

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.005

倾斜梯形孔式穴施肥排肥器设计与试验

都鑫 刘彩玲 姜萌 袁昊 戴磊 李方林

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为降低肥料施用量、提高肥料利用效率、实现植株根区施肥,设计了一种倾斜梯形孔式定量穴排肥器。阐述了穴排肥器的成穴与工作原理,分析了影响其成穴性能的主要因素,构建了充肥和排肥过程中肥料颗粒群的力学模型;应用离散元软件 EDEM 和流体分析软件 Fluent 对穴排肥器的成穴性能进行了仿真分析,研究了作业速度、充肥孔长度和气流速度对穴长、穴排肥量误差的影响,通过全因子试验得到作业速度为 3~7 km/h 时的较优参数组合为充肥孔长度 27.0 mm、气流速度 15.0 m/s,对应的穴长和穴排肥量误差分别为 62.7~87.5 mm 和 7.4%~8.9%。台架试验表明,在作业速度为 3~7 km/h、充肥孔长度为 27.0 mm 和气流速度为 15.0 m/s 条件下,穴长、穴长稳定性变异系数、穴排肥量误差和穴距误差分别为 98.5~175.5 mm、7.42%~14.18%、7.60%~15.17%、2.3%~4.7%;田间试验表明,作业速度为 3~7 km/h 时,穴长、穴长稳定性变异系数、穴排肥量误差和穴距误差分别为 104.2~178.4 mm、7.55%~14.56%、7.69%~13.80%、2.1%~4.3%,成穴性能较好。

关键词: 穴施肥;排肥器;倾斜梯形孔;离散单元法

中图分类号: S224.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0043-11 OSID: 

Design and Experiment of Inclined Trapezoidal Hole Fertilizer Point-applied Discharging Device

DU Xin LIU Cailing JIANG Meng YUAN Hao DAI Lei LI Fanglin

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the utilization efficiency of fertilizers, reduce the amount of chemical fertilizers applied, and realize fertilization in the root zone of plants, an inclined trapezoidal hole fertilizer point-applied discharging device was designed. Fertilizer point-applied discharging device can be divided into two categories, the first type was intermittent fertilizer discharge device, and the continuous fertilizer particles were discharged from the fertilizer supplied device and then relied on the intermittent device (duck mouth valve) to open and close to form the hole fertilization; the second type was consequent metering device, the mechanisms combined filling plate and discharging plate continuously and then rotated and extracted fertilizer particles from the filling area, then discharged fertilizer particles from the discharging area. The consequent metering device can reduce the movement time of the fertilizer, offset the forward speed of metering machines, and finally reduce the scattered length of the landing fertilizer particles by the centrifugal force and the initial tangential velocity of the fertilizer. Therefore, a consequent and point-applied fertilization metering device was designed. The centrifugal force of the filling and discharging wheels, the self-gravity of the fertilizer and the assisted pneumatic force were used to discharge the fertilizer, and the performance of the device was improved by reducing the time when the fertilizer particles completely flew out from the hole. The cavitation and working principle of the fertilizer point-applied discharging device were explained, the main influencing factors affecting its fertilizer distribution performance were determined, and the mechanical model of the fertilizer particle group in the process of filling and discharging fertilizer was constructed; the discrete element software EDEM and fluid analysis were used, and the software Fluent was used to carry out a simulation analysis on the fertilizer distribution performance of the fertilizer point-applied device, and the influence of the working speed,

收稿日期: 2020-11-02 修回日期: 2020-12-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300907)
作者简介: 都鑫(1993—),男,博士生,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: dx2017on@163.com
通信作者: 刘彩玲(1972—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: cailingliu@163.com

length of fertilizer hole and air velocity on the fertilizer distribution length and the error of hole fertilizer amount was studied. The 3-factor 3-level full-factor experimental design method was adopted. The optimized solution showed that when the operating speed, the length of the fertilizer hole and the air velocity were 3 ~ 7 km/h, 27.0 mm and 15.0 m/s, respectively, the fertilizer distribution length and the hole fertilizer amount were 62.7 ~ 87.5 mm and 7.4% ~ 8.9%, respectively. The bench test showed that under the conditions of operating speed of 3 ~ 7 km/h, hole length and air velocity of 27.0 mm and 15.0 m/s, respectively, the fertilizer distribution length, the stability coefficient of fertilizer distribution length, the error of fertilizer pointed distance and the error of hole fertilizer discharge the hole distances were 98.5 ~ 175.5 mm, 7.42% ~ 14.18%, 7.60% ~ 15.17% and 2.3% ~ 4.7%, respectively. Field test results showed that when the operating speed was 3 ~ 7 km/h, the fertilizer distribution length, the coefficient of variation of the fertilizer distribution length stability, the error of the hole fertilizer amount and the error of the fertilizer pointed distance were 104.2 ~ 178.4 mm, 7.55% ~ 14.56%, and 7.69% ~ 13.80%, 2.1% ~ 4.3%, respectively. The research result can provide equipment support for the popularization and application of fertilizer hole application technology, and provide a theoretical basis for the design and optimization of hole fertilizer device.

Key words: point-applied fertilization; fertilizer discharge device; inclined trapezoidal hole; discrete element method

0 引言

施肥是农作物种植过程的重要环节,是实现农业高产和高效的重要保证^[1-5]。在播种过程中,化肥施用普遍采用条施方式,这种方式施肥量大、肥效利用率低,不仅增加了生产成本,还易造成土壤面源污染,制约了农业的可持续发展^[6]。肥料穴施技术可实现作物根区定点定量精确施肥,能够节肥增产,是提高玉米、大豆等作物肥料利用率的有效手段^[7-12]。

施肥装置是推广应用穴施肥技术的关键,国内学者进行了初步研究探索^[13]。张勋^[14]利用外槽轮式排肥器排出连续肥料流,在开沟器上增设二次成穴机构,实现了肥料穴施,但机构复杂,且难以精确控制每穴排肥量;吴南等^[15]利用摇杆控制鸭嘴阀实现肥料成穴,以穴施肥量精度和穴距精度为目标,对行进速度、鸭嘴阀旋转角度和安装高度进行了优化分析;张俊雄等^[16]以每穴施肥量的变异系数、施肥深度合格率和施肥范围合格率为目标,研究了将化肥穴施于种子正下方 7 ~ 23 cm 土层内时的作业性能;李沐桐等^[17]设计了玉米苗期自动穴施肥控制机构,研究了施肥传动机构工作参数对施肥控制精准度的影响规律;胡红等^[18]设计了玉米行间定点扎穴深施追肥机,对每穴排肥量、施肥深度和施肥距离进行了研究。

