doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.011

小麦宽幅匀播机多级分流匀种装置设计与试验

史增录[1,2]　杨龙飞[1]　张学军[1,2]　鄢金山[1,2]　白圣贺[3]　金宇菲[1]

(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆智能农业装备重点实验室,乌鲁木齐 830052;
3.中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083)

摘要:小麦宽幅匀播技术有利于优化小麦群体结构,对于提高水肥利用效率及产量具有重要作用。增加播幅、提高匀播是宽幅匀播技术的核心,针对小麦幅宽 300 mm、行距 300 mm、滴灌带铺设在苗带中间位置的小麦宽幅匀播种植农艺要求,本文提出了一种基于多级分流原理的宽幅匀种装置,阐述其结构和工作原理,分析了种子流在输种管内运动情况,研究了分种圆柱、分种板运动模型,得到影响匀种性能的关键因素;利用 EDEM 建立了匀种装置动态模型,以排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数为目标,分种圆柱半径、分种圆柱竖向距离和分种板倾斜角度为因素,进行不同播种量条件下单因素试验,获得各因素对排量、匀种性能的影响规律;以排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数为评价指标,以分种圆柱半径、分种圆柱竖向距离和分种板倾斜角度为试验因素,进行二次正交旋转组合试验,获得最优结构参数为分种圆柱半径 9 mm、分种圆柱竖向距离 35 mm、分种板倾斜角度 45°,在最优结构参数下排量一致性变异系数不大于 3.72%,播种均匀性变异系数不大于 21.6%。最优参数下进行匀种性能台架验证试验和田间验证试验,结果表明台架验证试验 2 项指标分别不大于 3.16% 和 22.36%,田间验证试验 2 项指标分别不大于 3.68% 和 20.69%。台架和田间验证试验结果与仿真试验相对误差小于 5%,证明应用离散元法对宽幅匀种装置结构参数进行优化的结果可信。研究结果可为宽幅匀种装置结构参数优化以及提升播种效果提供理论参考。

关键词:小麦宽幅匀播机;匀种装置;多级分流;EDEM

中图分类号:S222.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)12-0121-11　　**OSID**:

Design and Test of Multistage Diversion and Homogenization Device for Wheat Wide Soaking Machine

SHI Zenglu[1,2]　YANG Longfei[1]　ZHANG Xuejun[1,2]　YAN Jinshan[1,2]　BAI Shenghe[3]　JIN Yufei[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment*, *Urumqi* 830052, *China*
3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Wide-row, uniform seeding technology for wheat helps optimize plant population structure and plays a crucial role in improving water and fertilizer use efficiency as well as yield. Increasing the seeding width and improving uniformity are at the core of this technology. In response to the agronomic requirements for wide-row, uniform seeding of wheat, specifically a row width of 300 mm, a row spacing of 300 mm, and drip irrigation tape laid in the center of the seedbed, a wide-row uniform seeding device was proposed based on the principle of multi-stage seed distribution, its structure and operating principles were described, the movement of the seed flow within the seed delivery tube was analyzed, and the motion models of the seed-distributing cylinder and seed-distributing plate were investigated to identify the key factors affecting seeding uniformity. Using EDEM, a dynamic model of the uniform seeding device was established. With the coefficient of variation for discharge consistency and the coefficient of variation for seeding uniformity as objectives, and the radius of the seed-distributing cylinder, the vertical distance of the seed-distributing cylinder, and the inclination angle of the seed-distributing plate as factors, single-factor experiments were conducted under different seeding rate conditions to determine the influence

收稿日期:2024-12-26　修回日期:2025-02-19

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02003-3)和兵团科技计划项目(2025AB036)

作者简介:史增录(1986—),男,正高级实验师,博士,主要从事农业工程技术与智能装备研究,E-mail:shizlfd@qq.com

通信作者:张学军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail:tuec@163.com

patterns of each factor on discharge and seeding uniformity. Using the coefficient of variation for discharge consistency and the coefficient of variation for seeding uniformity as evaluation metrics, and the radius of the seed-distributing cylinder, the vertical distance between seed-distributing cylinders, and the inclination angle of the seed-distributing plate as experimental factors, a two-factor orthogonal rotational combination experiment was conducted. The optimal structural parameters were determined to be a seed-distributing cylinder radius of 9 mm, a vertical distance between seed-distributing cylinders of 35 mm, and a seed-distributing plate inclination angle of 45°. Under these optimal structural parameters, the coefficient of variation for discharge consistency was no greater than 3.72%, and the coefficient of variation for seeding uniformity was no greater than 21.6%. Bench and field validation tests for seeding uniformity were conducted by using the optimal parameters. The results showed that in the bench tests, the two indicators were no greater than 3.16% and 22.36%, respectively, while in the field tests, they were no greater than 3.68% and 20.69%, respectively. The relative error between the bench and field validation test results and the simulation results was less than 5%, proving that the results of optimizing the structural parameters of the wide-row uniform seeding device by using the discrete element method were reliable. The findings can provide a theoretical reference for optimizing the structural parameters of wide-row uniform seeding devices and improving their seeding performance.

Key words: wide-row wheat seeder; seed distribution device; multi-stage distribution; EDEM

0 引言

我国小麦常年播种面积和产量均占粮食作物的22%左右,是世界最大的小麦生产国和消费国[1-2],国家统计局统计数据显示,2023 年我国小麦播种面积为 2.36×10^7 hm^2,总产量达 1.3659×10^8 t,较2022 年播种面积增加 0.82%,但总产量下降0.46%[3-4],如何保证小麦持续高效及稳定生产,对保障我国粮食安全具有重要意义[5-8]。

现有研究显示,小麦条播技术由于易产生缺苗断垄,以及行内株距不一、麦苗间资源竞争过大等弊端,已不能满足高效及稳定生产的要求[9]。宽幅匀播技术作为一种新型小麦种植方式,是对传统小麦种植技术一种更新和扩大,播种之后小麦籽粒更均匀,缓和了麦苗之间的竞争,提高了水肥利用效率,易形成壮苗,切实提升生产效率[10-12]。现有研究表明宽幅匀播相较于条播播种之后小麦更加均匀,能增加小麦穗粒数,从而更有利于提高产量[13-16],开展宽幅匀播技术研究具有极其重要意义。

机械化宽幅匀播和传统条播相比有所不同,宽幅匀播技术需将小麦种子均匀撒落在 20 ~ 40 cm 播幅上,为达到此种播种效果,我国农机装备生产企业研制了相关机械设备[17-19]。目前这些装备虽已投入到实际生产中,但对于宽幅匀播相关的核心部件研发还相对欠缺,我国农业机械装备科研单位按照宽幅匀播实际需求,对相关关键部件进行结构设计与参数试验[20-22],取得了良好的分种效果,但未达到宽幅效果。本研究在小麦幅宽 300 mm,行距300 mm,滴灌带铺在苗带中间位置农艺模式下,开展小麦宽幅均匀化播种,着力解决幅宽 300 mm 内小麦种子均匀投放问题,应用离散元法对不同结构参数匀种装置工作过程进行模拟,以优化宽幅匀种装置结构及工作性能,通过台架试验以及田间试验对优化结构参数的匀播装置作业效果进行验证,以期为匀种装置结构参数设计和提升匀种性能提供参考。

