doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.005

稻麦轮作区气动式小麦精准投种装置设计与试验

王　超[1]　李洪文[1]　何　进[1]　王庆杰[1]　卢彩云[1]　王景旭[2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 温州大学机电工程学院, 温州 325035)

摘要: 为实现稻麦轮作区黏湿土壤条件下的小麦精量播种,设计了一种气动式小麦精准投种装置,该装置通过气动加速将小麦种粒高速精准投置于清洁土壤内。以稳态气体流速、入口负压为试验指标,出气室直径、喉嘴距和接收室直径为影响因素,利用 Fluent 分析进行气动式小麦精准投种装置的关键结构参数设计。Fluent 分析结果表明:该装置的较优组合为出气室直径为 6 mm、喉嘴距为 10 mm、接收室直径为 32 mm,此时稳态气体流速为 524 m/s,入口负压为 15.966 kPa。较优参数组合下的投种性能台架试验结果表明:当作业速度为 1.2 m/s、投种高度为 0.1 m、进气室压力为 0.5 MPa 时,小麦种粒可高速冲击进入土壤,实现高速精准稳着床点播、且无破损,平均投种速度为 43.8 m/s,平均投种深度 6.78 mm,投种速度、投种深度变异系数分别为 8.3%、5.8%,投种性能稳定。

关键词: 稻麦轮作区; 小麦; 精准投种; 气动式
中图分类号: S223.2+3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)05-0043-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Pneumatic Wheat Precision Seed Casting Device in Rice-wheat Rotation Areas

WANG Chao[1]　LI Hongwen[1]　HE Jin[1]　WANG Qingjie[1]　LU Caiyun[1]　WANG Jingxu[2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Wenzhou University*, *Wenzhou* 325035, *China*)

Abstract: In order to realize wheat precision seeding under clay-wet soil conditions of rice-wheat rotation area, a pneumatic wheat precision seed casting device was developed that casting wheat to clean seedbeds fast and accurately by pneumatic acceleration. The influence of key structural parameters of outlet chamber diameter, throat distance and convergent chamber diameter on velocity of steady gas flow and inlet negative pressure, as test indicators, were studied by numerical simulation and analysis of Fluent software. Analysis results by Fluent showed that the parameter combination of pneumatic wheat precision seed casting device was as follows: diameter of outlet chamber was 6 mm, throat distance was 10 mm and convergent chamber diameter was 32 mm obtained by single factor test as well as three factors and three levels orthogonal experiment. Under this parameter conditions, the velocity of steady gas flow was 524 m/s and inlet negative pressure was 15.966 kPa, by simulation. Wheat seed casting performance experiment, based on better parameter combination, by test-bed indicated that wheat seed can be casted into soil at high speed to achieve accurate and stable single seed sowing without damage while working speed was 1.2 m/s, casting height was 0.1 m and air pressure was 0.5 MPa. Moreover, the average vesting velocity was 43.8 m/s, average depth was 6.78 mm, and the coefficient of variation of vesting velocity and average depth was 8.3% and 5.8%, respectively, which showed the stable performance of pneumatic seed casting.

Key words: rice-wheat rotation areas; wheat; precision seed casting; pneumatic

0　引言

稻麦轮作区集中分布于我国长江流域,是主要粮食生产基地[1]。该区域降雨充沛、土壤质地黏重,播种阶段土壤含水量大[2],小麦生长受水资源限制小[3],适宜采用浅播浅种的农艺方式[4-5],与北

收稿日期: 2019-08-12　修回日期: 2019-10-15
基金项目: 现代农业产业技术体系建设项目(CARS-03)
作者简介: 王超(1991—),男,博士生,主要从事小麦耕播技术与装备研究,E-mail: superwang_999@sina.com
通信作者: 李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

方相比差异较大。目前,稻麦区小麦播种以撒播或种带浅旋条播技术为主,存在播种用量高、群体密度大和个体发育差等问题,限制了小麦单产。小麦精量播种技术能够精确控制播种量和均匀性,使得单株作物获得足够的营养面积和空间[6-7],降低播种量和减少成本,并获得小麦稳产高产,如汤永禄等[8]研究表明,采用稻茬麦精量露播、稻草覆盖的种植方式,能够实现稻茬麦的高产栽培,且经济环境效益较好。

近年来,为实现机械化小麦精量播种,国内外在小麦精密排种技术方面取得了一些研究成果[9-10],然而小麦属密植作物,其播种密度远高于玉米、大豆等大籽粒作物,精密排种装置排出的均匀种子流种粒间距小,小麦种粒触土后易产生碰撞、弹跳和滚动等现象[11-12],无法实现等播深、等粒距的小麦精准点播,因此小麦精准投种问题亟待解决。现有精准投种方面的研究大多针对玉米等作物[13-15],而关于小麦精准投种技术的研究较少,仅少数学者进行了初步理论研究。刘俊孝等[16]基于气力吸附、定点打穴投种理论,设计了一种针孔管式小麦精准点播装置,并确定了其主要结构参数,但未进行小麦精准投种相关试验研究。刁培松等[17]提出一种气动播种理论方案,该方案通过单片机控制使种粒在气力作用下实现精准投播,但未开展实际装置结构及关键参数设计研究。目前,仍然缺少配套的机械化小麦精准投种技术与装备。

本文针对稻麦轮作区黏湿土壤条件下的小麦种植,设计一种气动式小麦精准投种装置,该装置通过气动加速将从精密排种器排出的小麦种粒高速精准投置于耕整后的清洁种床,以期实现小麦的精准稳着床点播,提升小麦的播种质量。

1 主要结构设计

1.1 结构与工作原理

气动式小麦精准投种装置根据引射器引射原理[18]设计而得,利用高速气流的气动推力实现对小麦种粒的加速投置,其主要由喷嘴、引射器和混合加速管组成,如图 1a 所示。作业时,外部高压气流作为工作流体从喷嘴的进气室流入后形成高速气流经出气室喷出,喷嘴喷出的高速气流在引射器内部腔体形成负压和在混合加速室内形成稳定的正压加速气流,小麦种粒在负压的卷吸作用下从进种口被快速吸入,并经接收室随高速气流进入混合加速室,小麦种粒在混合加速室内与正压加速气流均匀混合后持续加速,最终小麦种粒从混合加速管下端飞出,高速冲击进入土壤,完成小麦种粒精准定点投置。