上述装置主要通过排肥器配合成穴机构实现肥料穴施,其结构复杂、生产效率低。目前,对穴施肥成穴性能的研究主要集中在每穴排肥量及其变异系数、穴距精度及其变异系数等方面,尚未见对肥料落地后的散落分布长度进行相关研究。对穴施肥装置

还处于研究阶段^[19-21],在生产中尚未见实用、成熟的穴施肥装备。为此,本文以颗粒肥料为研究对象,设计一种新型穴施肥排肥器,采用固定容积的倾斜梯形槽孔精量充肥,辅以气流作用将肥料迅速吹出,以实现精量充肥和肥料快速成穴。利用离散元仿真软件 EDEM 和流体仿真软件 Fluent 对肥料成穴性能进行试验和优化分析,以确保肥料颗粒群在沟内离散程度最小,提高成穴性能,以期玉米高效施肥技术的推广提供理论基础。

1 整体结构与力学分析

1.1 整体结构和工作原理

倾斜梯形孔式穴施肥排肥器主要包括固定装置、壳体、下肥口、隔肥板、排肥轮、挡板及吹管、充肥轮、排肥量调节塞、肥箱等部件;按功能和作业顺序将工作区域分为充肥区Ⅰ、导肥区Ⅱ、护肥区Ⅲ、排肥区Ⅳ和过渡区Ⅴ,爆炸图和工作区域如图 1 所示。

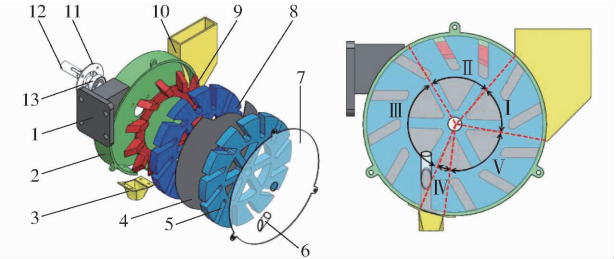


图 1 排肥器结构及工作区域划分
Fig. 1 Structure of fertilizer-metering device and working area partition

1. 固定装置 2. 壳体 3. 排肥口 4. 隔肥板 5. 排肥轮 6. 进气管 7. 挡板 8. 充肥轮 9. 排肥量调节塞 10. 肥箱 11. 轴承盖 12. 轴 13. 轴承

排肥器工作时,驱动装置带动充肥轮和排肥轮

同步转动,隔板固定不动,充肥孔在充肥区囊取一定量的肥料,于导肥区将肥料从充肥孔倒进排肥孔,在排肥器壳体、挡板和排肥孔的保护下由护肥区进入排肥区,气流通过挡板下方的进气孔作用于排肥孔底部,肥料颗粒在重力、离心力和外部气流的辅助作用下快速投出。

1.2 关键结构设计

1.2.1 充肥轮、排肥轮设计

为降低肥料和沟底碰撞产生的散射和弹跳对成穴性能的影响,应尽量降低排肥器离地高度。充肥轮、排肥轮同轴传动,其直径过小,传动轴离地面的高度太低,则秸秆容易缠绕传动装置;直径过大,则排肥器两侧的翼板过长容易夯实沟壁,不利于后续的覆土镇压。排肥器和地面、翼板的相对位置如图 2 所示。

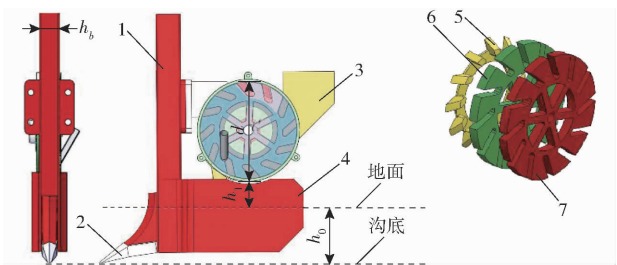


图 2 排肥器和地面、翼板相对位置示意图

Fig.2 Relative position of ground and wing of fertilizer-metering device

1. 铲柱 2. 铲尖 3. 排肥器 4. 翼板 5. 排肥量调节塞 6. 充肥轮 7. 排肥轮

开沟铲在工作时将部分土壤抬起并向两侧抛出翻倒,在沟两侧形成土丘,为避免土块越过翼板落入肥沟,假设土体上抬过程未被压缩即体积守恒,排肥器离地高度 h_1 满足

$$h_0 h_b \leq \frac{1}{2} h_1 \frac{2 h_1}{\tan \theta_s} \quad (1)$$

得 $h_1 \geq \sqrt{h_0 h_b \tan \theta_s} \quad (2)$

式中 h_0 ——肥沟深度,一般为 80 ~ 100 mm

h_b ——铲柱宽度,取 60 mm

θ_s ——土壤自然休止角,取 32°

确定排肥器离地高度 h_1 最小为 50 mm。

为避免秸秆缠绕传动装置,充肥轮、排肥轮直径 d 为

$$d \geq 2(h_c - h_1) \quad (3)$$

式中 h_c ——秸秆留茬高度,mm

根据 NY/T 995—2006《谷物(小麦)联合收获机械作业质量》,秸秆留茬高度一般不高于 180 mm,确定充肥轮、排肥轮直径 d 为 260 mm。

配套锄铲式开沟器铲柱为 40 mm × 60 mm × 3 mm 方管,肥沟宽度为 40 mm,为使肥料顺利落入

肥沟,充肥轮、排肥轮厚度 h_t 有

$$h_t \leq \frac{1}{2} h_b \quad (4)$$

充肥轮、排肥轮厚度一致,确定充肥轮、排肥轮厚度 h_t 为 20 mm。

1.2.2 充肥孔、排肥孔设计

充肥孔、排肥孔的结构尺寸、容积以及肥料颗粒在型孔内的排列状态、受力、稳定程度影响肥料成穴性能。本文选取河南金六顺农业有限公司生产的大颗粒尿素为研究对象,测得肥料的平均三轴尺寸、等效直径、球形率、休止角、体积密度和含水率分别为 3.83 mm × 3.62 mm × 3.45 mm、3.63 mm、0.95、30.4°、984.6 kg/m³、0.11%。