1 结构组成与工作原理

1.1 小麦宽幅匀播农艺模式

现在小麦宽幅种植农艺模式一般要求幅宽 200 ~ 300 mm,某些特殊情况还可达到 400 ~ 500 mm,行距一般为 200 ~ 300 mm。本研究农艺模式如图 1 所示,此种植模式通过调整行间距改变群体通风透光性,提升小麦植株个体竞争力,能增加小麦产量;另外此类种植模式令行间距、小麦与滴灌带间距离缩小,提升水分渗透率,使得更多的水分渗透到根部,最终达到节水效果。

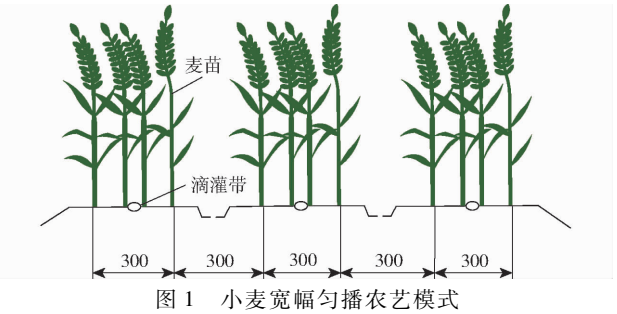


图 1 小麦宽幅匀播农艺模式

Fig. 1 Agronomic pattern of wide uniform sowing of wheat

1.2 宽幅匀播机工作原理与宽幅匀种装置设计

1.2.1 小麦宽幅匀播机工作原理

小麦宽幅匀播播种机工作原理图如图 2 所示。播种机在进行播种作业时,小麦种子由种箱进入排种器,经排种器后流过输种管到达匀种装置,小麦种子与匀种装置相互作用后,散乱均匀落在种床上,紧接着大量土壤被旋耕刀组打碎旋抛于后方盖到小麦

种子和滴灌带上方，随后刮土板平整工作面，最后进行播后镇压作业。

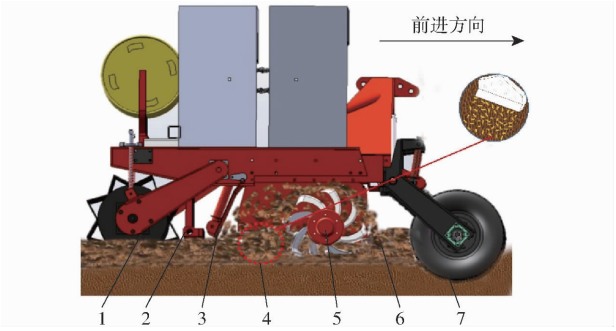


图 2　播种机工作原理图

Fig. 2　Schematic of seeder's working principle

1. 镇压辊　2. 浅埋装置　3. 刮土板　4. 匀种装置　5. 旋耕装置　6. 土壤　7. 行走轮

1.2.2　宽幅匀种装置结构与工作原理

图 3a 为小麦宽幅匀播机整机结构，其中宽幅匀种装置是实现宽幅匀播的关键部件，结构如图 3b 所示，主要由落槽口、1 级分种圆柱、2 级分种圆柱、3 级分种圆柱、分种板构成，输种管上端与小麦排种器相连，下端与匀种装置上金属管相连，小麦颗粒由金属管到达匀种装置内部，通过匀种装置对小麦颗粒的相互作用，使小麦随机撒落在种床上，为满足图 1 所示种植模式宽幅匀播技术要求，匀种装置工作宽度为 300 mm。

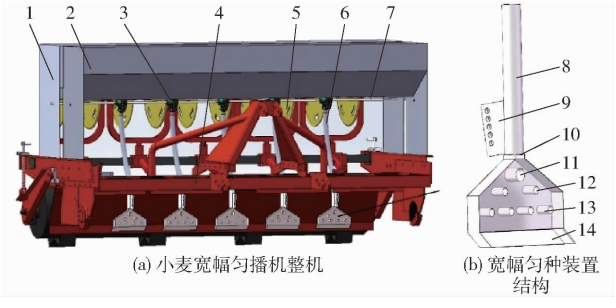


图 3　小麦宽幅匀播机整机与匀种装置结构

Fig. 3　Structural diagram of entire wheat wide-row seeder and seed distribution mechanism

1. 种箱　2. 肥箱　3. 排种器　4. 机架　5. 滴灌架　6. 排种管　7. 排种轴　8. 金属管　9. 安装板　10. 落槽口　11. 1 级分种圆柱　12. 2 级分种圆柱　13. 3 级分种圆柱　14. 分种板

在图 3b 中分种圆柱和分种板是匀种装置的关键部件，分种圆柱位置、大小和分种板倾斜角度会影响播种均匀性，因此在不同结构下，对分种圆柱位置和大小、分种板倾斜角进行优化，确保达到最理想播种均匀性效果。

在宽幅匀种装置内部，分种圆柱排布与种子速度有很大关系，因此速度是影响种子在宽幅匀种装置内部工作的重要因素，为了更准确地分析宽幅匀种装置内部种子运动情况，需对种子在输种管内部运动状态及受力进行分析，将输种管设置为带有一定角度的倾斜直线种管。

1.3　种子在直线输种管运动分析

在小麦种子与输种管发生接触后种子沿排种管开始下滑，种子在输种管受力分析如图 4 所示。由图 4 受力分析可知

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}t} = mg\cos\delta - \mu mg\sin\delta \\ G = mg \\ F_f = \mu F_N \end{cases} \tag{1}$$

式中　m——种子质量，kg

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

F_N——输种管对小麦的支撑力，N

F_f——小麦所受摩擦力，N

δ——输种管与水平方向夹角，(°)

v_1——种子在输种管内下滑速度，m/s

G——种子重力，N

μ——种子与输种管道摩擦因数

t——小麦在输种管内时间，s

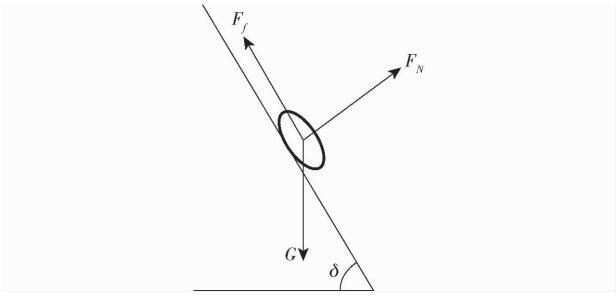


图 4　种子在输种管受力分析

Fig. 4　Analysis of force on seeding pipe

由式(1)得

$$S = \frac{1}{2}(g\cos\delta - \mu g\sin\delta)t^2 + C_1 t + C_2 \tag{2}$$

式中　C_1、C_2——常量

S——输种管长度，mm

当时间 t 为 0 s 时，速度 v_0 为种子从排种器刚离开速度，即

$$\begin{cases} v_0 = C_1 \\ v_0 = \omega r \\ C_1 = \omega r \end{cases} \tag{3}$$