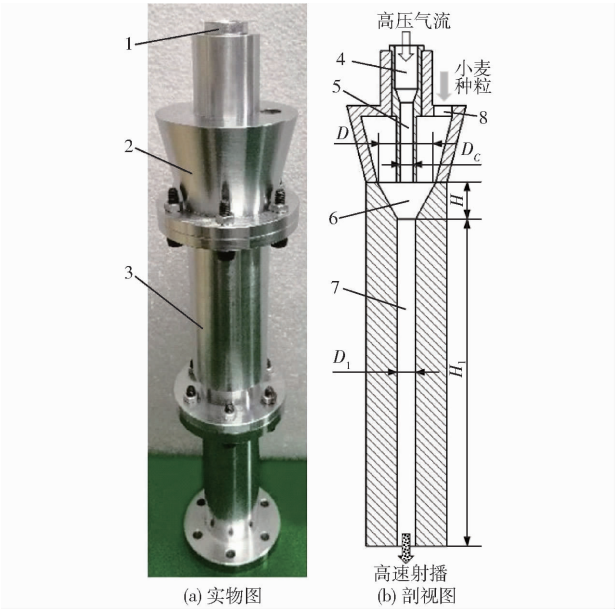


图 1 气动式小麦精准投种装置

Fig. 1 Structure of pneumatic wheat precision seed casting device

1. 喷嘴 2. 引射器 3. 混合加速管 4. 进气室 5. 出气室 6. 接收室 7. 混合加速室 8. 进种口

1.2 关键结构参数设计

小麦种粒的尺寸是气动式小麦精准投种装置结构参数设计的基础,以稻麦区普遍种植的郑麦 9023 为研究对象,测量得郑麦 9023 的种粒长度小于 8 mm。为保证小麦能够被顺利吸入,该设计中选取进种口直径为 10 mm。小麦种粒在混合加速室内加速,为减少小麦种粒与混合加速室管壁的摩擦、碰撞,混合加速室直径 D_1 应大于 8 mm,但混合加速室直径增大会导致气体进一步膨胀[19],进而降低加速气流流速[20],不利于小麦种粒的加速,因此结合单粒种子流的投种工况,混合加速室直径应尽可能取较小值,该设计取混合加速室直径为 10 mm;根据文献[21]可知,混合加速室的长度应当满足小麦种粒与加速流场充分混合并实现小麦种粒稳定加速,该设计中混合加速室长度 H_1 取 300 mm。此外,由于喷嘴入口与标准耐压气动软管相互连接,因此进气室直径选取与耐压气动软管的内径尺寸一致,为 12 mm。

气动式小麦精准投种装置采用无扩压喷射结构[22],根据已有研究表明,截面比 A、喉嘴距 H 和接收室直径 D 是影响小麦气动射播的关键结构参数[23],如图 1b 所示。

1.2.1 截面比

截面比 A 定义为混合加速室截面积与出气室截面积之比,即

$$A = \frac{A_1}{A_C} = \left(\frac{D_1}{D_C}\right)^2 \tag{1}$$

式中　A_1、A_C——混合加速室截面积和出气室截面积，mm^2

D_1、D_C——混合加速室直径和出气室直径，mm

为实现投种装置的引射功能，出气室直径应小于进气室直径和混合加速室直径，同时考虑到若出气室直径过小，高压气流经进气室进入出气室时的气动阻力及损失会急剧增大[20,22]，因此取出气室直径 D_C 为 4 ~ 9 mm。此外，由于混合加速室直径 D_1 = 10 mm 已知，故在下文中以出气室直径 D_C 作为试验的影响因子。

1.2.2　喉嘴距

喉嘴距 H 为喷嘴的出气室出口与混合加速管的混合加速室入口之间的距离。目前，研究发现喉嘴距存在一个能够实现最佳引射效果的数值，此时出气室喷出的高速气流终截面与混合加速室入口截面相等[24]。但对该值的计算还没有公认准确的方法[22,25]，因此本文借鉴通用喷射器结构参数选取喉嘴距 H 为 5、10、15、20、25、30 mm 进行数值分析研究。

1.2.3　接收室直径

为确保小麦种粒能够顺利进入接收室，避免小麦种粒在引射器腔体内产生拥堵，接收室直径 D 应当满足

$$D \geqslant 2(l+\delta) + D_C \tag{2}$$

式中　l——小麦种粒长度，mm

δ——喷嘴壁厚，mm

该设计中喷嘴壁厚 δ 为 1.5 mm，结合前文分析将小麦种粒长度 l = 8 mm 和出气室直径 D_C 最大值 9 mm代入式(2)，求解可得接收室直径 $D \geqslant 28$ mm。此外，接收室直径增大会降低气体流线流畅性和增加气流动能损耗，进而不利于降低小麦种粒的吸入与混合，因此接收室直径应取较小值，因此该次设计选取接收室直径 D 为 28、30、32、34、36、38 mm 进行数值分析研究。

1.3　小麦种粒气动加速特性分析

在气动式小麦精准投种装置内，小麦种粒受正压加速气流作用不断加速，根据前期研究小麦种粒受自身重力加速影响很小，故本次分析忽略重力影响，则小麦种粒的气动加速特征分析如图 2 所示。

小麦种粒在正压加速气流的气动推力作用下做加速运动，经过时间 t 后位移为 l_m，其加速方程为

$$R_m = \frac{\pi d_m^3 \rho_m}{6} \frac{\mathrm{d}v_m}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中　R_m——气动推力，N

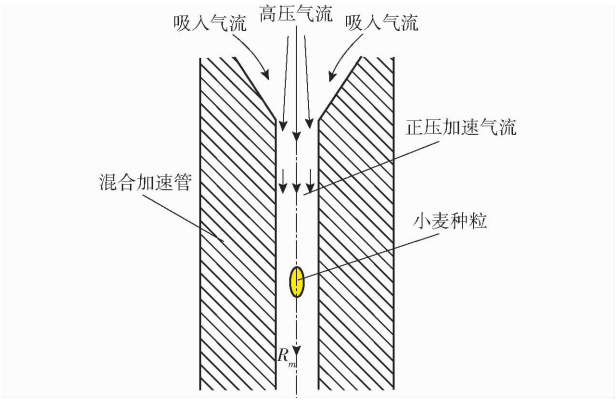


图 2　小麦种粒气动加速特征分析

Fig. 2　Analysis of pneumatic acceleration characteristics of wheat seeds

d_m——小麦种粒当量直径，取 4.5×10^{-3} m

ρ_m——小麦种粒密度，取 1 450 kg/m^3

v_m——小麦种粒速度，m/s

气动推力计算式为

$$R_m = C \frac{\pi \rho_g d_m^2}{8} (v_g - v_m)^2 \tag{4}$$

式中　C——小麦种粒阻力系数，由粒径法[26]可得，小麦种粒阻力系数分区为 Newton 区，阻力系数为常数，取 0.44

ρ_g——空气密度，按 20℃大气压，取 1.2 kg/m^3

v_g——正压加速气流速度，m/s

由式(3)、(4)求解可得，小麦种粒在正压加速气流中的气动加速特征运动微分方程为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}v_m}{\mathrm{d}t} = \dfrac{3C\rho_g}{4d_m\rho_m}(v_g - v_m)^2 \\ \dfrac{\mathrm{d}l_m}{\mathrm{d}v_m} = \dfrac{4v_m d_m \rho}{3C\rho_g (v_g - v_m)^2} \end{cases} \tag{5}$$

由式(5)可知，小麦种粒加速度与正压加速气流速度呈正相关关系，即正压加速气流速度越大，越有利于小麦种粒的气动加速。由前述分析可知，出气室直径 D_C、喉嘴距 H 和接收室直径 D 是影响气动式小麦精准投种装置内部流场的关键结构参数，通过关键结构参数的合理匹配，可在混合加速室内获得均匀稳定的正压加速流场和较高正压加速气流流速，进而利于小麦种粒的加速投种。