玉米施肥量^[22-24]一般为 250 ~ 600 kg/hm²,穴施肥实现肥际扩展空间与根区空间吻合,可提高肥料利用率、降低施肥量^[6],设计玉米施肥量为 200 ~ 480 kg/hm²。玉米行株距为 60 cm × 25 cm 时,每穴施肥量为 3.0 ~ 7.2 g,对应每穴尿素颗粒体积为 3.05 ~ 7.31 cm³。

为便于充肥孔所充肥料顺利流入排肥孔,充肥孔底部设计倾角 α 的倾斜平面,充、排肥孔具体结构如图 3 所示。

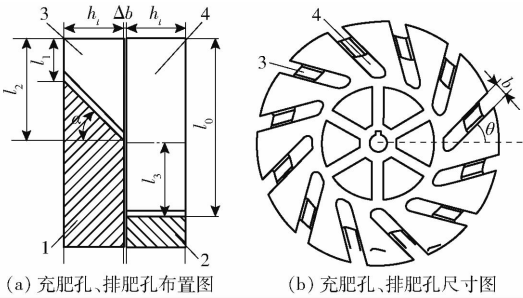


图 3 充肥轮、排肥孔结构示意图

Fig.3 Structure diagrams of fertilizer filling and discharging hole

1. 排肥量调节塞 2. 排肥轮 3. 充肥孔 4. 排肥孔

充肥孔囊取肥料的多少取决于容积大小,其容积计算式为

$$V_1 = \frac{1}{2} b (l_1 + l_2) h_t \quad (5)$$

其中

$$l_2 = l_1 + h_t \tan \alpha$$

式中 V_1 ——充肥孔容积,mm

b ——充肥孔、排肥孔宽度,取 15 mm

l_1 ——充肥孔间隙长度,mm

l_2 ——充肥孔长度,mm

α ——充肥孔底面倾角,取 45°

根据排肥量的设计,每穴排肥量为 3.0 ~ 7.2 g,确定充肥孔长度 l_2 为 20 ~ 34 mm,通过更换排肥量调节塞的长度改变每穴排肥量,充肥孔间隙长度 l_1

为 0 ~ 14 mm。

为保证充肥孔内的肥料全部流入排肥孔,有

$$\begin{cases} l_3 h_i b = V_i \\ l_0 = l_2 + l_3 + \Delta b \tan \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中 l_3 ——排肥孔盛肥高度,mm

l_0 ——排肥孔长度,mm

Δb ——充肥轮与排肥轮间隙,mm

确定排肥孔长度 l_0 为 55.5 mm。

根据排肥孔长度 l_0 、排肥轮直径 d 和充肥孔宽度 b 可得排肥孔沿圆周均布的个数 Z 最多为 24 个。假设肥料颗粒可以被迅速投出且忽略空气阻力,单穴化肥的排肥周期可表示为

$$t = t_1 + t_2 = \frac{S}{v_m} \quad (7)$$

式中 t ——单穴化肥的排肥周期,s

t_1 ——排肥孔开始转入排肥区到完全转入排肥区用时,即排肥用时,s

t_2 ——排肥孔完全转入排肥区到下一个排肥孔开始转入排肥区用时,即间隔时间,s

S ——株距,m

v_m ——机器作业速度,m/s

此情况下肥料在肥沟内的离散程度与 t_1/t 正相关,当机器前进速度 v_m 和株距 S 一定时, t 为常数,排肥孔数量 Z 越少, t_2 越大, t_1 越小,肥料的离散程度越小。充肥轮线速度 v_p 与充肥性能有关,排肥孔数量 Z 不能无限减小^[25],因此有

$$\begin{cases} v_p = \frac{\pi d v_m}{SZ} \\ \omega_d \leq \sqrt{\frac{2g \sin \beta_d}{d}} \\ v_p = \frac{d}{2} \omega_d \end{cases} \quad (8)$$

式中 ω_d ——极限角速度,rad/s

g ——重力加速度,m/s²

β_d ——最大充肥位置与水平面的夹角,为 20° ~ 35°

本文设计机器作业速度为 3 ~ 7 km/h,当 β_d 为 20° 时,排肥孔数量 Z 不小于 9.62 个。

确定沿圆周均布的充肥孔、排肥孔个数各为 12 个,充肥孔、排肥孔倾角 θ 根据文献[25 - 26]取 32°。在机器作业速度为 3 ~ 7 km/h 时,对应充肥轮、排肥轮转速为 16.7 ~ 38.9 r/min,在此范围内充肥轮转速小于极限转速,不影响肥料颗粒正常充入型孔。

1.3 力学分析

1.3.1 充肥过程力学分析

将型孔内的肥料颗粒视为整体,以肥料群质心

为原点 O ,建立如图 4 所示的坐标系, x 轴通过原点 O 与充肥轮圆心 P 并指向排肥轮外侧, y 轴垂直于 x 轴并指向排肥轮转动方向。

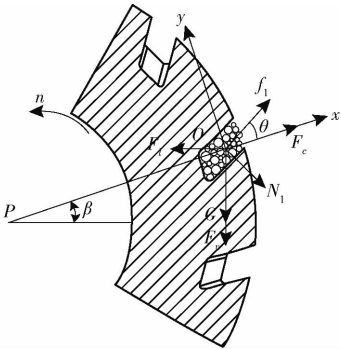


图 4 充肥过程力学分析

Fig. 4 Mechanics analysis of fertilizer filling process

根据型孔内肥料颗粒和充肥区肥料的受力情况,建立受力平衡方程

$$\begin{cases} F_c + N_1 \sin \theta + f_1 \cos \theta - (G + F_v) \sin \beta - F_i \cos \beta = 0 \\ f_1 \sin \theta - N_1 \cos \theta - (G + F_v) \cos \beta + F_i \sin \beta = 0 \\ f_1 = \mu_1 N_1 \\ F_c = m \frac{\pi^2 n^2}{1800} d \end{cases} \quad (9)$$

式中 m ——肥料颗粒质量,取 0.007 2 kg

θ ——充肥孔、排肥孔倾角,取 32°

F_c ——肥料颗粒的离心力,N

N_1 ——充肥孔内壁对肥料的支持力,N

f_1 ——肥料与充肥孔内壁摩擦力,N

G ——肥料颗粒的重力,N

F_v ——上层肥料颗粒的垂直压力,N

β ——充肥角,为 OP 与水平线夹角,表示肥料颗粒可以充入型孔时角度,顺时针为负,(°)