式中　ω——排种器角速度，rad/s

r——排种器槽轮半径，mm

将式(3)代入式(2)、(1)并合并得

$$\begin{cases} v_1 = (g\cos\delta - \mu g\sin\delta)t + \omega r \\ S = \dfrac{1}{2}(g\cos\delta - \mu g\sin\delta)t^2 + \omega r t \\ v_1 = \sqrt{2(g\cos\delta - \mu g\sin\delta)S + \omega^2 r^2} \end{cases} \tag{4}$$

以上为种子在输种管内运动状态分析，假设种

子在与金属管内壁经 2 次碰撞后开始做只受重力作用的运动,则

$$v_2^2 - v_1^2 = 2gh \tag{5}$$

式中 v_2——离开输种管与圆柱碰撞前速度,m/s

h——金属管长度,m

将式(5)代入式(4)得

$$v_2 = \sqrt{2gS + 2(g\cos\delta - \mu g\sin\delta)S + \omega^2 r^2} \tag{6}$$

1.4 宽幅匀种装置匀种运动分析与结构设计

1.4.1 宽幅匀种装置匀种运动分析

由于金属管与宽幅匀种装置直接进行固定连接,所以种子在刚离开金属管运动末期和刚进入宽幅匀种装置运动初期具有连续性,可看为持续性运动。因此式(6)中 v_2 即为与分种圆柱碰撞前的速度。

如图 5b 所示,1 个 1 级分种圆柱半径为 R,R 取 150 mm 时不会出现因尺寸过大导致堵种和尺寸过小导致麦种和分种圆柱接触不到导致漏种,因此 R 取定值。2 个 2 级、4 个 3 级分种圆柱半径均为 R_2,2 级分种圆柱到 1 级分种圆柱的垂直高度等于 2 级分种圆柱到 3 级分种圆柱的垂直高度,且高度均为 H。2 级分种圆柱与 1 级分种圆柱水平距离为 d_1 且 2、3 级圆柱呈对称分布,d_2 和 d_3 分别为 3 级分种圆柱间距离。

通过对小麦种子速度及碰撞位移分析,当 2 级分种圆柱与 1 级分种圆柱水平距离 d_1 为 53 mm 时,圆柱位于种子流落点之间,能达到较好的分流效果,并通过改变 H 以满足 2 级分种圆柱达到最优分流效果且当水平距离 d_2 和 d_3 均为 70 mm 时,3 级分种圆柱位于被 2 级分种圆柱分流的种群落点之间,能达到较好的分流效果,并通过改变 H 以满足 3 级分种圆柱达到较好的分流效果。

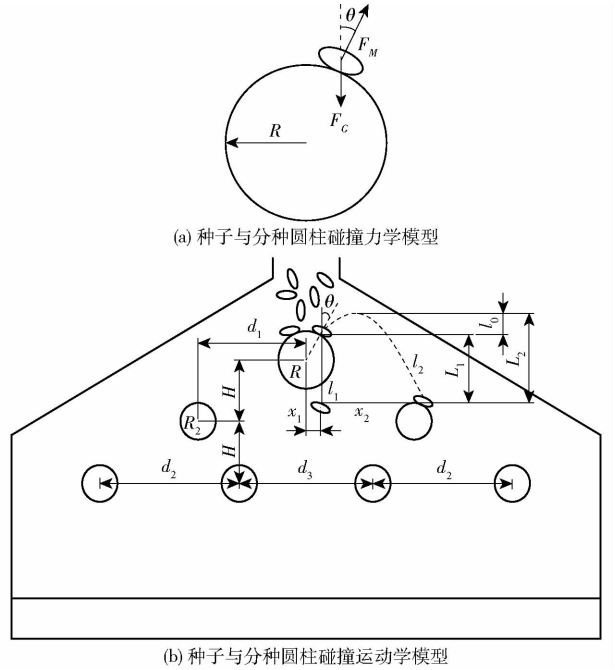


图 5 小麦种子与分种圆柱碰撞模型

Fig. 5 Collision motion model of wheat seeds and seeding cylinder

图 5b 中 1 级分种圆柱作用是将小麦种子进行第 1 次分流,将从金属管排出的小麦种群通过碰撞均匀地分到圆柱两边,通过控制 1 级分种圆柱位置和大小从而使被分到圆柱两边的小麦种子数量基本达到一致。2 级分种圆柱作用是使小麦种群进行 2 次分流,被 1 级分种圆柱分流的小麦种群均匀地落在 2 个 2 级分种圆柱上,2 级分种圆柱通过与小麦间的相互作用力,将小麦种群再次均匀分流。3 级分种圆柱作用是对小麦种群进行第 3 次分流,通过控制 3 级分种圆柱的位置和大小,被 2 次分流的种群第 3 次被均匀分流。被 3 次分流的小麦种群最后与分种板相互作用,分流后的小麦种群被均匀打散,从匀种装置排出的种子向四周散落,满足幅宽 300 mm 以及播种均匀性要求。

根据图 5b 中小麦种子与分种圆柱碰撞之后的运动轨迹,离开分种圆柱表面时,忽略空气阻力对种子的影响,此时小麦种子只受到自身重力 F_G 的作用,可将此时小麦种子运动轨迹近似为类平抛运动,可得

$$\begin{cases} v_2 = v_3 \\ v_x = v_2\cos\left(\dfrac{\pi}{2} - 2\theta\right) \\ v_y = v_2\sin\left(\dfrac{\pi}{2} - 2\theta\right) \\ l_0 = \dfrac{1}{2}gt_1'^2 \\ L_1 + l_0 = \dfrac{1}{2}gt_2'^2 \\ t_2 = t_1' + t_2' \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} L_1 = v_2 t_1 + \dfrac{1}{2}gt_1^2 \\ D_1 = x_1 \\ D_2 = x_1 + x_2 \end{cases} \tag{8}$$

式中 θ——种子入射角,(°)

v_x——水平方向分速度,m/s

v_y——竖直方向分速度,m/s

D_1——无分种圆柱时种子离中心点水平距离,mm

D_2——有分种圆柱时种子离中心点水平距离,mm

t_1'——沿 l_2 轨迹上升时间,s

t_2'——平抛时间,s

x_1——小麦种子未撞击圆柱时离中心点水平距离，mm

x_2——小麦种子水平方向位移，mm

v_3——小麦种子与分种圆柱发生碰撞后速度，m/s

l_0——小麦种子沿轨迹 l_2 的上升高度，mm

t_1——轨迹 l_1 运动时间，s

t_2——轨迹 l_2 运动时间，s

l_1——无分种圆柱时种子运动轨迹

l_2——有分种圆柱时种子运动轨迹

L_1——种子下落高度，mm

根据式(7)、(8)整合求得小麦种子悬空时间为

$$t_2=\frac{v_2\sin\left(\frac{\pi}{2}-2\theta\right)}{g}\left(1+\sqrt{1+\frac{2gL_2}{v_2^2\sin^2\left(\frac{\pi}{2}-2\theta\right)}}\right) \tag{9}$$

