 mm,且定向送种轮的开口侧壁方向与竖直方向相同,方向向上,以此增加小麦种子与叶片的接触时间,从而获得充分的加速,提高入土效果[17-18]。

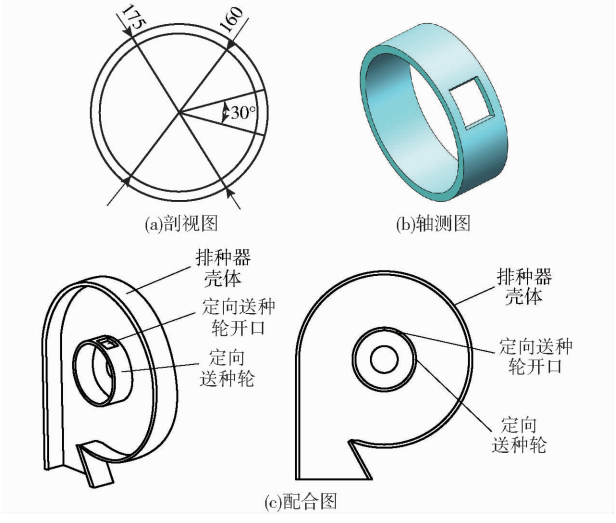


图 5 定向送种轮结构图

Fig. 5 Seeding control cage

2.3 叶片设计

参照风机叶片的设计形式,排种器旋转叶片也可分为前倾叶片、直线叶片、后倾叶片 3 种形式[19-20](图 6)。在相同转速和回转半径条件下,前倾叶片相较于直线叶片、后倾叶片,可有效增加抛射速度,本研究选取前倾叶片。参照排种器的整体结构尺寸及定向送种轮,叶片的外沿回转直径设计为 500 mm,曲率半径为 800 mm,叶片厚度为 3 mm,结构如图 7 所示。为减少小麦种子与叶片的碰撞摩擦,叶片内径与定向送种轮间设有 5 mm 间隙,为保证排种量稳定,定向送种轮外均匀分布 8 个叶片,叶片初始安装角设为 90°,与排种器的径向方向一致,可使种子进入叶片区域时与叶片的相对速度为 0。由于在排种器作业过程中可能存在种子间碰撞,小麦播种量不易过大,因此,叶片宽度设计为 100 mm,可保证小麦播种量为 0 ~ 200 kg/hm^2[21-22],排种器的播量可通过调节输种管调节板,从而改变管内种子的流量,进而调节播量;而调节排种器转速可改变种子加速后射出的速度,提升射播深度与播种稳定性,但随着叶片转速过高,排种器与种子间碰撞概率增加,因此排种器转速不宜过高,通过前期预试验,排种器转速应不超过 1 200 r/min。

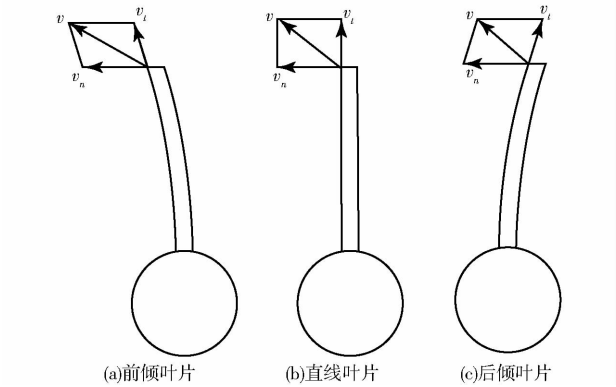


图 6 3 种类型叶片

Fig. 6 Three types of blades

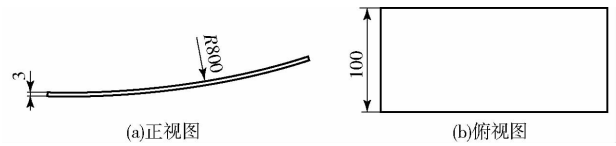


图 7 叶片结构图

Fig. 7 Structures diagram of blade

2.4 排种器壳体设计

投种角度与范围对小麦种子抛撒轨迹有直接影响,影响落种后的种子分布,原则上壳体开口设置应尽量减少与小麦种子发生碰撞。射播区域按照不同的位置有 3 种分类,关于排种器中心对称、射播扇形角度对称及射播量对称[23-24]。当射播区域关于排种器中心线对称时,其开口部分所在扇形的中心线上射出的种子落在排种器中心线正下方,可保证射播均匀性,播种量关于排种器中线对称,随着排种器的前进,可使抛撒效果均匀。考虑播种量与播种宽度,并结合前期仿真预试验结果[25],为保证种子射播角在 60° ~90°之间,设计壳体的开口角如图 8 所示,确定壳体开口角为 55°。为避免射种时种子与外壳内壁碰撞,开口底部的径向方向与竖直方向的夹角为 10°。为保证射种的稳定性,便于射播后种

子纵向分布均匀，方便入土，排种器投种口距离地面高度不低于 50 mm。

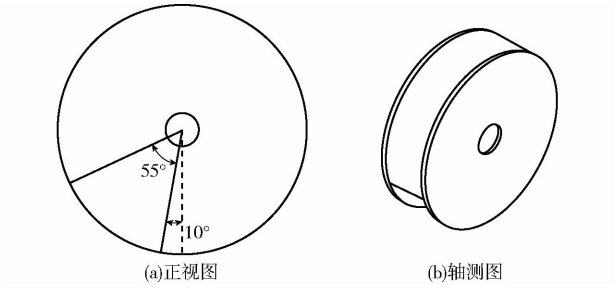


图 8　壳体开口结构图

Fig. 8　Structure diagrams of opening window for shield

3　种子运动过程分析

将种子假设为形状规则的球体，种子在离心力的作用下从分种轮经过定向轮开孔，进入叶片旋转区域，种子随着叶片的高速旋转进行加速运动[26]。在种子运动至投种口开口位置时射出，其运动过程分为：在排种器内部的携种加速运动和脱离排种器的投种过程 2 部分。