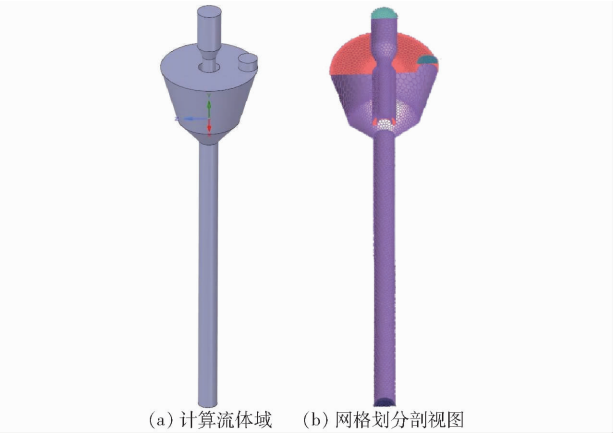
2　数值模型构建

计算流体力学(CFD)广泛应用于农业工程领域，能够精确分析流场特性[27-28]。气动式小麦精准投种装置的内部气体流动复杂，难以通过实际试验进行特性描述，因此本文采用 Fluent 18.4 软件对气动式小麦精准投种装置的内部气体流场进行模拟分析，以获得均匀稳定的气体加速流场，完成小麦种粒

的负压吸入、正压加速,进而实现小麦精准稳着床点播。

2.1 计算域及网格化

采用 SolidWorks 2016 软件构建不同尺寸的气动式小麦精准投种装置模型,并导入 Spaceclaim 2018 软件建立计算流体域模型,如图 3a 所示。随后在 Fluent 18.4 软件中对计算流体域进行六面体网格划分,并在近壁面生成边界层网格,划分所得网格总数为 12 000 ~ 14 000。为提高计算精度,对喷嘴进行网格局部加密,同时检查并调整网格质量,使网格最小正交质量大于 0.6、最大纵横比小于 100,网格划分结果如图 3b 所示。



(a) 计算流体域 (b) 网格划分剖视图

图 3 计算流体域及网格划分结果

Fig. 3 Computational fluid domain and meshing results

2.2 边界条件与模拟参数

对于不同尺寸的气动式小麦精准投种装置模型,结合前期研究,在计算流体域中设置进气室处为压力入口(入口表压为 500 000 Pa)边界条件,设置进种口和混合加速室出口均为压力出口(出口表压均为 0 Pa)边界条件。模拟整体采用有限体积法离散方程,采用压力基求解器 SIMPLE,采用二阶逆风离散化求解动量、湍流动能、湍流动能耗散,以残差 10^{-4} 为收敛依据并对进气室气体流速进行监测。湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 控制方程[29-30],近壁面选用标准壁面方程。

3 数值模拟与分析

3.1 单因素试验

以出气室直径 D_C、喉嘴距 H 和接收室直径 D 为影响因子,以混合加速室稳态区的稳态气体流速、进种口的入口负压为指标,开展单因素试验研究。单因素试验因素及水平如表 1 所示。

3.1.1 出气室直径

设置喉嘴距 H 为 15 mm、接收室直径 D 为 32 mm,开展出气室直径 D_C 的单因素试验,所得不同截面比下气动式小麦精准投种装置对称截面上的速度场如图 4 所示。

表 1 单因素试验因素水平

Tab. 1 Factors and levels of single-factor test

水平	因素		
	出气室直径 D_C/mm	喉嘴距 H/mm	接收室直径 D/mm
1	4	5	28
2	5	10	30
3	6	15	32
4	7	20	34
5	8	25	36
6	9	30	38

由图 4a 可得,高压气流经喷嘴的出气室实现超声速(约 924 m/s)流动,超声速气流从喷嘴喷出后在混合加速室内形成激波,经过不断的压缩膨胀过程[31],激波逐渐消失并在混合加速室内形成具有均匀稳定正压加速气流流场的稳态区。不同出气室直径下的激波区范围不同,由于降低激波区范围有利于降低流场的湍流程度[16],使得小麦种粒在混合加速室内的加速过程更加平稳,出气室直径为 4、7、8 mm时稳态区范围较大,可获得较好正压加速气流流场。由图 4b 可得,当出气室直径 $D_C \leqslant 7$ mm 时,进种口下部未产生局部涡流区,气体的吸入流线通顺,利于小麦种粒的稳定吸入;当出气室直径 D_C 为 8、9 mm 时,超声速气流撞击接收室壁面而在进种口下部产生局部涡流区,由于涡流不仅会显著降低入口负压[32],进而不利于小麦种粒的均匀吸入,且会增加小麦种粒吸入后的碰撞几率,因此出气室直径 $D_C \leqslant 7$ mm 时较好。

通过 Fluent 数值提取功能,得到出气室直径对试验指标的影响如图 5 所示。由图 5 可得,随着出气室直径的不断增大,稳态气体流速呈不断上升趋势,其取值区间为 336 ~ 724 m/s。入口负压随出气室直径的增大而呈现波动变化趋势,当出气室直径为 4 ~ 5 mm 时,入口负压随出气室直径的增加而略有增加;当出气室直径为 5 ~ 9 mm 时,入口负压随出气室直径的增大而不断降低。入口负压在出气室直径 $D_C = 5$ mm 时取得最大值 18.864 kPa;入口负压在出气室直径 $D_C \geqslant 7$ mm 时,由于涡流的产生而导致入口负压急剧降低,且当出气室直径 $D_C = 9$ mm 时涡流作用下的部分气流从进种口处溢出(图 4b),使得入口负压达到最小值 1.560 kPa。

综合考虑,在避免涡流且保证较大入口负压的同时,稳态气体流速越大越有利于小麦种粒在混合加速室内的加速,因此出气室直径 $D_C = 7$ mm 较合适,此时进种口下部无局部涡流、激波区较小,入口