式中　L_2——种子从最高点落下距离，mm

小麦种子水平方向位移为

$$x_2=\frac{v_2^2\sin(\pi-4\theta)}{2g}\left(1+\sqrt{1+\frac{2gL_2}{v_2^2\sin^2\left(\frac{\pi}{2}-2\theta\right)}}\right) \tag{10}$$

由式(7)~(10)可知，当小麦种子速度 v_0 不变时，分种圆柱半径 R 影响碰撞后 l_2 运动轨迹、高度 L_2 以及运动时间 t_2，从而对小麦种子水平方向位移产生影响，进而对匀种效果产生影响；竖直高度 H 通过影响时间 t_1 对匀种效果产生影响，因此分种圆柱半径 R 以及高度 H 是影响小麦种子均匀分流的重要参考因素。

1.4.2　宽幅匀种装置结构设计

分种板是匀种装置分种的关键部件，为将宽幅匀播达到播种均匀性需求，对匀种装置分种板进行分析。分种板为空间三维斜面，三维斜面与水平面间夹角 α 不同，对小麦种子播种均匀性的影响不同，因此对分种板分种过程进行分析，分析三维斜面和水平面之间夹角 α，由图 6 可知

$$\cos\alpha=\frac{c}{b} \tag{11}$$

式中　b——OB 长度，mm

c——OC 长度，mm

由式(11)可知，因 c 为定值，所以 b 取决于 α，在一定长度范围内，b 越长，α 越大，分种板倾斜程度越大，种子群越易被打散，b 越小，α 越小，分种板倾斜程度越小，种子越不易被打散，但过小会导致堵种，太大会导致种子水平位移过大从而影响均匀性，因此分种板倾斜角度是影响种子播种均匀性的主要因素。

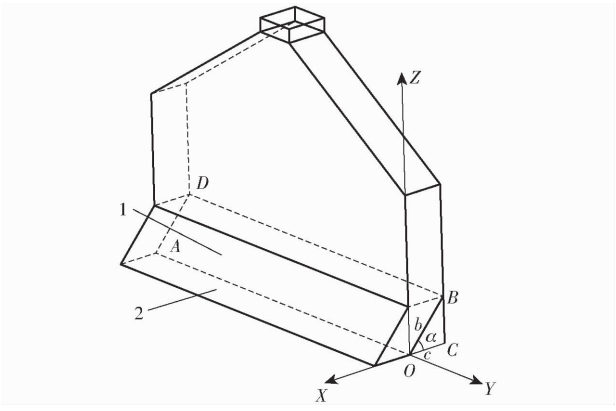


图 6　分种板空间角度关系

Fig. 6　Space angle relationship of classification panels

1. 斜面 $OADB$(分种板所在面)　2. 与水平面 XOY 所重合面

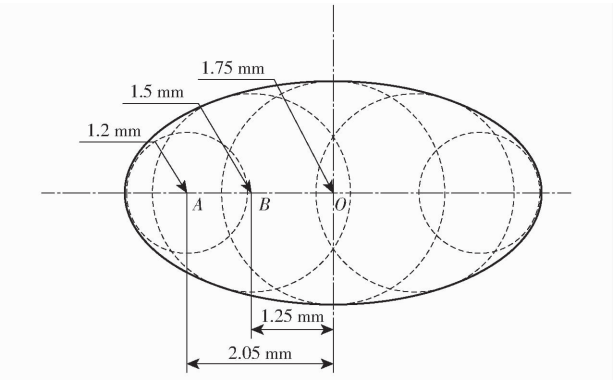
传统分种装置虽然播种均匀性效果尚可，但均存在装置幅宽不够宽，适应不了宽幅匀播的农艺需求；种子散布均匀度不达标、工作可靠性、实用性不高等问题，满足不了高质量作业需求。为了能适配宽幅农艺模式幅宽，利用经排布后的圆柱能够实现多级分流、投放均匀性较高等特性，设计分种圆柱和分种板组合装置，实现小麦宽幅均匀化播种，着力解决幅宽 300 mm 内小麦种子均匀投放问题，且此种宽幅匀种装置相较于传统匀种装置，通过多级分流及打散后匀种性能较高，能够满足精准作业需求、并且可以通过改变分种圆柱排布增加幅宽从而满足上述农艺模式要求，解决传统匀种装置匀种性能效果不显著及幅宽不够等缺点。

2　离散元仿真平台

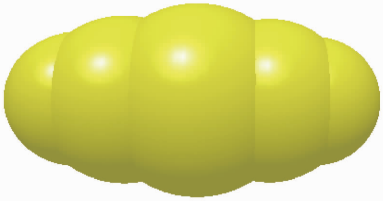
宽幅匀种装置在完成小麦颗粒播种作业整个过程会涉及大量的颗粒运动，小麦颗粒在播种过程会受到自身重力、摩擦力、分种圆柱支撑力、分种板支撑力等多重作用力。离散元仿真分析软件 EDEM 作为有效粒子运动学分析工具，可以降低成本以及缩短研发周期，随着计算机技术的发展，基于离散元法数值仿真技术在农业机械装备研究中得到了广泛应用[23-24]。

2.1　小麦颗粒离散元模型

小麦颗粒形状类似于椭球形纺锤状，选用新冬 22 小麦种子作为小麦颗粒三维建模试验材料，利用游标卡尺对随机抽取的 100 粒小麦颗粒长轴以及短轴进行测量，得到三轴平均尺寸为长度 6.50 mm、宽度 3.5 mm、厚度 3 mm。利用 5 球组合方式建立小麦颗粒离散元模型，5 个球相对距离以及半径如图 7a 所示，小麦颗粒离散元模型如图 7b 所示，点 A、B、O 表示 3 个球中心点。



(a) 5球平面图



(b) 5球三维图

图 7 小麦种子模型

Fig. 7 Wheat seed models

2.2 宽幅匀种装置工作模型

在图 7b 基础上,应用 Solidworks 构建完整的宽幅匀种装置仿真工作模型,如图 8 所示,主要包括颗粒工厂、宽幅匀种装置和种床,匀种装置作为均匀播种的关键部件,其结构根据式(7)~(11)构造。

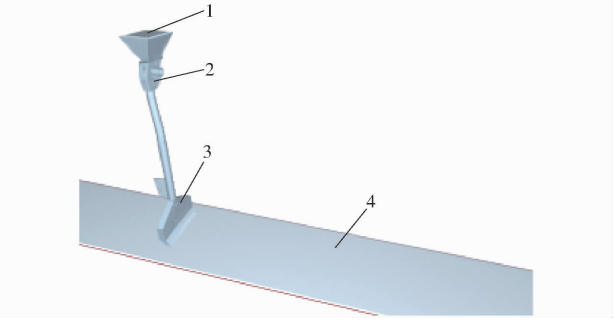


图 8 宽幅匀种装置仿真工作模型

Fig. 8 Simulation working model of wide-width homogenization device

1. 颗粒工厂 2. 排种器 3. 宽幅匀种装置 4. 土壤模型

为方便对小麦颗粒均匀分布的效果进行分析,在匀种装置下方 30 mm 位置创建 1 个长为 1 000 mm、宽为 500 mm 平面,其中平面接触参数按照土壤接触参数设置,有利于模拟更接近于实际的效果,同时创建的平面横向中轴线与仿真模型纵向中轴线位于同一个平面。