3.1　排种器内部种子运动过程

种子在分种轮的凹槽内形成种子团，种子颗粒从最外层开始，在离心力的作用下陆续通过分种轮与定向轮进入叶片旋转区域，在排种器内部通过叶片进行加速，由于叶片加速种子的运动时间大于种子从分种轮进入叶片区域的时间，因此种子在排种器内部及射播过程的运动均连续[14,21]。

种子进入分种轮，在离心力作用下运动至分种轮外沿，与定向轮内壁接触，由于分种轮转速恒定，种子此时切向速度为

$$v_{r0} = \omega r \tag{1}$$

式中　ω——角速度，rad/s

v_{r0}——种子在分种轮外径切向速度，m/s

r——分种轮外径，m

为简化计算过程，忽略定向轮厚度，种子飞出定向轮时速度保持不变，此时，在切线方向上叶片与种子间相对速度为 0。由于种子在离心力的作用下向外部运动，因此种子在叶片上运动时会产生相对速度。在种子沿着叶片运动过程中，分析种子在叶片上的运动及受力，种子尺寸相对于叶片尺寸过小，后续将种子假设为质点进行分析，如图 9 所示。种子在叶片上受力包括自身重力 mg、叶片支持力 N、叶片摩擦力 F_f，其中 N、F_f 2 个力的方向分别沿着叶片切线和法线方向，种子运动形式为复合运动，在沿着叶片向外沿运动同时，也绕着排种器做旋转运动，以排种器回转中心为原点建立坐标系 $O_1x_1y_1$，种子在 O_1x_1、O_1y_1 两个方向上的受力关系式为

$$\begin{cases} F_x = -F_f\sin\varphi - N\sin\varphi \\ F_y = N\cos\varphi - mg \end{cases} \tag{2}$$

式中　φ——种子与叶片接触点的切线与竖直方向夹角，(°)

m——种子质量，kg

F_x——种子在 O_1x_1 方向上合力，N

F_y——种子在 O_1y_1 方向上合力，N

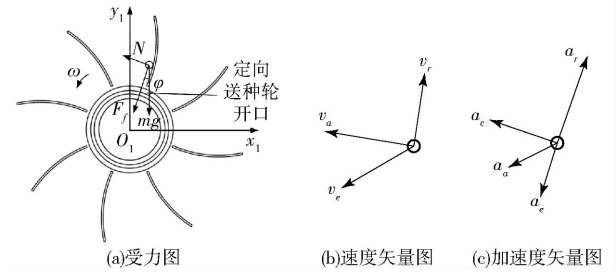


图 9　种子在叶片上运动示意图

Fig. 9　Diagrams of seed movement on blade

种子运动的绝对加速度由相对加速度、牵连加速度和科氏加速度组成，表示为

$$\boldsymbol{a}_a = \boldsymbol{a}_r + \boldsymbol{a}_e + \boldsymbol{a}_c \tag{3}$$

其中

$$a_c = 2\omega v_r \tag{4}$$

$$a_e = \omega^2\rho \tag{5}$$

$$v_r = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

$$a_e = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} \tag{7}$$

式中　a_a——种子绝对加速度，m/s^2

a_r——种子相对加速度，m/s^2

a_e——种子牵连加速度，m/s^2

a_c——种子科氏加速度，m/s^2

ρ——种子所在位置的回转半径，m

v_r——种子相对速度，m/s

则种子在 O_1x_1、O_1y_1 方向上的受力平衡方程为

$$\begin{cases} -F_f\sin\varphi - N\sin\varphi = (a_r - a_e)m\cos\varphi + ma_c\sin\varphi \\ N\cos\varphi - mg = (a_r - a_c)m\cos\varphi - ma_e \end{cases} \tag{8}$$

通过对式(8)进行简化，并代入种子运动初始条件，求得种子离开排种器时的速度为

$$v_a^{r1} = \omega\sqrt{2r_1^2 - r^2} \tag{9}$$

式中　r_1——叶片回转半径，m

v_a^{r1}——种子离开排种器时速度，m/s

种子离开排种器时转过最大角度为

$$\theta_{\max} = \ln\left(\frac{r_1}{r} + \sqrt{\frac{r_1^2}{r^2} - 1}\right) \tag{10}$$

代入排种器相关结构参数，得小麦种子在排种器中转过的最大角度为 145°，从而确定定向分种轮

开口方向与竖直方向相同,且根据前期的研究与农艺要求参考,小麦种子射播落入土壤大于 30 mm,才能保证发芽出苗[27-28]。因此,综合考虑种子在空气及土壤中的运动阻力对运动速度的影响,结合仿真单因素试验结果,确定在排种器转速不小于 800 r/min,小麦种子射播可满足播种速度要求,而随着转速的增加,小麦种子运动至叶片边缘位置时转过的角度变小,因此最大转速不宜超过 1 300 r/min。由于叶片转速较快,因此,在单个叶片上连续的种子流会在同一时间内脱离叶片,在运动参数固定的情况下,保证了每个叶片上种子的射播速度与射播角一致,从而保证种子射播深度的一致性。