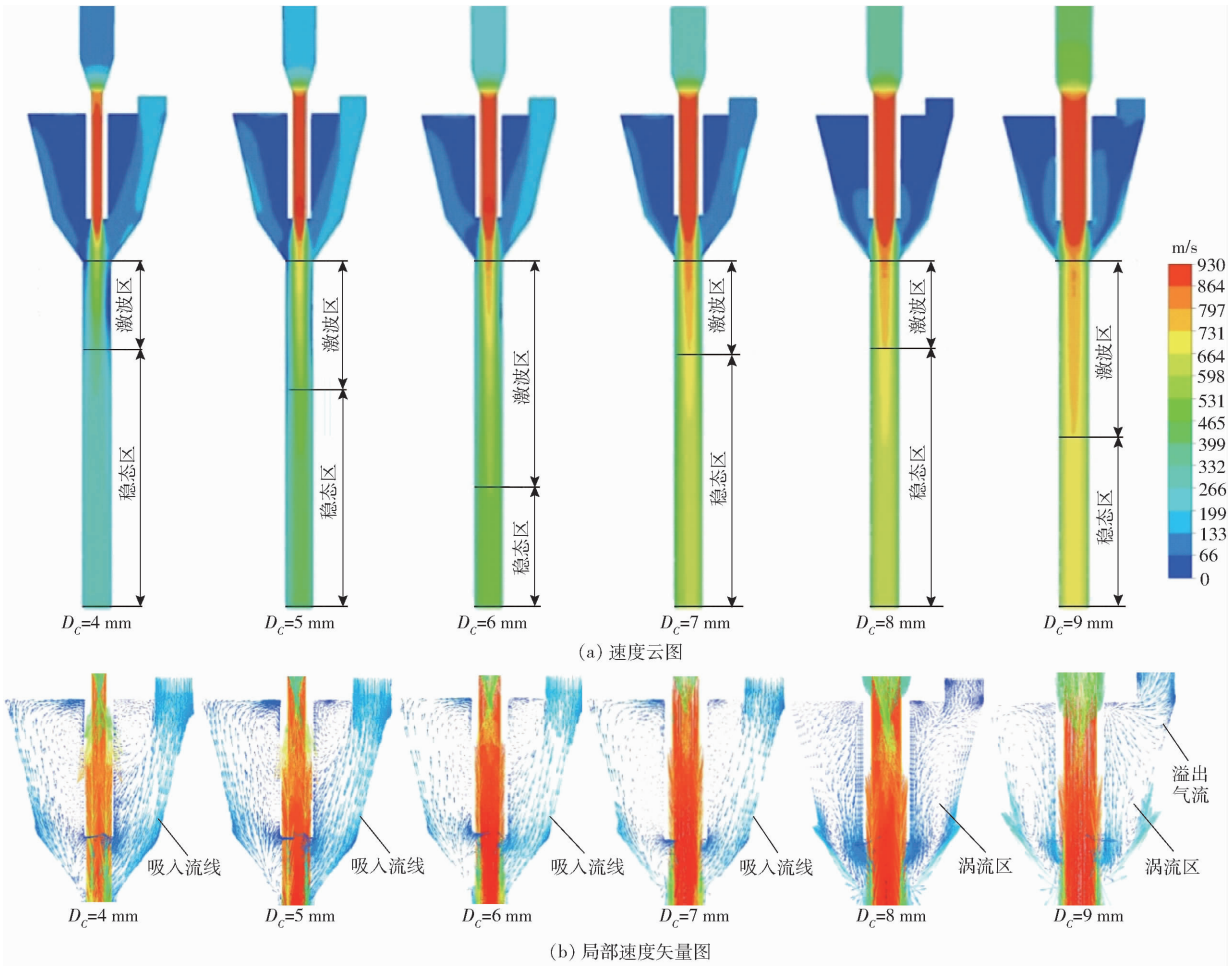


图 4　出气室直径单因素试验速度场

Fig. 4　Velocity fields of single factor test for diameter of outlet chamber

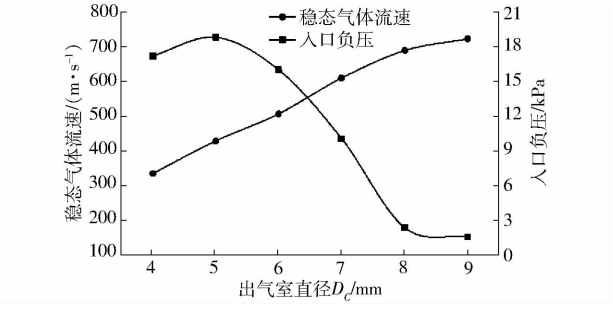


图 5　出气室直径对试验指标的影响

Fig. 5　Effect of diameter of outlet chamber on test indexes

负压为 10.081 kPa，稳态气体流速为 611 m/s。

3.1.2　喉嘴距

设置出气室直径 D_C 为 7 mm、接收室直径 D 为 32 mm，开展喉嘴距 H 的单因素模拟试验，所得试验结果如图 6 所示。

由图 6a 可得，随着喉嘴距的增加，超声速气流从喷嘴喷出后在接收室内的膨胀程度得到提高，有利于减小混合加速室内的激波强度和增加稳态区范围。当喉嘴距 $H \geqslant 25$ mm 时，混合加速室内无明显激波区且正压加速气流流场稳定；喉嘴距 H 为 15、20 mm 时的稳态区范围大于喉嘴距 H 为 5、10 mm，更有利于小麦种粒在混合加速室内的加速。由图 6b 可得，当喉嘴距 $H \leqslant 20$ mm 时，进种口下部未产生局部涡流区，吸入流线通顺，利于小麦种粒的稳定吸入；当喉嘴距 H 为 25 mm 和 30 mm，超声速气流撞击接收室壁面而产生局部涡流区，不利于小麦种粒的均匀吸入。因此，喉嘴距 H 取 15 mm 或 20 mm 较好。

喉嘴距对试验指标的影响如图 7 所示。由图 7 可得，随着喉嘴距的逐渐增加，入口负压呈现不断降低趋势，其变化区间为 4.317 ~ 11.1 kPa，同时由于涡流的产生，当喉嘴距 $H > 20$ mm 时导致入口负压大幅降低。稳态气体流速随喉嘴距的增加呈现波动变化趋势，当喉嘴距为 5 ~ 15 mm 时，受接收室和混合加速室内产生的局部气体节流效应影响，稳态气体流速呈现先下降后上升趋势，并在 $H = 10$ mm 处取得稳态气体流速极小值 598 m/s；当喉嘴距为 15 ~ 30 mm 时，稳态气体流速随喉嘴距的增加而降低。

综上所述，喉嘴距 $H = 15$ mm 较合适，此时进种口下部无局部涡流、激波区较小，且入口负压(10.081 kPa)和稳态气体流速(611 m/s)的数值均