2.3 材料间接触模型

EDEM 中设置了多种接触模型,其中 Hertz - Mindlin(no slip)模型是 EDEM 中默认接触模型,在计算力方面较为精确[25-26]。并且在小麦颗粒宽幅匀播过程不涉及小麦颗粒间的粘结作用,本文采用 Hertz - Mindlin(no slip)模型作为小麦颗粒与小麦颗粒间、小麦颗粒与匀种装置间、小麦颗粒与种床间接触模型。其中宽幅匀种装置的金属管、分种圆柱、分种板材料均采用铁属性,种床采用土壤材料属性。经查阅文献[27-29],确定小麦颗粒、匀种装置、种床材料,颗粒与接触材料间静摩擦因数与弹性恢复系数(表 1)。

表 1 材料间接触参数设置

Tab. 1 Settings of contact parameters between materials

参数	小麦[27]	铁[28]	土壤[29]
泊松比	0.29	0.30	0.50
剪切模量/Pa	5.08×10^{8}	7.00×10^{10}	1.00×10^{8}
密度/(kg·m^{-3})	1 350	7 800	1 200
动摩擦因数(与小麦间)	0.02	0.41	0.02
静摩擦因数(与小麦间)	1.25	0.32	1.25
碰撞恢复系数(与小麦间)	0.24	0.18	1.24

3 宽幅匀种装置播种过程仿真分析

3.1 仿真试验方法

小麦宽幅匀播机作业速度一般为 2~5 km/h[30-31],根据相关行业标准、文献[32-33]及设计要求,确定小麦播种机行进速度为 4.32 km/h(1.2 m/s),为使宽幅匀种装置模型运动过程相对简化,将宽幅匀种装置工作模型设置为静止,将种床设置为速度 -4.32 km/h 往后运动,模拟真实情况下小麦宽幅匀播机相对于地面的运动情况。设置仿真总时长为 10 s,根据当地农户需求以及不同播期设置不同播量,分别为 225、300、420 kg/hm^2,播量主要是通过 EDEM 软件中 Analyst 模块,对匀种装置内部排出的种子进行统计,根据播量进行 0.3 m×1 m 仿真统计区域推算需要的粒子数。将排种器进行多次不同转速调试,当仿真统计区域的种粒数满足要求时,说明该转速可满足播量需求。将排种器转速分别设置为 70、100、700 r/min 可满足播量需求。

3.2 宽幅匀播性能检测方法

为准确检测 EDEM 仿真作业中,不同结构参数匀种装置作业效果,制定宽幅匀种装置排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数检测方法[32-33]。根据图 1 所要求的宽幅匀播农艺要求,在宽幅匀种装置作业后,对种床上播种分布效果进行检测,以播种均匀性变异系数以及排量一致性变异系数为指标进行评价。具体测量方法:鉴于匀种装置宽度为 300 mm,为避免种子移动发生漏测,将种床宽度设置为 500 mm,在种床上设置 Grid Bin Group,在种床上添加 1 000 mm×300 mm×10 mm 网格,即选取中

间长度为 1 000 mm、宽度为 300 mm 作为小麦播种均匀性数据的测量区域，将中间区域分为 30 个单元格，每个单元格尺寸为 200 mm × 50 mm × 10 mm，如图 9 所示，对抽样网格中小麦种子数进行统计，其中 1 ~ 6 为行号，1 ~ 5 为列号。

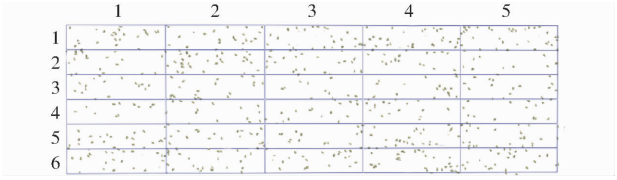


图 9　抽样区域数据收集示意图

Fig. 9　Data collection in sampling area

(1)播种均匀性测定

每次仿真试验结束后统计每个小网格中种子数，计算网格单元内小麦种子数标准差，计算得出小麦种子播种均匀性变异系数。

(2)排量一致性测定

由于幅宽 300 mm 范围较大，将 300 mm 幅宽分为 6 行进行排量一致性变异系数测定。各行种子在相同长度内，测定行内播种量分布一致性程度。

当分种圆柱安装位置处于被分流后小麦落点之间时，小麦种群能被分种圆柱均匀分流，各行间排量较为接近，排量一致性较高，均匀性程度较大；当分种圆柱安装位置处于被分流后小麦落点之外时，小麦种群易聚集，不能有效进行分流，各行排量差异较大，排量一致性较低，均匀性程度较低。

在每次仿真试验结束后统计各行种子数，计算行内小麦种子数标准差，计算得出排量一致性变异系数。

3.3　单因素试验

3.3.1　分种圆柱半径

仿真试验依次选取分种圆柱半径为 7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10.0、10.5 mm 进行单因素试验，不同分种圆柱半径下分种圆柱之间竖向距离和分种板倾斜角度分别取 35 mm 和 45°，材料为镀锌铁。由图 10 可知，当半径为 9 mm 时，播种量达到 225 kg/hm^2 时排量一致性变异系数最低，为 2.49%，播种均匀性变异系数最低为 25%。

3.3.2　分种圆柱竖向距离

依次选取分种圆柱竖向距离为 20、25、30、35、40、45、50 mm 不同结构进行小麦颗粒播种均匀性效果试验，7 种距离下分种圆柱半径以及分种板倾斜角度分别为 9 mm 和 45°。由图 10 可知，当分种圆柱竖向距离为 35 mm 时变异系数最低，分别为 2.13% 和 17%。

3.3.3　分种板倾斜角度

选取 30°、35°、40°、45°、50°、55°、60°共 7 种分种板倾斜角度进行种子均匀性效果试验。7 种结构下分种圆柱半径以及分种圆柱间竖向距离分别为 9 mm 和 35 mm。由图 10 可知，当倾斜角度为 45°时变异系数最低，分别为 3.18% 和 18%。

3.4　正交试验

3.4.1　正交试验设计

通过分析不同分种圆柱半径、分种圆柱间竖向距离、分种板倾斜角度的宽幅匀种装置分种效果，对宽幅匀种装置的结构参数进行优化。采用正交旋转组合试验，分析分种圆柱半径、分种圆柱竖向距离、分种板倾斜角度对宽幅匀种装置排量一致性变异系数、播种均匀性变异系数的影响，以排量一致性变异系数 Y_1(%)、小麦播种均匀性变异系数 Y_2(%)作为评价指标，在单因素试验基础上，选取分种圆柱半径为 8 ~ 10 mm、分种圆柱竖向距离为 30 ~ 40 mm，分种板倾斜角度为 35° ~ 55°，试验因素与编码如表 2 所示。