3.2 种子在空气中的运动过程

种子经排种器加速后,在空气的运动过程会受到空气阻力的影响,建立坐标系如图 10 所示,以种子脱粒排种器位置为原点,分析种子运动情况。

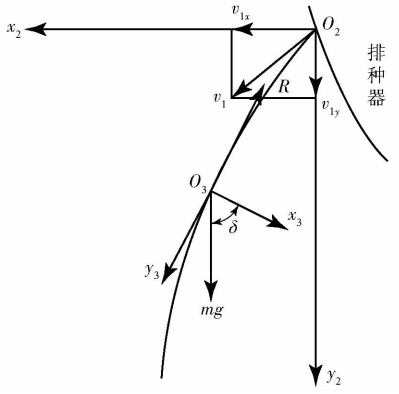


图 10 种子在空气中运动过程分析

Fig. 10 Seed movement in air

空气阻力 R 与运动速度 v_1 方向相反,且与速度的平方成正相关关系,计算式为

$$R = mgf(v_1^2) \tag{11}$$

式中 R——空气阻力,N

$f(v_1^2)$——空气阻力参数方程

v_1——种子在空气中运动的速度,m/s

以种子为原点建立动坐标系 $O_2x_2y_2$,以运动轨迹的切线和法线建立坐标轴,对种子在动坐标系下进行受力分析,可得

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}t} = mg\sin\delta - mgf(v_1^2) \\ m\dfrac{v_1^2}{\rho_1} = mg\cos\delta \end{cases} \tag{12}$$

其中

$$v_1 = \frac{\mathrm{d}s_1}{\mathrm{d}t} \tag{13}$$

式中 ρ_1——轨迹曲率半径,与种子在叶片上运动的时间有关,m

δ——动坐标系 O_3x_3 轴与竖直向下方向的夹角,(°)

s_1——种子在空气中的运动轨迹,m

代入初始条件,即种子初始速度为脱离排种器的速度,可得种子在空气中的运动参数方程为

$$\begin{cases} x_1 = \dfrac{1}{g}\displaystyle\int_{\delta_2}^{\delta}\left(g\cos\delta\,\frac{v_1\cos\delta\tan\delta\mathrm{d}t - v_1 f(v_1^2)\mathrm{d}t}{\cos\delta\mathrm{d}v_1}\right)^2\mathrm{d}\delta \\ y_1 = \dfrac{1}{g}\displaystyle\int_{\delta_2}^{\delta}\left(g\cos\delta\,\frac{v_1\cos\delta\tan\delta\mathrm{d}t - v_1 f(v_1^2)\mathrm{d}t}{\cos\delta\mathrm{d}v_1}\right)^2\tan\delta\mathrm{d}\delta \end{cases} \tag{14}$$

式中 x_1——种子投种运动过程在 O_2x_2 方向的位移,m

y_1——种子投种运动过程在 O_2y_2 方向的位移,m

δ_2——种子脱离排种器时的初始速度方向与竖直方向夹角,(°)

由式(14)可知,影响种子落地位置和入土时种子速度的因素为投种高度、排种器转速与前进速度。

4 仿真试验

4.1 仿真参数设置

采用 EDEM 离散元,对所设计的射播排种器进行播种仿真试验,分析不同因素的播种效果。分别建立土壤颗粒模型、排种器三维模型与小麦种子颗粒模型,土壤颗粒、小麦颗粒与排种器模型间均选用 Hertz - Mindlin (no slip)接触模型进行仿真分析,小麦颗粒间采用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型将小颗粒粘结成平均粒径三轴尺寸为 5.1 mm × 2.3 mm × 2.1 mm,排种器材料选用钢材,建立土壤颗粒的土层尺寸为 600 mm × 1 000 mm × 300 mm,仿真过程中参数设置如表 1 所示[29]。试验过程中在排种器的回转中心位置建立小麦颗粒工厂,按照小麦排种器播种量设置颗粒生成速率为 5 000 粒/s。

排种器转速取 800、900、1 000、1 100、1 200 r/min,射播高度选取 50、75、100、125、150 mm,前进速度选取 0.6、0.9、1.2、1.5 m/s,进行播种效果试验,通过调节排种器的内部叶片的转速、排种器与土壤颗粒表层的位置高度与排种器的移动速度,对试验因素水平进行调节。

小麦种子射播速度为小麦脱离排种器时的瞬时速度,通过 EDEM 后处理模块,在每一次仿真作业时捕捉随机的 20 粒小麦种子速度,其均值即为射播速度[30]。对仿真后的小麦颗粒进行统计分析,按照试验指标计算方法,对数据进行统计,每组试验重复 3 次后取平均值,当射播高度为 100 mm,前进速度为 0.9 m/s 时,不同转速的作业效果如图 11 所示。

表 1　材料参数

Tab. 1　Material physical parameters

参数	数值
土壤颗粒密度/(g·cm^{-3})	1.35
小麦颗粒泊松比	0.2
小麦颗粒剪切模量/Pa	2×10^{8}
排种器密度/(g·cm^{-3})	7.86
排种器泊松比	0.3
排种器剪切模量/Pa	2.06×10^{11}
土壤颗粒密度/(g·cm^{-3})	2.50
土壤颗粒泊松比	0.25
土壤颗粒剪切模量/Pa	1×10^{8}
小麦颗粒间碰撞恢复系数	0.42
小麦颗粒间静摩擦因数	0.5
小麦颗粒间动摩擦因数	0.075
小麦颗粒与排种器间碰撞恢复系数	0.4
小麦颗粒与排种器间静摩擦因数	0.4
小麦颗粒与排种器间动摩擦因数	0.1
小麦颗粒与土壤间碰撞恢复系数	0.05
小麦颗粒与土壤间静摩擦因数	0.1
小麦颗粒与土壤间动摩擦因数	0.05