F_i ——上层肥料颗粒的水平压力,N

n ——充肥轮转速,r/min

μ_1 ——肥料颗粒与排肥孔壁的摩擦因数,取 0.25

本排肥器的肥箱(见图 1)较小(长 × 宽 × 高为 80 mm × 40 mm × 100 mm),根据《农业物料学》,可将其对应的充肥区视为浅仓模型,得

$$K = \frac{F_i}{F_v} = \frac{1 - \sin \varphi_i}{1 + \sin \varphi_i} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2} \right) \quad (10)$$

其中

$$F_v = \gamma_s \gamma_h$$

式中 K ——压力比

φ_i ——内摩擦角,肥料颗粒取 45°

γ_s ——重度,肥料颗粒为 9.66 kN/m³

γ_h ——充肥区的肥料体积,取 3.2×10^{-4} m³

由式(9)可得

$$\beta = \arcsin \frac{F_c k_2}{\sqrt{j_1^2 + j_2^2}} - \arctan \frac{j_2}{j_1} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} k_2 &= \mu_1 \sin \theta - \cos \theta \\ j_1 &= k_1 F_l + k_2 (G + F_v) \\ j_2 &= k_2 F_l - k_1 (G + F_v) \\ k_1 &= \mu_1 \cos \theta + \sin \theta \end{aligned}$$

由式(11)可知,充肥角 β 随充肥轮转速 n 增大而增大,为满足肥料颗粒在充肥轮转速 16.7~38.9 r/min 都能充进型孔,选充肥轮转速 n 为 38.9 r/min,联立式(10)、(11)得充肥角 β 为 -15.91° 。

1.3.2 排肥过程力学分析

排肥过程中,型孔中的肥料颗粒受离心力和重力作用沿排肥轮周向和径向依次排出穴孔,所排出第一粒与最后一粒肥料的时间间隔对穴长分布有直接影响,时间间隔越大穴长越大,气流辅助排肥可有效增大肥料颗粒排出型孔的速度,减小同一型孔中肥料颗粒排出的时间间隔。

将排肥孔内的肥料颗粒视为整体,以肥料群质心为原点 O ,建立如图 5 所示的坐标系, x 轴通过原点 O 与排肥轮圆心 P 并指向排肥轮外侧, y 轴垂直于 x 轴并指向排肥轮转动方向。

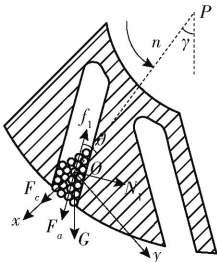


图 5 排肥过程力学分析

Fig. 5 Mechanics analysis of fertilizer discharging process

根据排肥孔内肥料颗粒的受力情况,建立受力平衡方程

$$\begin{cases} F_c + G \sin \gamma + F_a \cos \theta - f_1 \cos \theta - N_1 \sin \theta = 0 \\ G \cos \gamma + F_a \sin \theta - f_1 \sin \theta + N_1 \cos \theta = 0 \\ F_c = m \frac{\pi^2 n^2}{1800} d \\ F_a = \frac{1}{8} \rho h_i b C_D (u - U_p)^2 \\ f_1 = \mu_1 N_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中 ρ ——气体密度,kg/m³
 γ ——排肥角,为肥料颗粒可以排出型孔时角度,顺时针为正,(°)
 F_a ——正压气力,N
 C_D ——颗粒阻力系数
 u ——气流速度,m/s

U_p ——颗粒速度,m/s

由式(12)可得

$$\gamma = \arccos \frac{F_c q_2 + F_a q_2 \cos \theta - F_a q_1 \sin \theta}{G \sqrt{q_1^2 + q_2^2}} + \arccos \frac{q_1}{\sqrt{q_1^2 + q_2^2}} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} q_1 &= \sin \theta + \mu_1 \cos \theta \\ q_2 &= \cos \theta + \mu_1 \sin \theta \end{aligned}$$

由式(13)可知,排肥角 γ 随排肥轮转速 n 增大而增大,为满足肥料颗粒在排肥轮转速 16.7~38.9 r/min 都能排出型孔,选排肥轮转速 n 为 16.7 r/min,联立式(12)、(13)得排肥角 γ 为 22.79° 。

2 成穴性能仿真分析

为研究穴排肥器成穴性能,基于前述分析,利用离散元软件 EDEM 2018 和流体分析软件 Fluent 18.2 分别建立穴排肥器颗粒仿真模型和流场运动模型如图 6 所示,讨论机器作业速度、充肥孔长度和气流速度对穴排肥器成穴性能的影响。

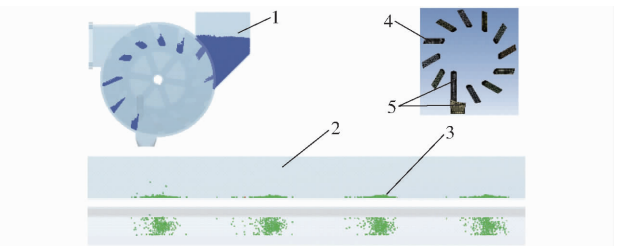


图 6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model

1. 排肥器 2. 传送带 3. 肥料 4. 动区域 5. 静区域

2.1 仿真平台搭建

将 SolidWorks 2016 软件创建的穴排肥器三维模型和流场模型保存为 .IGS 格式,分别导入 EDEM 2018 和 ANSYS 18.2,对流场模型进行网格划分,另存为 .msh 文件并导入 Fluent 18.2。根据前述肥料颗粒的等效直径建立颗粒模型,颗粒间及颗粒与穴排肥器间接触模型选择 Hertz - Mindlin 无滑动模型,仿真材料物性参数如表 1 所示^[27-29]。EDEM 中设置时间步长为 4×10^{-6} s,每隔 0.01 s 保存 1 次数据;Fluent 中时间步长为 4×10^{-4} s(为 EDEM 的 100 倍),每次仿真 20 穴肥料的颗粒运动情况,根据作业速度设置不同的仿真步数,最大迭代次数为 20 次,采用标准 $k - \varepsilon$ 模型非稳态求解 Eulerion - Eulerion 耦合算法,Transient 模拟计算,流场中的动区域逐个添加 Mesh moving,设置旋转方向和角速度,动区域和静区域接触面添加 interface,DEM - CFD 仿真模型如图 6 所示。