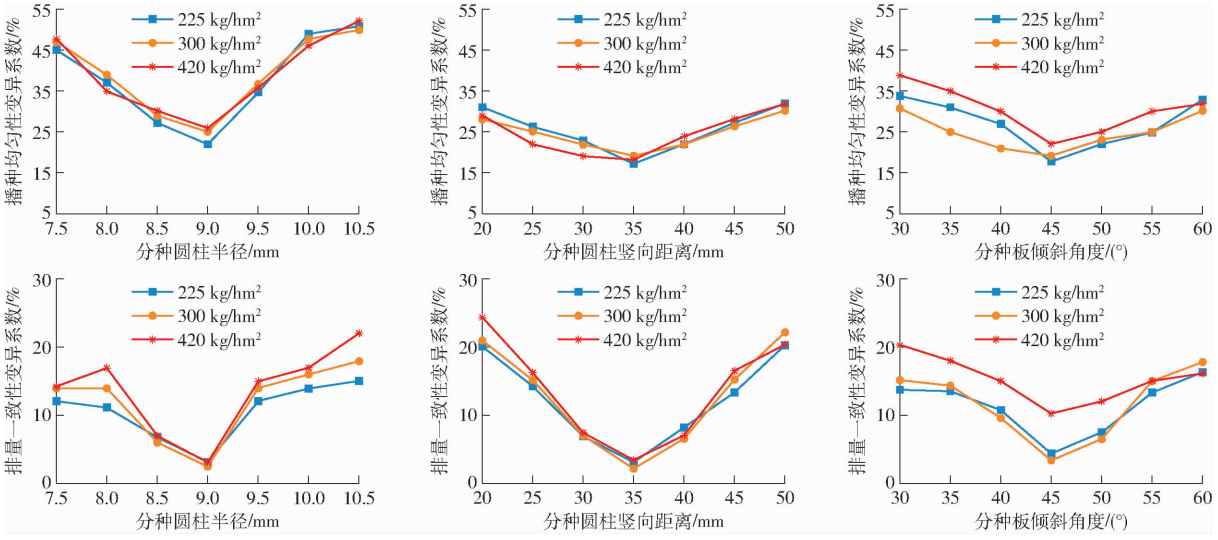


图 10　单因素仿真试验结果

Fig. 10　Single-factor simulation test results

表 2 试验因素与编码

Tab. 2 Test factors and coding

编码	因素		
	分种圆柱半径/mm	分种圆柱竖向距离/mm	分种板倾斜角度/(°)
-1	8	30	35
0	9	35	45
1	10	40	55

3.4.2 正交试验结果与分析

正交试验方案和结果如表 3 所示。

表 3 正交试验方案与结果

Tab. 3 Orthogonal test plan and results

方案	因素			Y_1/%	Y_2/%
	分种圆柱半径/mm	分种圆柱竖向距离/mm	分种板倾斜角度/(°)		
1	9	40	55	20.13	37.6
2	10	35	35	34.99	50.2
3	9	30	35	19.31	36.5
4	10	30	45	27.69	41.2
5	8	35	35	35.22	49.6
6	8	40	45	28.31	42.1
7	9	35	45	3.72	22.0
8	9	35	45	3.61	20.9
9	10	35	55	35.46	47.6
10	9	35	55	18.34	37.2
11	10	40	55	26.31	42.1
12	9	35	45	2.49	20.3
13	9	35	45	3.33	21.4
14	9	35	45	3.47	21.6
15	8	35	55	34.67	48.9
16	8	30	45	23.16	39.2
17	9	40	35	20.41	42.1

(1)排量一致性变异系数

根据仿真试验以及评价指标检测方法,排量一致性变异系数结果如表 3、4 所示。对仿真结果进行拟合,得到排量一致性变异系数回归方程为

$$Y_1 = 3.32 + 0.636\,3A + 0.832\,5B - 0.166\,2C - 1.13AB - 0.255\,0AC + 0.172\,5BC + 19.29A^2 + 3.75B^2 + 12.47C^2 \quad (12)$$

式中 A、B、C——因素编码值

由表 4 可知,排量一致性变异系数回归模型 $P<0.01$,自变量对于响应变量的影响极显著,而且失拟项 $P>0.05$,失拟项不显著;对排量一致性变异系数影响由大到小依次为分种圆柱竖向距离、分种圆柱半径、分种板倾斜角度,且具有交互作用。当分种圆柱半径为 9 mm、分种圆柱竖向距离为 35 mm、分种板倾斜角度为 45°时排量一致性变异系数最小为 2.49%。

表 4 排量一致性变异系数方差分析

Tab. 4 Analysis of variance of coefficient of variation for discharge consistency

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 478.16	9	275.35	603.55	<0.000 1 **
A	3.24	1	3.24	7.10	0.032 3 *
B	5.54	1	5.54	12.15	0.010 2 *
C	0.221 1	1	0.221 1	0.484 7	0.508 8
AB	5.13	1	5.13	11.25	0.012 2 *
AC	0.260 1	1	0.260 1	0.570 1	0.474 8
BC	0.119 0	1	0.119 0	0.260 9	0.625 2
A^2	1 566.84	1	1 566.84	3 434.38	<0.000 1 **
B^2	59.31	1	59.31	129.99	<0.000 1 **
C^2	654.79	1	654.79	1 435.26	<0.000 1 **
残差	3.19	7	0.456 2		
失拟	2.24	3	0.746 0	3.12	0.150 0
误差	0.955 5	4	0.238 9		
总和	2 481.36	16			

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

(2)播种均匀性变异系数

依据仿真试验以及评价指标检测方法,播种均匀性结果如表 3、5 所示。对仿真试验结果进行拟合,得到播种均匀性变异系数回归方程为

$$Y_2 = 21.24 + 0.162\,5A + 1.22B - 0.887\,5C - 0.5AB - 0.475\,0AC - 1.3BC + 15.32A^2 + 4.59B^2 + 12.52C^2 \quad (13)$$

表 5 播种均匀性变异系数方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of sowing uniformity coefficient of variation

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 924.22	9	213.80	456.35	<0.000 1 **
A	0.211 3	1	0.211 3	0.450 9	0.523 4
B	12.01	1	12.01	25.62	0.001 5 **
C	6.30	1	6.30	13.45	0.008 0 **
AB	1.00	1	1.00	2.13	0.187 4
AC	0.902 5	1	0.902 5	1.93	0.207 7
BC	6.76	1	6.76	14.43	0.006 7 **
A^2	987.90	1	987.90	2 108.64	<0.000 1 **
B^2	88.80	1	88.80	189.55	<0.000 1 **
C^2	659.74	1	659.74	1 408.19	<0.000 1 **
残差	3.28	7	0.468 5		
失拟	1.55	3	0.515 8	1.19	0.419 1
误差	1.73	4	0.433 0		
总和	1 927.50	16			