4.2　评价指标

参照 GB/T 9478—2005《谷物条播机 试验方法》进行排种器试验[31]，考察所设计的射播式排种器的排种性能，选取播种深度变异系数、排种量变异系数、射播深度与射播速度为性能指标。

作业后连续选取仿真土槽长度范围内测量种子的数量，通过后处理模块，随机选取 100 个种子的播种深度，播种深度变异系数计算式为

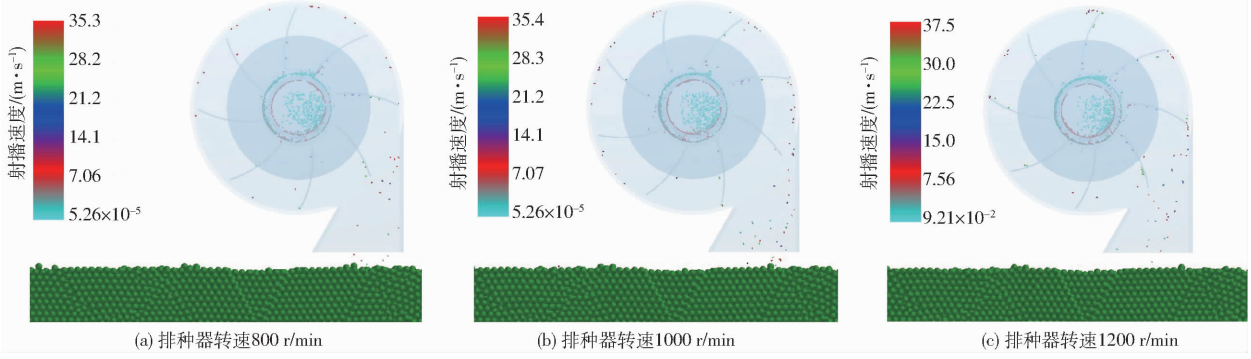
$$\eta=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\delta_s)^2}\times100\% \tag{15}$$

式中　η——播种深度变异系数，%

x_i——第 i 次测量的种子深度，mm

δ_s——种子深度的算术平均值，mm

将土槽在长度方向上划分为 10 个区域（标号为 1 ~ 10），每个区域长度为 100 mm，宽度为 150 mm，在射播试验后，随机选取连续的 5 个播种区域，统计每个区域内小麦种子数量，并随机选取每个区域内 20 个小麦种子，进行播种深度测量，示意图如图 12 所示。排种量变异系数计算式为



(a) 排种器转速800 r/min　(b) 排种器转速1000 r/min　(c) 排种器转速1200 r/min

图 11　仿真过程

Fig. 11　Simulation process

$$\eta_1=\sqrt{\frac{1}{N_1}\sum_{i=1}^{N_1}(y_i-\lambda)^2}\times100\% \tag{16}$$

式中　η_1——排种量变异系数，%

y_i——第 i 个区域内测量种子数量，$1\leqslant i\leqslant10$

λ——连续 5 个区域内种子数量的平均值

N_1——选取区域数量，试验选取 5 个区域

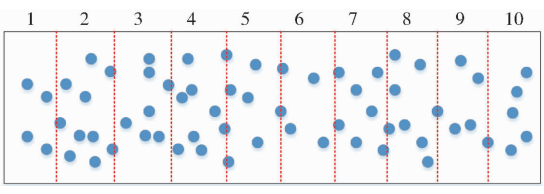


图 12　排种量测量示意图

Fig. 12　Schematic of seed amount

4.3　仿真试验结果分析

试验中排种量变异系数与播种深度变异系数如图 13、14 所示，对于播种深度变异系数与排种量变异系数，排种器转速、机具前进速度与射播高度均对指标有显著影响，且播种深度变异系数与排种器转速呈负相关，与机具前进速度、投种高度呈正相关关系，排种量变异系数与排种器转速呈负相关关系，与投种高度、前进速度呈正相关关系。原因可能是由于随着排种器转速增加，提升了种子的充种及携种性能，同时射播速度增大，减小了小麦种子在空气中受到的影响，从而提升了播种效果，减小了播种深度变异系数，但随着前进速度增加，提升了小麦种子在水平方向上的运动速度，在同一转速、投种高度条件下，小麦种子水平位移受到较大的影响，因此其播种深度变异系数增加；而随着投种高度增加，种子在空气中运动时间增加，从而影响了种子射入土壤中的效果及分布。