表 1 材料的物理特性参数

参数	肥料	ABS 塑料	土壤
泊松比	0.25	0.5	0.35
剪切模量/Pa	1.25×10^8	1.77×10^8	7.27×10^8
密度/(g·cm ⁻³)	1.575	1.180	1.357
恢复系数	0.31	0.45	0.02
静摩擦因数	0.37	0.25	1.25
滚动摩擦因数	0.12	0.19	1.24

为验证模型和仿真边界参数的正确性进行了肥料的堆积角验证试验,实测休止角与仿真测定休止角相差 0.74%,误差较小,模型精度较高,可用于仿真试验研究^[28]。

2.2 试验设计与评价方法

基于前述分析,为获得较优的气流速度参数,开展机器作业速度为 5 km/h、充肥孔长度 27 mm 条件下 5 种气流速度对肥料成穴性能的单因素影响试验,气流速度设 0、5、10、15、20 m/s 共 5 个水平;为获得较优的工作参数组合,开展作业速度、充肥孔长度和气流速度的三因素试验,作业速度设 3、5、7 km/h 共 3 个水平,充肥孔长度设 20、27、34 mm 共 3 个水平,气流速度设 10、15、20 m/s 共 3 个水平。试验均以穴长和穴排肥量误差为成穴性能评价指标。

在 EDEM 后处理界面添加 Geometry Bin,位于传送带底部中间位置,其长度为传送带速度与数据记录时间间隔(0.01 s)的乘积,宽度和传送带一致,高度设置为 20 mm,每隔 0.01 s 记录 1 次 Geometry Bin 内的肥料质量。每次采集 20 穴肥料颗粒数据,计算不同处理下穴长和穴排肥量误差,计算式为

$$L = \frac{\sum_{i=1}^k v_c t_i}{j}$$

(14)

$$q = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{|Q_i - Q_0|}{Q_0}}{j} \times 100\%$$

(15)

式中 L ——平均穴长,mm
 j ——肥料穴数,个
 v_c ——传送带速度,m/s
 t_i ——每穴肥料质量由 0 增加到最大再减小为 0 所用时间,s
 q ——穴排肥量误差,%
 Q_0 ——每穴标准排肥量,g
 Q_i ——每穴实际排肥量,g

2.3 试验结果与分析

2.3.1 气流速度对成穴性能的影响

不同气流速度对肥料颗粒穴长和穴排肥量误差

影响如图 7 所示,输出各气流速度下排肥口处肥料颗粒的平均速度,可知肥料颗粒平均速度随气流速度增大而增大,穴长随气流速度增大先减小后增大,说明气流速度过大或过小都不利于肥料颗粒集中分布;穴排肥量误差随气流速度增大先减小后增大,说明气流可加快肥料颗粒的排出速度,降低肥料颗粒穴排肥量误差。

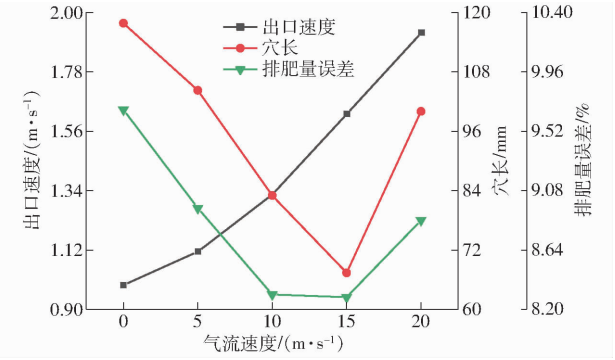


图 7 不同气流速度下排肥性能变化曲线
Fig. 7 Graph of fertilizer discharge performance at different airflow speeds

各气流速度下肥料颗粒落地后的分布情况如图 8 所示,表明气流对肥料成穴性能有明显影响,无气流辅助时肥料颗粒分布较为离散,分布长度高达 118 mm;有气流辅助排肥时,肥料颗粒可以聚堆分布,且随着气流速度的增大,肥料颗粒分布的范围减小,气流速度为 15 m/s 时,肥料颗粒分布长度最小,

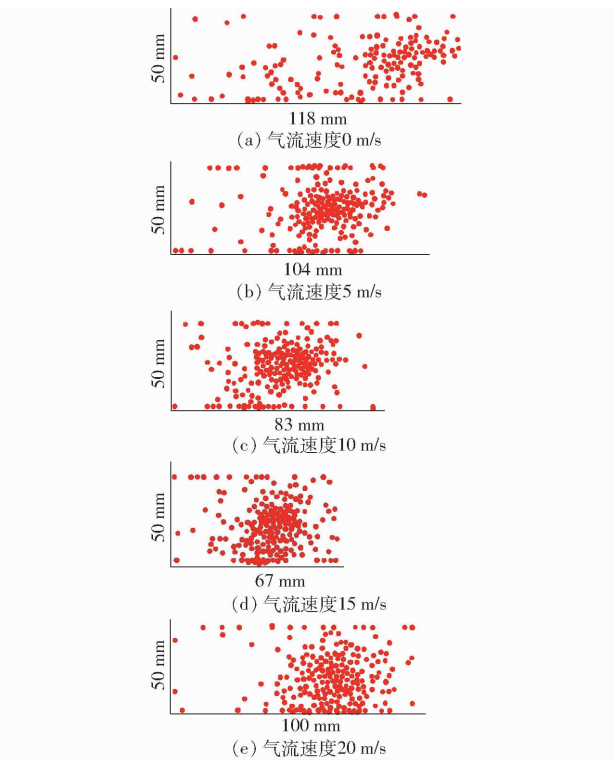


图 8 不同气流速度下肥料颗粒落地分布情况
Fig. 8 Distributions of fertilizer particles on ground at different air velocities