根据表 5 可知,播种均匀性变异系数回归模型 $P<0.01$,说明自变量对播种均匀性的影响极显著,且失拟项 $P>0.05$,说明失拟项不显著;对播种均匀性变异系数影响由大到小依次为分种圆柱竖向距

离、分种板倾斜角度、分种圆柱半径，且具有交互作用。当分种圆柱半径为 9 mm、分种圆柱竖向距离为 35 mm、分种板倾斜角度为 45°时播种均匀性变异系数最小为 20.3%。

4　验证试验

4.1　台架试验设计

为能有效和准确地验证仿真优化结果，验证所设计宽幅匀种装置工作性能，进行了台架验证试验。台架试验在前期设计制作的试验台上进行，如图 11 所示，以排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数为指标，通过台架试验，按照仿真试验最优值加工试制宽幅匀种装置，即分种圆柱半径 9 mm、分种圆柱竖直距离 35 mm、分种板倾斜角度 45°。

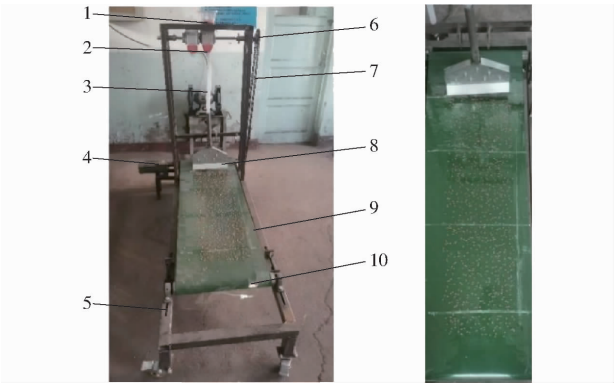


图 11　试验台架及匀种效果

Fig. 11　Test bench and homogenization renderings

1. 种盒　2. 排种器　3. 输种管　4. 可调速电机　5. 机架　6. 排种轴　7. 传动装置　8. 宽幅匀种装置　9. 皮带　10. 胶带

台架试验选用新冬 22 号种子，参照仿真试验条件设置皮带传动速度为 4.32 km/h，通过控制调速电机开关将排种器下种数设置为 3 个挡位，依次为 225、300、420 kg/hm^2。试验前在出种口套上塑料袋接排出种子。将排种器进行多次不同转速调试，当接种袋中的种子粒数与仿真的粒数一致时，说明该转速可满足播量需求，通过调节电机转速控制排种器转速从而实现 3 种不同播量调节。为防止小麦种子在皮带上跳动，在皮带表面铺设一层胶带，以增大传送带表面对小麦种子的粘结力，有效减小试验误差。台架作业结束后按照图 9 所示的数据检测方法，对传送带上小麦种子进行采集，重复 3 次并取平均值。

4.2　台架试验结果与分析

根据台架试验数据，计算小麦种子排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数，不同播量下排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数分别为 2.16% ~ 3.16% 和 18.6% ~ 22.36%，仿真试验与台架试验相对误差小于 5%，可认为仿真试验结果与台架试验结果基本一致。

4.3　田间试验

为进一步验证设计的宽幅匀种装置工作性能，于 2024 年 5 月 26 日在新疆维吾尔自治区昌吉市奇台县五马厂乡进行田间验证试验，如图 12 所示，试验动力源为 1204 型东方红拖拉机，试验时将播种机调至正常作业状态，将拖拉机前进速度设置为 4.32 km/h，将播量设置为 3 个挡位，即 225、300、420 kg/hm^2，每组重复试验 3 次。播种结束后，根据文献[32 - 33]试验方法将 3 种播量地段各按照五点法取 5 段测量区域，每段测量区域长为 1 m，宽为 300 mm，按照图 9 将测量区域分为 6 行，统计测量区域内小麦数量，计算排量一致性变异系数；测量完毕再将测量区域按照图 9 划分为 6 行 5 列 30 个小区域，统计测量区域内种子数，计算播种均匀性变异系数。试验结果如表 6 所示。



(a) 田间试验　　(b) 宽幅农艺麦苗长势

图 12　田间试验结果

Fig. 12　Field experiments result

表 6　田间验证试验结果

Tab. 6　Results of field validation experiments

参数	播量/(kg·hm^{-2})		
	225	300	420
Y_1/%	2.39	2.31	3.68
Y_2/%	20.49	19.33	20.69

5　结论

(1)基于幅宽 300 mm、行距 300 mm、滴灌带铺设于苗带中间位置宽幅农艺模式，设计了一种基于分种圆柱组合排布多级分流打散的宽幅匀种装置，理论分析并确定了宽幅匀种装置基本结构参数；建立了以分种圆柱半径、分种圆柱竖向距离、分种板倾斜角度作为因变量的匀种装置结构数学模型。

(2)利用 EDEM 仿真软件构造了能模拟宽幅匀种装置工作过程的仿真试验平台，以排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数为作业效果评级指标，进行单因素仿真试验，结果表明，当分种圆柱半径为 8 ~ 10 mm、分种圆柱竖直距离为 30 ~ 40 mm、分种板倾斜角度为 35° ~ 55°时，宽幅匀种装置具有较好播种效果。

(3)进行正交旋转组合试验，建立了以分种圆

柱半径、分种圆柱竖向距离、分种板倾斜角度 3 个因素与排量一致性变异系数以及播种均匀性变异系数的回归方程,结果表明,影响排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数的主次因素均为分种圆柱竖向距离、分种板倾斜角度、分种圆柱半径。当分种圆柱半径、分种圆柱竖直距离和分种板倾斜角度分别为 9 mm、35 mm 和 45°时,宽幅匀种装置具有较好播种效果。

(4)通过台架验证试验以及田间验证试验对宽幅匀种装置结构参数优化最终结果进行试验验证,结果表明,各播量下台架试验小麦种子排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数分别不大于 3.16% 和 22.36%,田间验证试验小麦排量一致性变异系数和播种均匀性变异系数分别不大于 3.68% 和 20.69%,台架试验与田间试验结果和仿真试验相对误差小于 5%,说明宽幅匀种装置结构参数优化可信,能满足小麦幅宽 300 mm、行距 300 cm、滴灌带位于苗带中间宽幅种植农艺模式要求。

参 考 文 献

[1] 刘录祥. 我国小麦产业科技创新发展现状与展望[J]. 寒旱农业科学,2024,3(6):491 - 494.
LIU Luxiang. The current situation and prospect of scientific and technological innovation and development of wheat industry in China[J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2024,3(6): 491 - 494. (in Chinese)

[2] 卢春燕. 我国小麦生产现状与提高小麦生产能力的思考[J]. 南方农业,2021,15(30):177 - 178.

[3] 王浩莎,曹润宁,黄兴法. 不同品种春小麦生长生理指标及产量对水分响应研究[J]. 灌溉排水学报,2024,43(10):1 - 10,54.
WANG Haosha, CAO Running, HUANG Xingfa. Impact of water stress on physiological traits and yields of different varieties of spring wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(10): 1 - 10, 54. (in Chinese)

[4] 师范生. 旱地冬小麦品种晋麦 100 号丰产性、稳产性及适应性分析[J]. 现代农业科技,2024(19):1 - 4,23.
SHI Fansheng. Analysis on high-yield ability, stable-yield ability and adaptability of dryland winter wheat variety Jinmai 100 [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(19): 1 - 4,23. (in Chinese)

[5] 陆宇航. 发挥政策性金融优势推动亚太地区农业与社会经济发展[N]. 金融时报,2023 - 09 - 07(001).