射播速度与射播深度如图 15、16 所示。排种器转速、机具前进速度与射播高度均对射播深度有显著影响，而对于射播速度，排种器转速有显著的影

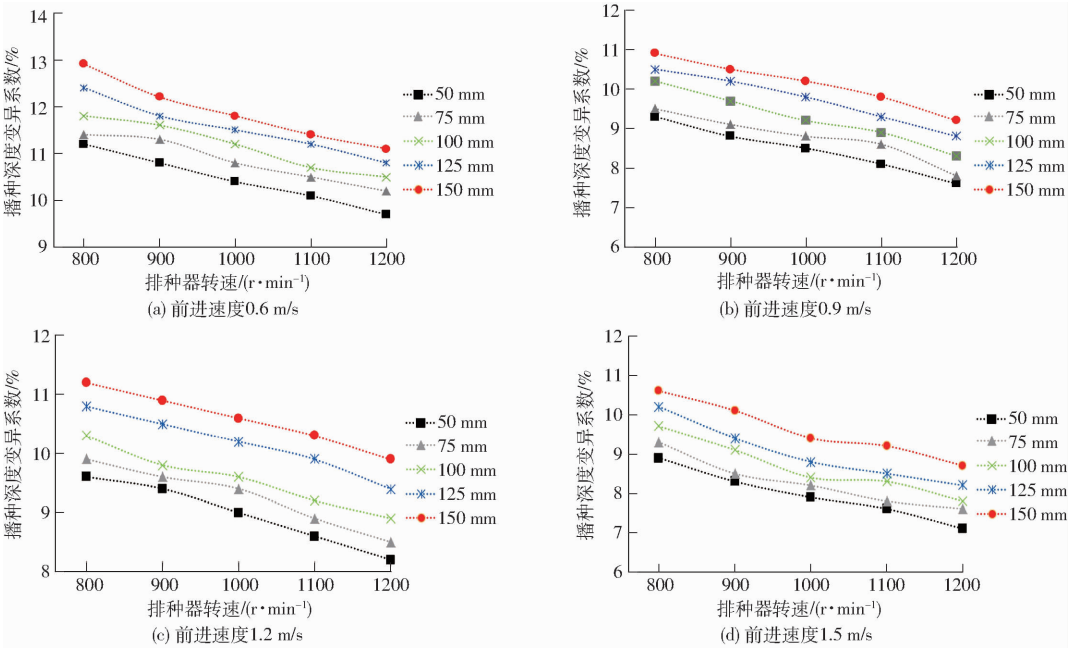


图 13 播种深度变异系数

Fig. 13 Coefficient of variation of shooting depth

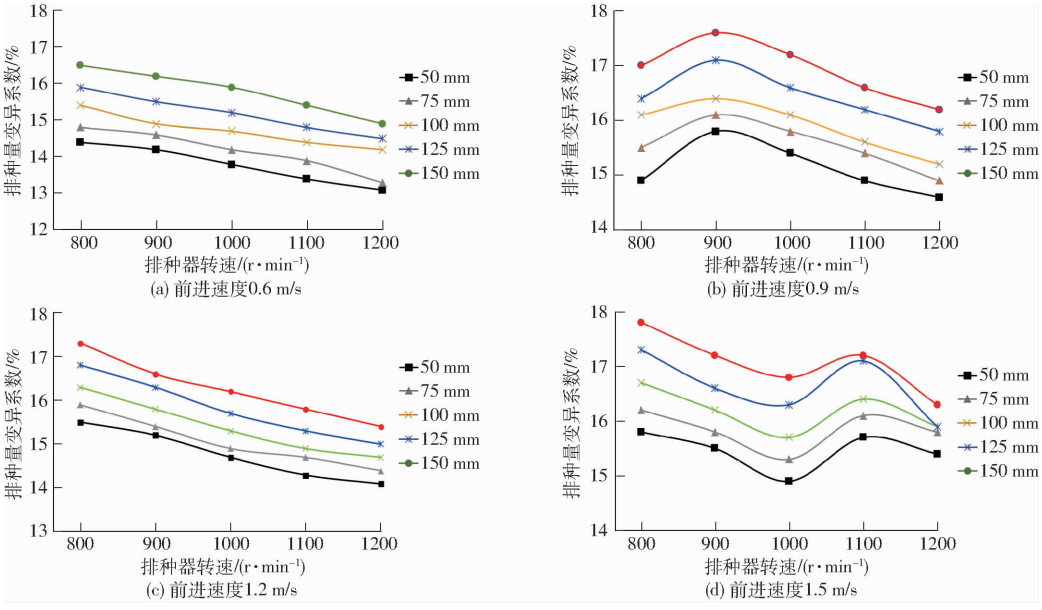


图 14 排种量变异系数

Fig. 14 Coefficient of variation of shooting amount

响,射播高度、机具前进速度对射播速度无显著性影响,且随着射播速度的增加,射播深度也呈增加的趋势,射播速度与排种器转速、机具前进速度均存在正相关关系,当排种器转速大于 900 r/min,机具前进速度大于 0.9 m/s 时,种子的速度均大于 30 m/s,播种深度大于 30 mm;且随着射播高度的增加,射播深度逐渐降低,射播深度变化趋势与仿真预试验规律相同,但射播深度较仿真试验较低,可能是由于在排种器作业过程中对小麦种子的碰撞及土壤条件的变化;原因可能是由于随着排种器转速的增加,小麦种子速度增加,其射播深度增加,射播高度增大后,增加了种子运动阻力,导致射播深度降低。仿真试验结果同时也表明,设计的排种器满足华北地区小麦播种的农艺要求。

5 试验台试验

5.1 试验条件

2019 年 11 月在中国农业大学试验研究中心进行射播排种器的试验台试验,试验前对土槽内的土壤进行破碎平整,经测量土壤含水率为 18.3%,与田间收集的土壤含水率基本一致,土壤坚实度为 45.2 kPa。电机为排种器提供动力,并控制试验台传送带的前进速度,试验用小麦种子平均大小为 4.1 mm×3.2 mm×2.1 mm,平均含水率为 12.3%,