为 67 mm,气流速度增大为 20 m/s 时,由于气流速度过大,肥料颗粒被吹散导致颗粒分布长度变大,因此确定气流速度范围为 10 ~ 20 m/s。

2.3.2 各因素对成穴性能的影响

以穴长、穴排肥量误差为评价指标,试验设计与试验结果如表 2 所示。

表 2 试验设计与结果
Tab.2 Factors levels and test results

作业速度/ (km·h ⁻¹)	充肥孔 长度/mm	气流速度/ (m·s ⁻¹)	穴长/ mm	排肥量误 差/%
3	20	10	61.5	7.4
		15	65.0	7.7
		20	69.1	7.4
	27	10	63.2	7.2
		15	62.7	7.4
		20	65.6	7.3
	34	10	110.6	6.5
		15	96.6	6.4
		20	74.6	6.6
5	20	10	67.9	8.5
		15	68.4	8.9
		20	66.7	9.4
	27	10	83.4	8.3
		15	65.4	8.3
		20	90.2	8.9
	34	10	120.6	6.9
		15	108.1	8.1
		20	100.6	8.7
7	20	10	79.7	9.3
		15	80.5	9.7
		20	80.3	10.2
	27	10	98.2	9.1
		15	87.5	8.9
		20	100.1	9.6
	34	10	143.5	8.2
		15	122.7	8.5
		20	120.2	9.4

表 2 表明,作业速度为 3 ~ 7 km/h 时,肥料颗粒落地后的离散穴长随充肥孔长度的增大而增加,说明肥料颗粒每穴排肥量越大,其落地后的离散程度

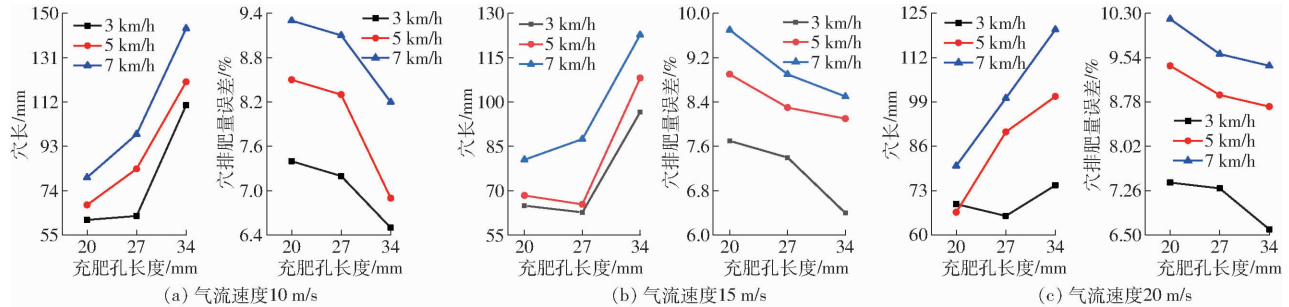


图 9 不同充肥孔长度和作业速度下成穴性能变化曲线
Fig.9 Influence of length of filling hole and working speed on performance of fertilizer discharge

越大,即穴长越大;每穴排肥量误差随充肥孔长度的增大而减小。

为分析作业速度对成穴性能的影响,分别在气流速度为 10、15、20 m/s 条件下,绘制不同充肥孔长度和作业速度对穴长、穴排肥量误差的影响曲线,如图 9 所示。

图 9 表明,充肥孔长度一定时,穴长基本随作业速度增大而增大,穴排肥量误差随作业速度增大而增大。作业速度为 3、5 km/h,气流速度为 15 m/s 条件下,穴长随充肥孔长度增大先减小后增大,因为作业速度较小时,排肥轮转速较慢,型孔中的肥料颗粒脱离型孔所需时间较长,此时气流辅助吹肥作用明显;充肥孔长度为 20 mm 时,型孔中肥料颗粒较少,易被吹散,充肥孔长度为 27 mm 时,受充肥孔长度和作业速度交互影响,肥料颗粒可被快速排出,充肥孔长度为 34 mm 时,离散穴长随排肥量增大而急剧增大。

为分析作业速度对成穴性能的影响,分别在充肥孔长度为 20、27、34 mm 条件下,绘制不同气流速度和作业速度对穴长、穴排肥量误差的影响曲线,如图 10 所示。

图 10 表明,充肥孔长度一定时,穴长随作业速度增大而增大,穴排肥量误差随作业速度增大而增大;充肥孔长度为 20 mm,低作业速度时穴长随气流速度增大而增大,中高作业速度时穴长随气流速度增大而先增大后减小;充肥孔长度为 27 mm 时,穴长随气流速度增大先减小后增大;在充肥孔长度为 34 mm 时,穴长随气流速度的增大而减小。中高作业速度条件下,穴排肥量误差随气流速度增大而增大,低作业速度条件下,穴排肥量误差受气流速度影响不大。

为分析充肥孔长度、气流速度交互作用对成穴性能的影响,作业速度为 5 km/h 时,绘制充肥孔长度和气流速度对穴长、穴排肥量误差影响曲面,如图 11 所示。

图 11a 表明,作业速度为 5 km/h、气流速度为中水平、充肥孔长度为低水平时,穴长最小。充肥孔

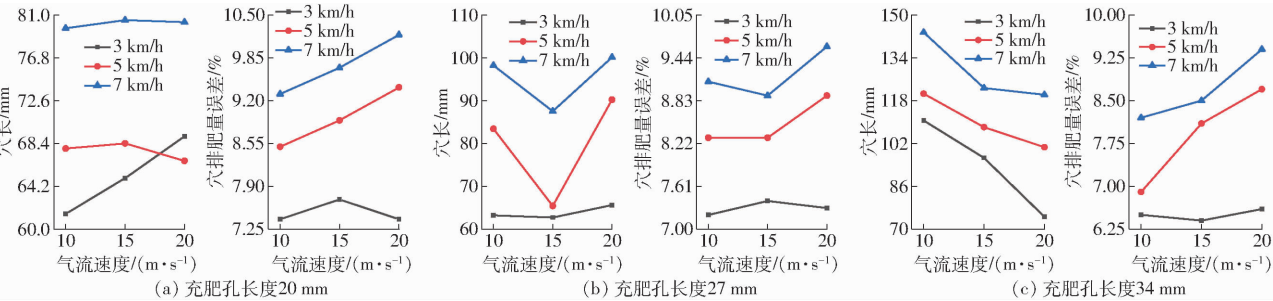


图 10 不同气流速度和作业速度下成穴性能变化曲线
Fig. 10 Influence of air velocity and working speed on performance of fertilizer discharge

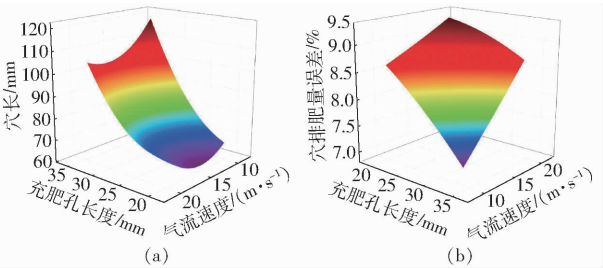


图 11 充肥孔长度和气流速度交互作用下成穴性能变化曲面
Fig. 11 Effect of length of filling hole and air velocity on performance of fertilizer discharge