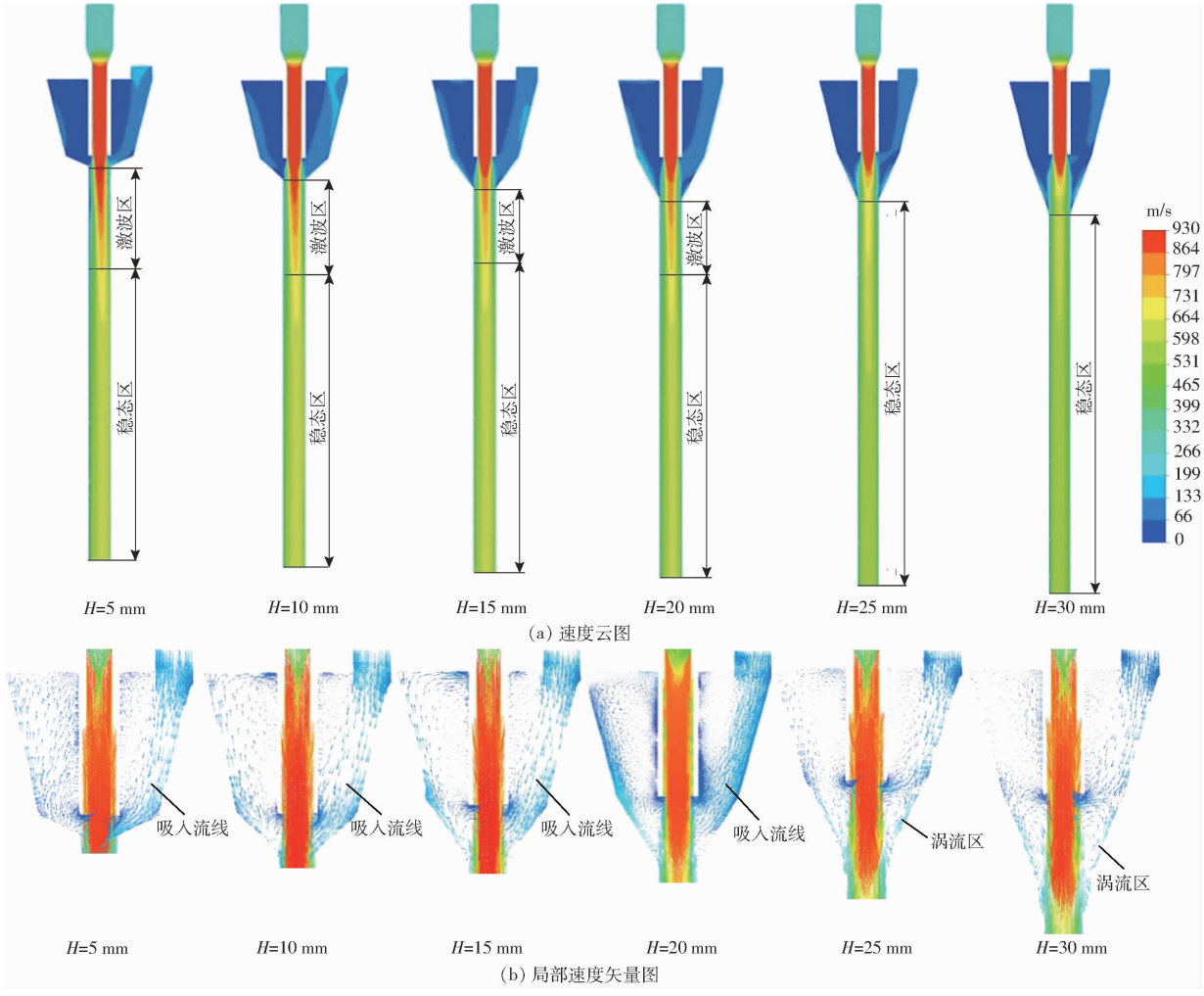


图 6 喉嘴距单因素试验速度场

Fig. 6 Velocity fields of single factor test for nozzle position

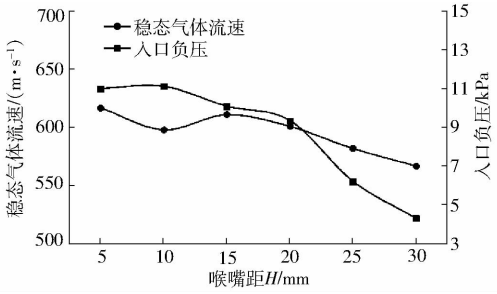


图 7 喉嘴距对试验指标的影响

Fig. 7 Effect of nozzle position on test indexes

较大。

3.1.3 接收室直径

设置出气室直径 D_C 为 7 mm、喉嘴距 H 为 15 mm,开展接收室直径 D 的单因素模拟试验,所得试验结果如图 8 所示。

由图 8 可得,不同接收室直径下的激波区范围差异不大,以接收室直径 D 为 32、34、38 mm 时的激波区范围最小。在接收室直径 28 ~ 38 mm 范围内均无涡流出现,且当接收室直径为 28、30、32 mm 时,气体进入接收室时的吸入流线更加流畅。

接收室直径对试验指标的影响如图 9 所示。由图 9 可得,随着接收室直径的不断增加,稳态气体流速和入口负压均呈现先增大后降低的趋势,其变化范围分别为 592 ~ 611 m/s、8.471 ~ 10.081 kPa。当接收室直径 D = 32 mm 时,稳态气体流速和入口负压均取得最大值。

综上所述,接收室直径 D = 32 mm 较合适,此时进种口下部无局部涡流、激波区最小,稳态气体流速(611 m/s)和入口负压(10.081 kPa)均取得最大值。