[6] 吴霞. 粮食安全探赜:时代意蕴、问题溯源、保障之策[J]. 农业经济,2024(11):3 - 6.

[7] 丰明,王英杰,王术,等. 灌溉模式和播种密度对东北地区春小麦光合效率及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2024,42(6):69 - 79.
FENG Ming, WANG Yingjie, WANG Shu, et al. Effects of irrigation mode and sowing density on photosynthetic efficiency and yield of spring wheat in Northeast China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024,42(6):69 - 79. (in Chinese)

[8] 连艳玲,左珂妤,姜楠,等. 农业现代化视域下粮食安全审计问题研究[J]. 商业经济,2024(11):139 - 141.

[9] 席天元,赵海祯,梁哲军,等. 组合播种方式对小麦群体及产量形成的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(18):185 - 188.
XI Tianyuan, ZHAO Haizhen, LIANG Zhejun, et al. Effect of combination sowing method on population and yield formation of winter wheat[J]. China Agriculture Science Bulletin, 2014,30(18): 185 - 188. (in Chinese)

[10] 裴永国. 小麦宽幅匀播高产种植技术优势与要点[J]. 中国农业文摘-农业工程,2024,36(3):93 - 96.
PEI Yongguo. Advantages and key points of high-yield planting of wheat [J]. China Agricultural Digest-Agricultural Engineering, 2024,36(3): 93 - 96. (in Chinese)

[11] 陈桂平,程辉,范虹,等. 绿洲灌区宽幅匀播和传统条播春小麦产量对水氮减量的适应性研究[J]. 中国农业科学,2023,56(13):2461 - 2473.
CHEN Guiping, CHENG Hui, FAN Hong, et al. Study on adaptability of spring wheat yield to water and nitrogen reduction under wide-width uniform sowing and conventional strip sowing in oasis irrigated regions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023,56(13):2461 - 2473. (in Chinese)

[12] 李书红. 小麦宽幅匀播关键技术[J]. 河南农业,2021(13):46.

[13] 晁长艳,高玉红,胡亚朋,等. 增密扩幅对胡麻光合特性、干物质积累规律与产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2024,46(5):1090 - 1099.
CHAO Changyan, GAO Yuhong, HU Yapeng, et al. Effects of increasing density and width on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield of oilseed flax[J]. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 2024,46(5):1090 - 1099. (in Chinese)

[14] NOOR H. 播种方式与氮肥对旱地冬小麦水氮利用及产量形成的调控研究[D]. 太原:山西农业大学,2022.
NOOR H. Effects of different sowing methods, and nitrogen fertilizer on water utilization and yield formation in dryland winter wheat[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2022.

[15] 胡箭卫,刘广才,周德录,等. 小麦宽幅匀播高产栽培技术研究与示范推广[Z]. 甘肃省农业技术推广总站,2016 - 12 - 10.

[16] 陈廷. 不同播幅和种植密度对小麦干物质分配、产量和品质的影响[D]. 贵阳:贵州大学,2022.
CHEN Ting. The effect of different sowing and planting density on dry matter distribution, yield and quality of wheat[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022. (in Chinese)

[17] 李庆雪,郭元章,何煦,等.小麦智能化复合式施肥旋耕播种宽幅匀播机:202120272576.9[P].2021-11-02.
[18] 张廷龙,刘继泽,赵忠良,等.一种宽幅匀播播种滴灌一体机:202120848868.2[P].2021-08-31.
[19] 李庆雪,李骥,吕钢,等.小麦智能化宽幅匀播机:201920656210.4[P].2020-05-08.
[20] 骆佳明.小麦匀播播种机设计及试验研究[D].镇江:江苏大学,2019.
LUO Jiaming. Design and experimental study of wheat uniform seeder[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (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].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)
[22] 曹瑶瑶.小麦旋耕施肥宽幅精密播种复式机的设计[D].泰安:山东农业大学,2016.
CAO Yaoyao. Design of wide-range precision seeding duplex machine for wheat rotary tillage and fertilization[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[23] QI Long, YING Chen. Simulations of soil flow properties using the discrete element method (DEM)[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2019,157: 254-260.
[24] 贺一鸣,吴明亮,向伟,等.离散元法在农业工程领域的应用进展[J].中国农学通报,2017,33(20):133-137.
HE Yiming, WU Mingliang, XIANG Wei, et al. Application progress of discrete element method in agricultural engineering[J]. China Agriculture Science Bulletin, 2017,33(20): 133-137. (in Chinese)
[25] 窦泽宇,任腾,王德喜.永磁直驱式艾萨磨机搅拌盘与筒壁间距对磨矿性能的影响[J].矿业研究与开发,2024,44(10):207-214.
DOU Zeyu, REN Teng, WANG Dexi. Influence of the spacing between mixing pan and cylinder wall of permanent magnet direct drive IsaMill on the grinding performance[J]. Mining Research and Development, 2024,44(10): 207-214. (in Chinese)
[26] LUPO M, SOFIA D, BARLETTA D, et al. Calibration of DEM simulation of cohesive particles[J]. Processes, 2021,9(10): 1715.
[27] 刘凡一,张舰,李博,等.基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J].农业工程学报,2016,32(12):247-253.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(12): 247-253. (in Chinese)
[28] 纪玉杰,薛宏达,李成华.玉米精密排种器工作过程的离散元仿真分析[J].计算机仿真,2013,30(3):393-397.
JI Yujie, XUE Hongda, LI Chenghua. Simulation analysis of working process for corn seed metering device based on discrete element method[J]. Computer Simulation, 2013,30(3): 393-397. (in Chinese)
[29] 郑侃,何进,李洪文,等.基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J].农业机械学报,2016,47(9):62-72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9): 62-72. (in Chinese)
[30] 叶伟伟,奚小波,金亦富,等.双轴旋耕施肥贴地播种复式作业机设计与试验[J].中国农机化学报,2019,40(2):6-12.
YE Weiwei, XI Xiaobo, JIN Yifu, et al. Design and experimental research of double axis rotary tillage fertilizing and land seeding compound operation machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(2): 6-12. (in Chinese)
[31] 史乃煜,陈海涛,叶俊宏,等.华东稻麦轮作区立旋自走电驱动式定角度清秸机设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(8):127-137.
SHI Naiyu, CHEN Haitao, YE Junhong, et al. Design and experiment of vertical rotating self-propelled fixed-angle straw cleaning machine in east China rice and wheat crop rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(8): 127-137. (in Chinese)
[32] 中华人民共和国农业部,旋耕施肥播种联合作业机作业质量:NY/T 1143—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
[33] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,谷物条播机试验方法:GB/T 9478—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.