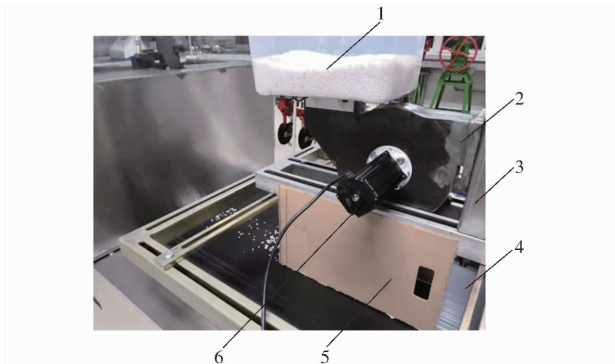


图 12 台架试验装置
Fig. 12 Photo of bench test
1. 肥箱 2. 排肥器 3. 安装架 4. 传送带 5. 护肥板 6. 步进电机

长度一定时,穴长随气流速度增大先减小后增大;气流速度一定时,穴长随充肥孔长度增大而增大;可知充肥孔长度对穴长的影响比气流速度对穴长的影响更大。

图 11b 表明,作业速度为 5 km/h、气流速度为低水平、充肥孔长度为高水平时,穴排肥量误差最小,反之最大。充肥孔长度一定时,穴排肥量误差随气流速度增大而增大;气流速度一定时,穴排肥量误差随充肥孔长度减小而增大;充肥孔长度和气流速度对穴排肥量误差的影响均较大。

综上,作业速度为 3~7 km/h 时穴长随作业速度增大而增大,穴排肥量误差随作业速度增大而减小,较优参数组合为:充肥孔长度为 27.0 mm,气流速度为 15.0 m/s,对应穴长及穴排肥量误差分别为 62.7~87.5 mm 和 7.4%~8.9%。

3 台架试验

3.1 试验条件

基于上述参数优化结果,开展两种不同肥料在不同气流速度下肥料颗粒落地分布情况和不同作业速度下的穴排肥器工作性能试验。利用美国 Stratasyss 公司生产的 Dimension Elite 型三维打印机(精度为 0.178 mm,打印材料为 ABS)注塑成型充肥轮、排肥轮,充肥孔长度为 27.00 mm,对应每穴排肥量为 5.1 g,试验在中国农业大学工学院排肥器性能测试实验室进行,试验装置如图 12 所示。

选取前述尿素颗粒和史丹利农业集团股份有限公司生产的史丹利复合肥(N-P₂O₅-K₂O 为 15-15-15),测得复合肥平均三轴尺寸为 3.83 mm×3.62 mm×3.45 mm,等效直径为 3.63 mm,球形率为 0.95,休止角为 31.6°,体积密度为 984.6 kg/m³,含水率为 0.23%。作业速度设为 3.0~7.0 km/h,即传送带速度为 0.83~1.94 m/s,其上抹一层 1 mm 厚的油脂以防肥料颗粒弹跳;调整风机转速以获得 15.0 m/s 的气流速度。试验中用到的其它设备有:HG-750 型风机,KANOMAX 型热球式压力风速仪,PTQ-A 型电子秤(量程为 2 000 g,精度 0.01 g)。

3.2 试验指标及测定方法

为评价穴排肥器工作性能,以穴长、穴长变异系数、穴排肥量误差、穴距误差为评价指标。如图 13 所示,以相邻两穴肥料堆积中心点间的距离为穴距 S_i ,穴距误差为

$$P = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{|S - S_i|}{S}}{j} \times 100\% \quad (16)$$

统计相邻两穴距中心间的肥料颗粒数,并随机选取相同粒数未沾油的肥料颗粒称量,计算穴排肥量误差(式(15))。

以每穴肥料堆积最密集点为中心点,量取绝大多数肥料颗粒散落的长度为穴长 L_i ,则平均穴长为

$$L = \frac{\sum_{i=1}^j L_i}{j}$$

(17)

穴长稳定性变异系数为

$$C_L = \frac{\sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (L_i - L)^2}}{L} \times 100\%$$

(18)

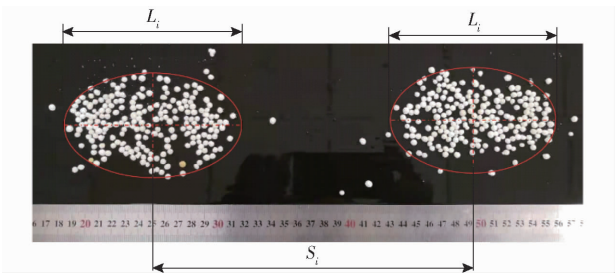


图 13 肥料颗粒散布图

Fig. 13 Diagram of fertilizer particle movement

3.3 试验结果与分析

受限于传送带长度,每次统计 14 穴肥料颗粒成穴情况,重复 3 次试验,整理数据后得到穴长、穴长稳定性变异系数、穴排肥量误差和穴距误差,统计结果如表 3 所示。

表 3 台架试验结果

Tab.3 Bench test results

肥料类型	作业速度/ (km·h ⁻¹)	穴长/ mm	穴长稳定性 变异系数/%	穴排肥量 误差/%	穴距 误差/%
尿素	3	98.5	7.79	7.60	2.5
	5	123.7	9.63	8.37	3.3
	7	166.2	14.18	14.23	4.7
复合肥	3	102.1	7.42	8.11	2.3
	5	131.6	10.56	9.68	3.2
	7	175.5	13.20	15.17	4.5

表 3 表明,在充肥孔长度为 27.0 mm、气流速度为 15.0 m/s 条件下,作业速度在 3 ~ 7 km/h 时穴长、穴长稳定性变异系数、穴排肥量误差和穴距误差分别为 98.5 ~ 175.5 mm、7.42% ~ 14.18%、7.60% ~ 15.17%、2.3% ~ 4.7%,穴长稳定性变异系数和穴排肥量误差均较小,穴距误差不大于 4.7%。文献[15]中作业速度为 7 km/h、每穴排肥量 5 g 时穴施肥量精度 84.60%,穴距精度为 86.03%,本研究设计的穴排肥器工作性能优于同类研究。