3.2 正交试验

根据单因素试验分析结果,采用三因素三水平正交试验方案,正交试验因素及水平如表 2 所示。

正交试验方案及结果如表 3 所示,A、B、C 为因素水平值。

为确定稳态气体流速、入口负压对试验指标的影响,对该两项试验指标进行极差分析和方差分析,分析结果如表 4 和表 5 所示。

由方差分析的结果可得,该试验中两模型显著

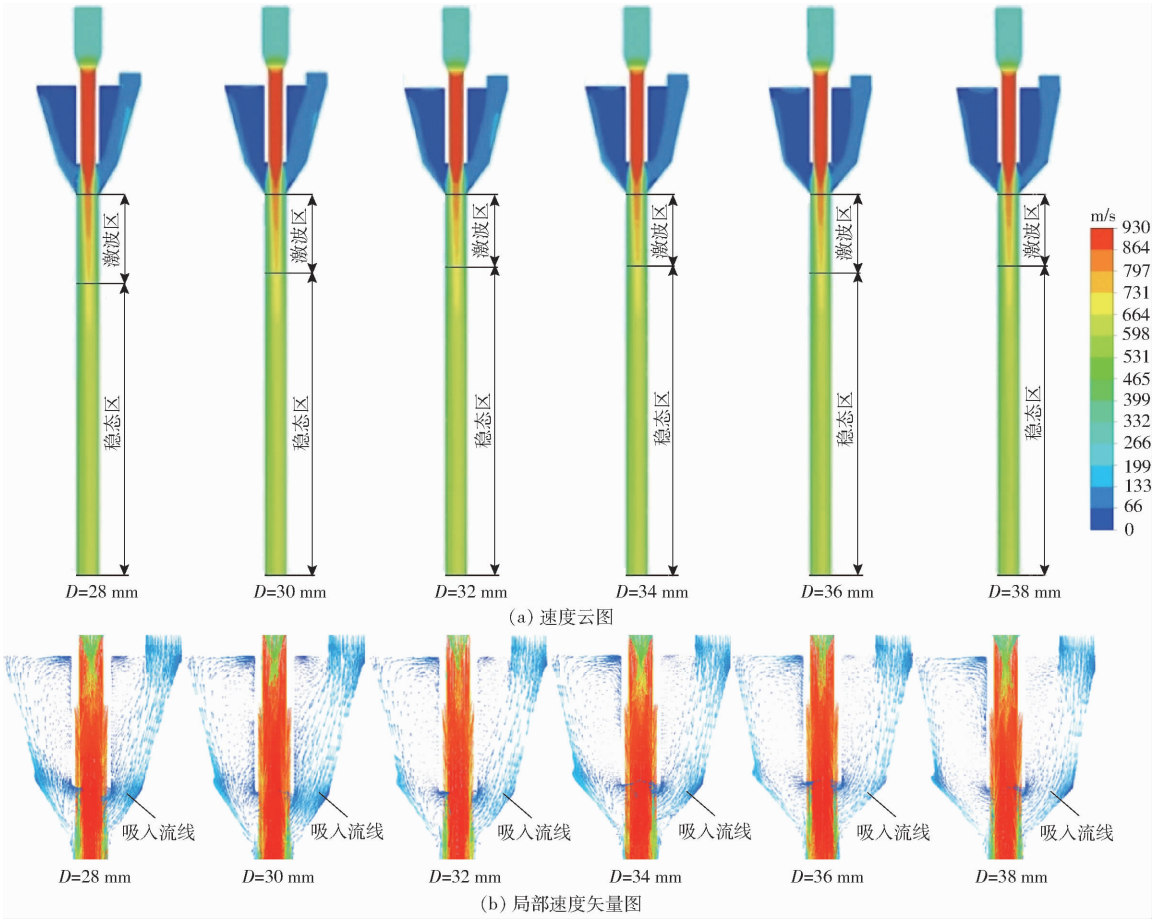


图 8　接收室直径单因素试验速度场

Fig. 8　Velocity fields of single factor test for diameter of recipient chamber

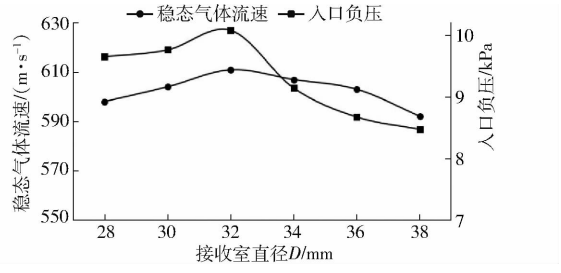


图 9　接收室直径对试验指标的影响

Fig. 9　Effect of diameter of recipient chamber on test indexes

表 2　正交试验水平

Tab. 2　Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	出气室直径 D_C/mm	喉嘴距 H/mm	接收室直径 D/mm
1	6	10	30
2	7	15	32
3	8	20	34

性水平分别为 0.004、0.005，说明该方差分析模型显著性水平较高[33]，结果可靠。出气室直径 D_C 对于稳态气体流速和入口负压均具有显著的影响；喉嘴距 H 对于入口负压具有显著的影响，而对稳态气体流速影响不显著；接收室直径 D 对于两个指标均无显著的影响。

表 3　正交试验方案与结果

Tab. 3　Orthogonal experiment design and results

序号	因素			稳态气体流速/(m·s⁻¹)	入口负压/kPa	有无涡流
	A	B	C			
1	1	1	1	516	15.884	无
2	1	2	2	508	16.028	无
3	1	3	3	504	13.583	无
4	2	1	2	598	11.100	无
5	2	2	3	607	9.141	无
6	2	3	1	586	8.009	无
7	3	1	3	707	3.586	有
8	3	2	1	681	1.701	有
9	3	3	2	678	0.961	有

表 4　极差分析结果

Tab. 4　Results of range analysis

试验指标		A	B	C
稳态气体流速	k_1	1 528	1 821	1 783
	k_2	1 791	1 796	1 784
	k_3	2 066	1 768	1 818
	极差 R	179	18	12
	较优组合		$A_3B_1C_3$	
入口负压	k_1	45 495	30 570	25 594
	k_2	28 250	26 870	28 089
	k_3	6 284	22 553	26 310
	极差 R	13 082	2 672	832
	较优组合		$A_1B_1C_2$	

表 5 方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis result

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
稳态气体流速	模型	48 982	6	8 164	227	0.004
	A	48 249	2	24 124	670	0.001
	B	469	2	234	7	0.133
	C	265	2	132	4	0.214
	误差	72	2	36		
	总和	49 055	8			
入口负压	模型	269 811 815	6	44 968 636	185	0.005
	A	257 978 338	2	128 989 169	531	0.002
	B	10 733 198	2	5 366 598	22	0.043
	C	1 100 280	2	550 140	2	0.306
	误差	485 922	2	242 960		
	总和	270 297 738	8			

稳态气体流速的较优组合为 $A_3B_1C_3$，入口负压的较优组合为 $A_1B_1C_2$。由于组合为 $A_3B_1C_3$ 时进种口下部出现局部涡流(表 3)，不利于小麦的气动射播，因此，气动式小麦精准投种装置的较优组合为 $A_1B_1C_2$，即出气室直径 D_C 为 6 mm、喉嘴距 H 为 10 mm 和接收室直径 D 为 32 mm，经 Fluent 分析可得稳态气体流速为 524 m/s，入口负压为 15.966 kPa，且进种口下部无局部涡流、激波区较小。结合前述小麦种粒气动加速特征分析，将数值分析的较优组合结果代入式(5)并积分求解可得小麦种粒速度 v_m 约为 46.2 m/s。

4 小麦气动投种台架试验

4.1 试验设备与材料

为研究较优组合下气动式小麦精准投种装置的投种性能，在中国农业大学工学院保护性耕作研究中心的多功能排种试验台上开展小麦气动投种试验。试验装置如图 10 所示，设置传送带的作业速度为 1.2 m/s，投种高度为 0.1 m，进气室压力为 0.5 MPa。试验中，利用空气压缩机为气动投种试验提供持续稳定高压气流，利用 5F01C-16G 型高速摄像机对小麦气动投种过程进行高速拍摄，并设置高速摄像机的拍摄模式为按帧采集、并行曝光，采集长度为 8 000 帧，采集周期为 200 μs，曝光时间为 100 μs。

试验材料为湖北省大面积种植的郑麦 9023，试验土壤样品取自湖北省农业科学院作物研究所试验田，该试验田常年稻麦轮作，将土壤样品去除秸秆残茬、表层土壤硬壳后铺放于传送带以形成清洁种床，土壤类型为壤质粘土，土壤 pH 值为 6.1，土壤含水率为 35%，土壤紧实度约为 93.4 kPa。

4.2 试验方法

小麦气动投种试验共重复进行 50 组，每组进行 3 次单粒小麦的投种试验。试验结束后，从每次投种试验拍摄得到的所有图像中提取投种过程的图像。选取试验指标为投种速度、投种深度和种子破损率。

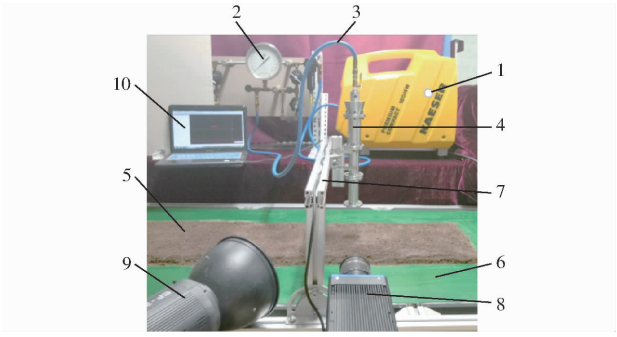


图 10 试验台

Fig. 10 Test-bed

1. 空气压缩机 2. 气压调节装置 3. 耐压气动软管 4. 气动式小麦精准投种装置 5. 试验土壤 6. 传送带 7. 机架 8. 高速摄像机 9. EF-200 太阳灯 10. 计算机