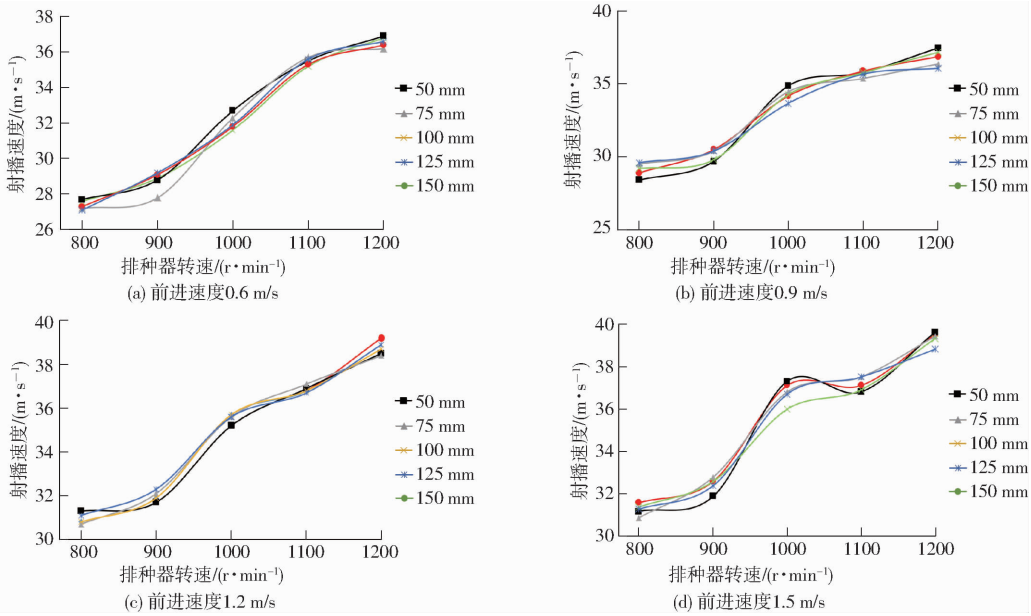


图 15　射播速度

Fig. 15　Shooting velocity

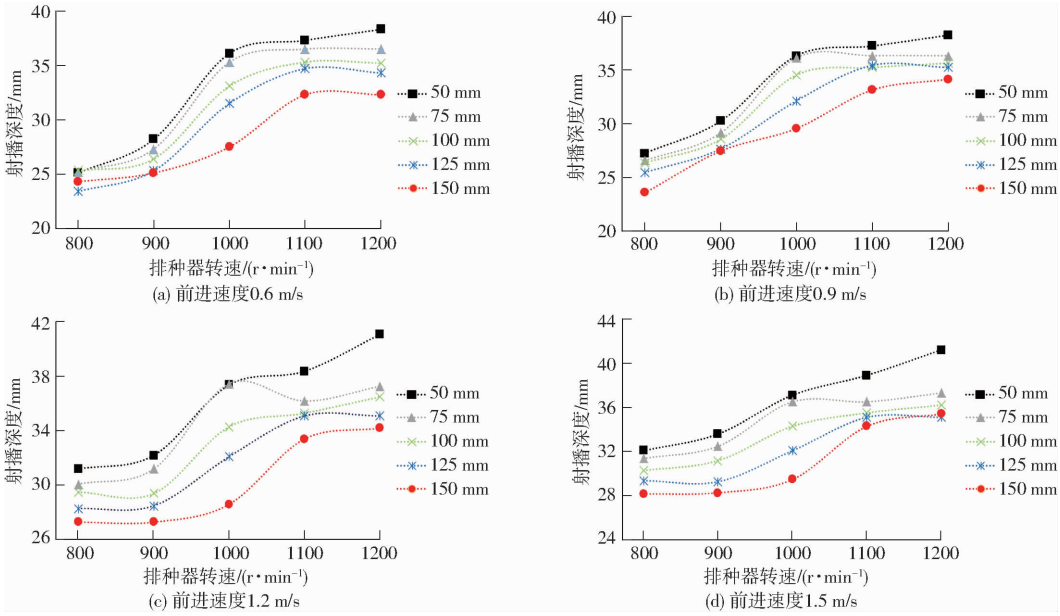


图 16　射播深度

Fig. 16　Shooting depth

与前述试验种类一致。播种高度可根据排种器安装高度进行调节，并采用高速摄像的方式对小麦种子投种的运动速度进行采集整理，高速摄像机帧率为 1 000 f/s，焦距 50 mm，排种器采用 3D 打印树脂材料，排种器侧板采用透明玻璃，以观察排种器内部种子的运动形式，试验装置如图 17 所示。按照上述试验指标的计算方法，对试验台试验中数据进行整理分析。

采用 SF501 型高速摄像机进行运动位置捕捉；从而进行计算小麦的射播速度，选取一次作业过程中随机的 10 粒小麦种子，并对其运动至排种器出口位置时的速度进行统计[32]，高速摄像过程如图 18 所示。其试验指标及数据测量方法与前述仿真试验相同。