4.2.1 投种速度

单次小麦气动投种时间极短，故视小麦气动投种过程为匀速投种过程。投种速度计算公式为

$$v_S = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3}\frac{H_S}{T_{Sij}} \tag{6}$$

其中

$$T_{Sij} = (N_{Sij} - 1)\frac{1\times10^6}{F_{PS}} \tag{7}$$

式中 H_S——投种高度，m

T_{Sij}——第 i 组第 j 次投种的投种时间，s

N_{Sij}——第 i 组第 j 次投种过程的图像数

F_{PS}——实际拍摄帧频率，f/s

4.2.2 投种深度

投种试验结束后，测量每次投种后小麦入土深度(即投种深度)并求解，则投种深度计算公式为

$$H_B = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3}H_{Bij} \tag{8}$$

式中 H_{Bij}——第 i 组第 j 次投种深度，mm

4.2.3 种子破损率

参照 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》和 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》射播试验结束后，挑选和计算试验中破碎损伤的种粒并计算小麦种子破损率。小麦种子破损率计算公式为

$$P = \left(\frac{P_S}{P_Z} - P_Y\right)\times100\% \tag{9}$$

式中 P_S——试验中破损的小麦种子总数

P_Z——试验用小麦种子总数

P_Y——小麦种子的原始破碎率，%

4.3 试验结果与分析

小麦气动投种过程如图 11 所示。小麦自混合加速管最下端飞出，经过 2 286 μs 后高速冲击进入

土壤且小麦种粒入土时未产生弹跳、滑移现象，着床稳定，可实现小麦的高速精准定点投种。同时，试验中小麦种粒均未出现破损状况。小麦气动投种结果如图 12 所示。

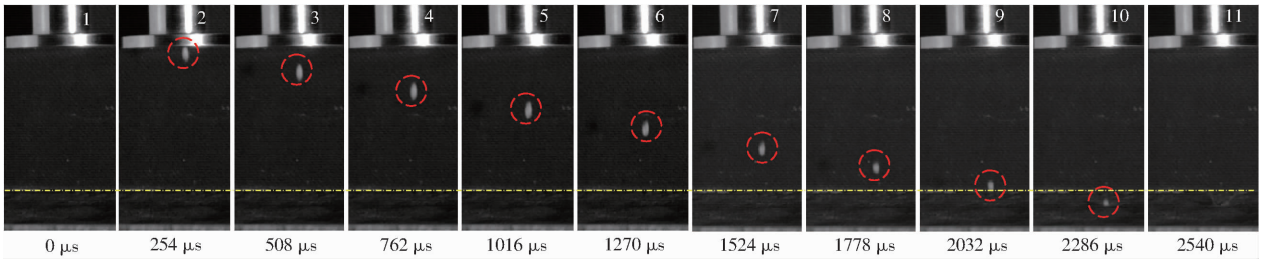


图 11　小麦精准气动投种过程

Fig. 11　Procedure of pneumatic wheat precision seed casting

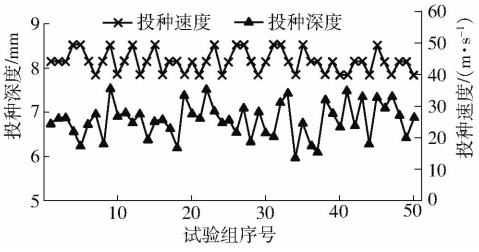


图 12　小麦精准气动投种试验结果

Fig. 12　Result of pneumatic wheat precision seed casting

试验结果表明，小麦种粒的投种速度为 38 ~ 50 m/s，投种深度为 6 ~ 7.6 mm，且投种速度、投种深度变异系数分别为 8.3%、5.8%，气动式小麦精准投种装置的投种性能稳定。即通过气动投种方式，小麦种粒能够以平均 43.8 m/s 的投种速度（比较优组合下小麦种粒速度 46.2 m/s 低约 5.1%），稳定投置于清洁种床且平均投种深度为 6.78 mm。因此，数值分析较优参数组合设置较为合理，能够实现小麦种粒的精准投置。

此外，由于稻麦轮作区黏湿多雨的作业环境，农艺要求稻茬麦浅层播种[4-5,8]以避免小麦播后烂种现象发生，实际生产中多采用小麦表层撒播或条带浅旋条播后水稻秸秆覆盖的种植方式。因此，采用气动投种方式在稻麦轮作田进行播种作业，小麦种粒被投置于种床表层并形成单粒小麦种穴，播种深度较浅，在投种后配合前茬水稻秸秆覆盖于种床（图 13），能够满足稻茬麦小麦播种要求。

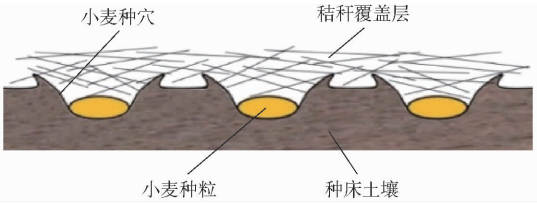


图 13　小麦精准气动投种作业效果示意图

Fig. 13　Diagram of soil-incident effect of pneumatic wheat precision seed casting

4.4　发芽情况

为进一步观察气动投种方式对小麦种粒的影响，试验结束后根据 GB/T 5520—1985《粮食、油料检验 种子发芽试验》，将气动投置的小麦种粒（气动投置组）和未经气动投置的等量小麦种粒（对照组）放置于培养皿中，在 20℃ 室温下培养 7 d 后观察小麦的发芽情况。小麦发芽结果表明，气动投置组和对照组的小麦种粒发芽率分别为 94.0% 和 95.3%，出芽情况较好。经气动投置的小麦种粒未出现发芽率明显降低现象，结合前述试验中未观察到小麦种粒明显损坏情况，说明在采用气动投种方式将小麦种粒投置于土壤的播种方式可行，但后续仍需大量田间试验以进一步观察和统计小麦的出苗效果。

5　结论

（1）为实现稻麦区黏湿土壤条件下的小麦精量播种，设计了一种气动式小麦精准投种装置，该装置通过气动加速，将从精密排种器排出的小麦种粒精准投置于耕整后的清洁种床，实现了小麦的高速精准着床点播。

（2）利用 Fluent 分析开展单因素试验、正交试验，确定了气动式小麦精准投种装置的关键结构参数和各因素对试验指标的影响规律：出气室直径对稳态气体流速和入口负压均影响显著，喉嘴距对入口负压具有显著影响。气动式小麦精准投种装置的较优组合为：出气室直径 6 mm、喉嘴距 10 mm、接收室直径 32 mm，此时稳态气体流速为 524 m/s，入口负压为 15.966 kPa。

（3）较优参数组合下的投种性能台架试验结果表明，小麦种粒可稳定冲击土壤，实现高速精准定点投种，且无破损，小麦种粒以 43.8 m/s 的平均投种速度，可在清洁种床内实现 6.78 mm 的平均投种深度，投种速度、投种深度变异系数分别为 8.3%、5.8%，投种性能稳定。