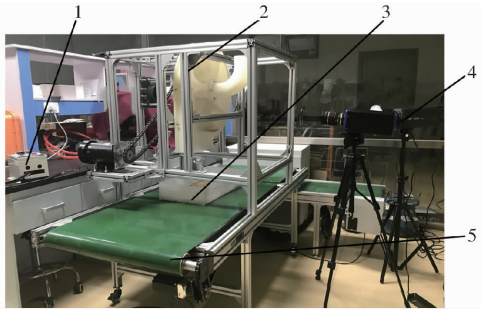


图 17　试验装置

Fig. 17　Experiment device

1. 调速器　2. 排种器单体　3. 土槽　4. 高速摄像机　5. 传送带

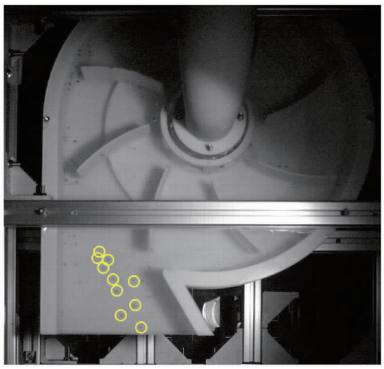


图 18 高速摄像小麦运动过程

Fig. 18 Movement process of wheat seed in high speed camera

5.2 正交试验

根据单因素试验分析,综合实际作业参数的调节范围,选取因素水平如表 2 所示,试验选取 $L_9(4^3)$ 正交试验方案,试验方案与结果如表 3 所示[33]。

由表 4 可知,对于播种深度变异系数与排种量变异系数,3 个因素均与 2 个指标间存在显著性关系,较优的播种深度变异系数参数组合为 $A_1B_3C_2$,较优的排种量变异系数为 $A_1B_1C_1$。对于射播速度,排种器转速与机具前进速度对其存在显著影响,而射种高度对其并无显著性影响,其较优的参数组合为 $A_3B_3C_2$,而对于射播深度,3 个因素均对其有显著性影响,其较优的参数组合为 $A_3B_3C_2$。

由表 4 可知,剔除不显著主因素项对试验指标的影响,综合考虑各个指标及相关影响因素,以及试验指标的权重,确定了较优的参数组合为 $A_2B_3C_2$,即机具前进速度为 1.0 m/s,排种器转速为 1 100 r/min,射播高度为 100 mm。

对所优化后的参数组合进行验证,试验条件与前述试验相同,当机具前进速度为 1.0 m/s,排种器转速为 1 100 r/min,射播高度为 100 mm 时,播种深度变异系数为 8.3%,排种量变异系数为 13.9%,射播速度为 35.2 m/s,射播深度为 34 mm。相较于华北地区应用较多的条播机,其播种深度变异系数降低了 6.9 个百分点,满足播种作业要求[21]。而排种量变异系数相较于目前的条播机较高,后续将对排种器结构进行优化,以提升排种均匀度。

表 2 试验因素水平

Tab. 2 Experimental factors and levels

水平	因素		
	机具前进速度 A/(m·s^{-1})	排种器转速 B/(r·min^{-1})	射播高度 C/mm
1	0.6	900	75
2	1.0	1 000	100
3	1.4	1 100	125

表 3 试验方案与试验结果

Tab. 3 Test plan and experimental data

试验编号	因素			播种深度变异系数/%	排种量变异系数/%	射播速度/(m·s^{-1})	射播深度/mm
	机具前进速度	排种器转速	射播高度				
1	1	1	1	10.1	13.8	26.3	25
2	1	2	2	9.6	15.2	32.4	33
3	1	3	3	8.2	16.7	36.8	36
4	2	1	3	11.7	15.4	27.9	23
5	2	2	1	10.1	16.1	33.8	32
6	2	3	2	9.5	17.2	38.8	35
7	3	1	1	13.1	15.6	28.4	30
8	3	2	3	11.4	17.5	34.8	32
9	3	3	2	9.3	17.3	37.9	38

表 4 方差分析和极差分析

Tab. 4 Variance and range analysis

试验指标	试验因素	方差分析			极差分析				优水平	优组合
		F	P	显著性	K_1	K_2	K_3	R		
播种深度变异系数	A	54.81	0.017 9	**	27.9	31.3	33.8	5.9	A_1	$A_1B_3C_2$
	B	98.56	0.010 1	**	34.9	31.1	27.0	7.9	B_3	
	C	11.81	0.078 0	*	33.3	28.4	31.3	4.9	C_2	
排种量变异系数	A	54.81	0.017 9	**	45.7	48.7	50.4	4.7	A_1	$A_1B_1C_1$
	B	101.16	0.009 8	***	44.8	48.8	51.2	6.4	B_1	
	C	14.45	0.064 7	*	45.5	49.7	49.6	4.2	C_1	
射播速度	A	13.07	0.071 1	*	95.5	100.5	101.1	5.6	A_3	$A_3B_3C_2$
	B	334.01	0.003 0	***	82.6	101.0	113.5	30.9	B_3	
	C	1.11	0.473 8		88.5	109.1	99.5	20.6	C_2	
射播深度	A	2.71	0.269 2		94	90	100	10	A_3	$A_3B_3C_2$
	B	26.18	0.036 8	**	78	97	109	31	B_3	
	C	1.32	0.430 8		87	106	97	19	C_2	

注:*** 表示极显著($P<0.01$);** 表示显著($0.01<P<0.05$);* 表示较显著($0.05<P<0.1$)。

6　结论

（1）设计了一种适用于华北壤土地区播种作业的机械式小麦射播排种器，确定了排种器内部分种轮、定向送种轮、叶片等关键部件结构参数，并通过种子在排种器内部及投种后运动过程的分析，确定了影响播种效果的因素为排种器转速、机具前进速度和射播高度。

（2）对机械式小麦射播排种器进行了正交试验，分析了各个因素与试验指标间的相关关系，得出了较优的工作参数组合，并通过试验台试验验证作业效果，当前进速度为 1.0 m/s、排种器转速为 1 100 r/min、射播高度为 100 mm 时，播种深度变异系数 8.3%，排种量变异系数为 13.9%，排种速度为 35.2 m/s，射播深度为 34 mm，满足小麦播种作业要求。

参　考　文　献

[1] 黄明，吴金芝，李友军，等. 不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J]. 农业工程学报，2009，25(1)：50－54.
HUANG Ming, WU Jinzhi, LI Youjun, et al. Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 50－54. (in Chinese)

[2] 高焕文，李问盈，李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报，2003，19(3)：1－4.
GAO Huanwen, LI Wenying, LI Hongwen. Conservation tillage technology with Chinese characteristrics[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 1－4. (in Chinese)

[3] SINGH A. Evaluation of wheat sowing technologies under paddy residue conditions[J]. International Journal of Forestry and Crop Improvement, 2015, 6(1): 43－48.

[4] OLAF E, UMAR F, MALIK R K, et al. On-farm impacts of zero tillage wheat in South Asia's rice-wheat systems[J]. Field Crops Research, 2008, 105(3): 240－252.

[5] 王刚. 稻茬覆盖地小麦保护性耕作技术及机具研究[D]. 北京：中国农业大学，2006.
WANG Gang. Study on conservation tillage technology and seeder about wheat in paddy stubble-straw field[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)

[6] MORRISON J E, ALLEN R R, WILHINS D E, et al. Conservation planter, drill and air-seeder selection guideline[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1988, 4(4): 300－309.

[7] 马力，杨林章，沈明星，等. 基于长期定位试验的典型稻麦轮作区作物产量稳定性研究[J]. 农业工程学报，2011，27(4)：117－124.
MA Li, YANG Linzhang, SHEN Mingxing, et al. Study on corp yield stability in a typical region of rice-wheat rotation based on long-term fertilization experiment [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 117－124. (in Chinese)

[8] 李朝苏，汤永禄，吴春，等. 播种方式对稻茬小麦生长发育及产量建成的影响[J]. 农业工程学报，2012，28(18)：36－43.
LI Chaosu, TANG Yonglu, WU Chun, et al. Effect of sowing patterns on growth, development and yield formation of wheat in rice stubble land[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18): 36－43. (in Chinese)

[9] 李兵，王继先，张健美，等. GBSL－180 型双轴式旋耕灭茬播种机设计[J]. 农业机械学报，2008，39(3)：180－182.

[10] 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)

[11] 魏延富，高焕文，李洪文. 三种一年两熟地区小麦免耕播种机适应性试验与分析[J]. 农业工程学报，2005，21(1)：97－101.
WEI Yanfu, GAO Huanwen, LI Hongwen. Experiment and analyses of the adaptabilities of three wheat no-tillage drills on corn stubble in the areas with two ripe crops a year[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 97－101. (in Chinese)

[12] WANG Chao, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Preliminary bench experiment study on working parameters of pneumatic seeding mechanism for wheat in rice-wheat rotation areas[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2020, 13(1): 66－72.

[13] 王超，李洪文，何进，等. 入射角度对气力射播小麦种粒入土参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报，2019，35(16)：32－39.
WANG Chao, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effect of incident angle on wheat soil-ripping parameters by pneumatic seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 32－39. (in Chinese)

[14] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京：机械工业出版社，1982：389－403.

[15] 吴明亮，官春云，汤楚宙，等. 2BF－6 型稻茬田油菜免耕联合播种机的研究[J]. 农业工程学报，2005，21(3)：103－106.
WU Mingliang, GUAN Chunyun, TANG Chuzhou, et al. 2BF－6 type no-tillage combine seeder for rape in stubbly field [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 103－106. (in Chinese)

[16] 张银平，杜瑞成，刁培松，等. 正反转组合式水稻宽苗带灭茬播种机设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(3)：7－13.
ZHANG Yinping, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of wide band seeding rice seeder with reversed stubble cleaning and anti-blocking[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 7－13. (in Chinese)

[17] 阎荫槐. 抛丸器运动学参数计算方法的发展[J]. 设计与计算，1986(4)：23－26.

[18] 曾辉. 抛丸器分丸轮直径的计算[J]. 中国铸机，1990(2)：40－44.

[19] 崔清亮,裘祖荣,贺俊林,等. 2BQYF-6A 型气压式硬茬精密播种机的研究[J]. 农业机械学报,2001,32(4):31-33.
CUI Qingliang, QIU Zurong, HE Junlin, et al. Study on the pneumatic non-tillage precision seeder(2BQYF-6A)[J]. Transcations of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 31-33. (in Chinese)

[20] 孙妮娜,许令峰,王金星,等. 风送式水稻撒播机关键部件设计及试验[J]. 农机化研究,2017,39(1): 137-141.
SUN Nina, XU Lingfeng, WANG Jinxing, et al. Design and test of key parts on air-assisted rice broadcast sower[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(1): 137-141. (in Chinese)

[21] 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/OL]. 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/OL]. Transcations of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171107&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.007. (in Chinese)

[22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

[23] 李微. 抛丸机叶片设计及分析[D]. 长春:吉林大学,2007.
LI Wei. Design and analysis of impeller blade[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

[24] H. 阿克箫诺夫,П. 阿克箫诺夫. 铸工车间设备[M]. 欧阳晖,译. 北京:机械工业出版社,1957:170-196.

[25] 李卿. 基于图像处理的小麦精密排种器实验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2010.

[26] 张万钧. 曲线叶片圆弧半径的确定[J]. 中国铸机,1986(3):26-29.

[27] 金鑫,李倩文,苑严伟,等. 2BFJ-24 型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):84-92.
JIN Xin,LI Qianwen,YUAN Yanwei,et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat precision seed sowing machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):84-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.010. (in Chinese)

[28] 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)

[29] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):109-114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140219&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.019. (in Chinese)

[30] 赵晓顺,于华丽,马跃进,等. 负压式小麦精量排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(11):11-18.
ZHAO Xiaoshun, YU Huali, MA Yuejin, et al. Parameter optimization and experiment of negative pressure precision seed-metering device for wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 11-18. (in Chinese)

[31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准管理委员会. GB/T 9478—2005 谷物条播机 试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[32] KARAYEL D, WIESEHOFF M, ZMERZI A, et al. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera systems[J]. Computer and Electronics in Agriculture,2015, 50(2):89-96.

[33] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014:155-164.