参 考 文 献

[1] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 稻麦联合收获开沟埋草一体机播种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 54 - 62.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of seeding system for harvest ditch and stalk-disposing machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 54 - 62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170506&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.006. (in Chinese)

[2] 王金武, 王奇, 唐汉, 等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 112 - 117.
WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 112 - 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150916&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016. (in Chinese)

[3] 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 crop 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)

[4] 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)

[5] 李朝苏, 汤永禄, 解立胜, 等. 2BMFDC - 6 型稻茬麦半旋播种机设计与性能试验[J]. 西南农业学报, 2011, 24(2): 789 - 793.
LI Chaosu, TANG Yonglu, XIE Lisheng, et al. Design and experiment of 2BMFDC - 6 half-tillage seeder of wheat after rice [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(2): 789 - 793. (in Chinese)

[6] 赵晓顺, 于华丽, 张晋国, 等. 槽缝气吸式小麦精量排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 48 - 51, 74.
ZHAO Xiaoshun, YU Huali, ZHANG Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precise wheat seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 48 - 51, 74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130210&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.010. (in Chinese)

[7] 何亮. 小麦精量播种高产栽培技术要点[J]. 北京农业, 2015(12): 56.

[8] 汤永禄, 黄钢, 袁立勋. 稻茬麦精量露播稻草覆盖高效栽培技术[J]. 作物杂志, 2000(3): 22 - 24.
TANG Yonglu, HUANG Gang, YUAN Lixun. High-benefit cultivation technique of surface seeding and mulching rice straw for wheat after rice[J]. Crops, 2000(3): 22 - 24. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 梁素钰, 封俊, 曾爱军, 等. 新型组合吸孔式小麦精密排种器性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 84 - 87.
LIANG Suyu, FENG Jun, ZENG Aijun, et al. Performance experiments of the seed-meter device with combined suckers[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(2): 84 - 87. (in Chinese)

[11] YANG Li, YAN Bingxin, CUI Tao, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters [J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2016, 9(1): 9 - 15.

[12] ARZU Y, DEGIRMENCIOGLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement, 2014, 56: 128 - 135.

[13] 刘宏新, 闻浩楠, 改广伟, 等. 被动滚筒式免耕播种成穴机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 53 - 61.
LIU Hongxin, WEN Haonan, GAI Guangwei, et al. Design and experiment on passive drum-type no-till planter cavitation mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 53 - 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170907&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.007. (in Chinese)

[14] 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 CSAE, 2012, 28(22): 8 - 15. (in Chinese)

[15] 刘芳, 杜瑞成. 内置式双位投种穴播器[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 35 - 40, 29.
LIU Fang, DU Ruicheng. Embedded double-position throwing seeds dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 35 - 40, 29. (in Chinese)

[16] 刘俊孝，王庆杰，李洪文，等. 针孔管式小麦精准点播装置设计与吸种性能研究[J]. 农业工程学报，2019，35(11)：10－18.
LIU Junxiao，WANG Qingjie，LI Hongwen，et al. Design and seed suction performance of pinhole-tube wheat precision seeding device[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(11)：10－18.（in Chinese）

[17] 刁培松，杜瑞成，杨自栋，等. 气动射种理论研究[J]. 农机化研究，2005，27(1)：94－96.
DIAO Peisong，DU Ruicheng，YANG Zidong，et al. Theoretical research on pneumatic seeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2005，27(1)：94－96.（in Chinese）

[18] 李林书，蒋梅胜，何也能，等. 空气引射提高风力灭火机风速的分析与试验[J]. 农业工程学报，2014，30(1)：55－62.
LI Linshu，JIANG Meisheng，HE Yeneng，et al. Analysis and experiment on air-ejecting for improving wind speed of pneumatic extinguisher[J]. Transactions of the CSAE，2014，30(1)：55－62.（in Chinese）

[19] BARTOSIEWICZ Y，AIDOUN Z，DESEVAUX P，et al. Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow，2005，26(1)：56－70.

[20] 邹宁. 超声速喷管设计及其数值模拟和实验研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2009.

[21] 高筱钧，徐杨，杨丽，等. 基于 DEM－CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(增刊)：92－100.
GAO Xiaojun，XU Yang，YANG Li，et al. Simulation and experiment of uniformity of venturi feeding tube based on DEM－CFD coupling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(Supp.)：92－100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.013.（in Chinese）

[22] 索科洛夫 E Я，津格尔 H M. 喷射器[M]. 黄秋云，译. 北京：科学出版社，1977.

[23] VARGA S，OLIVEIRA A C，MA X，et al. Experimental and numerical analysis of a variable area ratio steam ejector[J]. International Journal of Refrigeration，2011，34(7)：1668－1675.

[24] 周良富，傅锡敏，薛新宇，等. 基于 CFD 的射流式在线混药装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(增刊1)：107－112.
ZHOU Liangfu，FU Ximin，XUE Xinyu，et al. Design and experiment of jet mixing apparatus based on CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(Supp.1)：107－112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2013s120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.020.（in Chinese）

[25] 张喜来，靳世平，黄素逸，等. 热风炉系统煤气引射器的设计与实验[J]. 流体机械，2008(9)：1－5.
ZHANG Xilai，JIN Shiping，HUANG Suyi，et al. Design and experiment of the gas ejector of hot blast stove[J]. Fluid Machinery，2008(9)：1－5.（in Chinese）

[26] 杨伦，谢一华. 气力输送工程[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

[27] SRIVEERAKUL T，APHORNRATANA S，CHUNNANOND K. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics：Part 1. Validation of the CFD results[J]. International Journal of Thermal Sciences，2007，46(8)：812－822.

[28] 王超，朱金波，胡标. 环空淹没射流吸气性能与能量耗散特征研究[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(8)：14－21，13.
WANG Chao，ZHU Jinbo，HU Biao. Suction performance and energy dissipation characteristics of annular submerged jets[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(8)：14－21，13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160803&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.003.（in Chinese）

[29] PIANTHONG K，SEEHANAM W，BEHNIA M，et al. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique[J]. Energy Conversion and Management，2007，48(9)：2556－2564.

[30] 杨敏官，闫龙龙，王育立，等. 自由圆湍射流不稳定性与界面拟序结构研究[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(2)：35－44.
YANG Minguan，YAN Longlong，WANG Yuli，et al. Instability and interfacial coherent structure of free round turbulent jet[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(2)：35－44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.005.（in Chinese）

[31] CROW S C，CHAMPAGNE F H. Orderly structure in jet turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics，1971，48(3)：547－549.

[32] PARK H，HEISTER S D. A numerical study of primary instability on viscous high-speed jets[J]. Computers & Fluids，2006，35(10)：1033－1045.

[33] 齐兴源，周志艳，林蜀云，等. 稻田气力式变量施肥机肥料喷撒器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(增刊)：164－170，180.
QI Xingyuan，ZHOU Zhiyan，LIN Shuyun，et al. Design of fertilizer spraying device of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(Supp.)：164－170，180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s022&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.022.（in Chinese）