4 田间试验

为验证穴排肥器田间工作性能,在河北省石家庄市深泽县深泽镇进行田间试验,如图 14 所示。施肥深度 10 cm,理论穴距 25 cm,每穴理论施肥量 5.1 g,选用肥料为前述尿素颗粒,施肥后不覆土便于测量成穴性能指标,选用风机功率为 220 W、风量

100 m³/h,调整风机转速使穴排肥器进气管速度为 15 m/s,选取 10 m 作业长度测定穴长、穴长稳定性变异系数、穴排肥量误差和穴距误差,统计结果如表 4 所示。

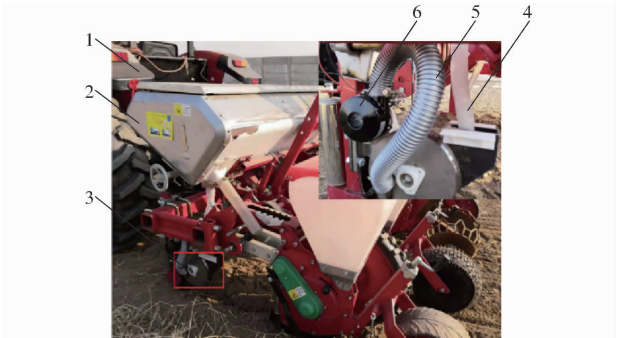


图 14 田间试验

Fig. 14 Field test

- 1.拖拉机 2.肥箱 3.穴排肥器 4.导肥管 5.导气管 6.直
流无刷风机

表 4 田间试验结果

Tab.4 Field test results

作业速度/ (km·h ⁻¹)	穴长/mm	穴长稳定性 变异系数/%	穴排肥量 误差/%	穴距 误差/%
3	104.2	7.55	7.69	2.1
5	131.8	9.73	9.36	3.0
7	178.4	14.56	13.80	4.3

由表 4 可知,穴长、穴长稳定性变异系数、穴距误差和穴排肥量误差随作业速度增大分别增大,和台架试验结果一致,表明台架试验结果可靠;作业速度为 3 ~ 7 km/h 时穴长、穴长稳定性变异系数、穴排肥量误差和穴距误差分别为 104.2 ~ 178.4 mm、7.55% ~ 14.56%、7.69% ~ 13.80%、2.1% ~ 4.3%。

5 结论

(1)为实现植株根区施肥,通过分析大颗粒尿素和复合肥颗粒的物料特性,设计了一种倾斜梯形孔式定量穴排肥器,并确定了充、排肥轮的结构参数。

(2)对气流速度进行单因素试验,结果表明,气流对成穴性能影响明显,气流速度为 10 ~ 20 m/s 时成穴性能较好。通过多因素试验分析了作业速度、充肥孔长度和气流速度对穴长、穴排肥量误差的影响,优化求解得到,当作业速度为 3 ~ 7 km/h、充肥孔长度为 27.0 mm 和气流速度为 15.0 m/s 时,穴长和穴排肥量误差分别为 62.7 ~ 87.5 mm 和 7.4% ~ 8.9%。

(3)穴排肥器工作性能台架试验表明,在作业速度为 3 ~ 7 km/h、充肥孔长度为 27.0mm 和气流

速度为 15.0 m/s 的条件下,穴长、穴长稳定性变异系数、穴排肥量误差和穴距误差为 98.5 ~ 175.5 mm、7.42% ~ 14.18%、7.60% ~ 15.17%、7.55% ~ 14.56%、7.69% ~ 13.80%、2.1% ~ 2.3% ~ 4.7%。田间试验表明,作业速度为 3 ~ 7 km/h 时,穴长、穴长稳定性变异系数、穴排肥量误差和穴距误差分别为 104.2 ~ 178.4 mm、7.55% ~ 14.56%、7.69% ~ 13.80%、2.1% ~ 4.3%,成穴性能较好。

参 考 文 献

- [1] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥科学报,2013,19(2):259-273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013,19(2): 259-273. (in Chinese)
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use and efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [3] CHEN Xinping, CUI Zhenling, FAN Mingsheng, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.
- [4] 唐汉,王金武,徐常塑,等.化肥减施增效关键技术研究进展分析[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):1-19.
TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(4):1-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.001. (in Chinese)
- [5] 王火焰,周健民.根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施[J].土壤,2013,45(5):785-790.
WANG Huoyan, ZHOU Jianmin. Root-zone fertilization—a key and necessary approach to improve fertilizer use efficiency and reduce non-point source pollution from the cropland[J]. Soils, 2013,45(5):785-790. (in Chinese)
- [6] TIMILSENA Y P, ADHIKARI R, CASEY P, et al. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015,95(6):1131-1142.
- [7] 王宜伦,白由路,谭金芳,等.采用粒片状肥料实现夏玉米一次施肥的可行性研究[J].植物营养与肥科学报,2016,22(4):1126-1132.
WANG Yilun, BAI Youlu, TAN Jinfang, et al. Availability study of once quantitative fertilization in summer maize using fertilizer tablets[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016,22(4):1126-1132. (in Chinese)
- [8] 王宜伦,李潮海,谭金芳,等.超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J].中国农业科学,2010,43(15):3151-3158.
WANG Yilun, LI Chaohai, TAN Jinfang, et al. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010,43(15):3151-3158. (in Chinese)
- [9] 王秀,赵四申,高清海,等.夏玉米免耕播种不同机械施肥方式的生态及经济效益分析[J].河北农业大学学报,2000,23(1):85-87.
WANG Xiu, ZHAO Sishen, GAO Qinghai, et al. The ecological and economic analysis of mechanical adding fertilizer in zero tillage corn seeding[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2000,23(1):85-87. (in Chinese)
- [10] 刘娇.夏玉米专用肥及精准定量施肥技术研究[D].郑州:河南农业大学,2015.
LIU Jiao. The study of summer maize special fertilizer and precision fertilization technology [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [11] ADU-GYAMFI R, AGYIN-BIRIKORANG S, TINDJINA I, et al. Minimizing nutrient leaching from maize production systems in northern Ghana with one-time application of multi-nutrient fertilizer briquettes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 694:133667.
- [12] 姜超强,王火焰,卢殿君,等.一次性根区穴施尿素提高夏玉米产量和养分吸收利用效率[J].农业工程学报,2018,34(12):146-153.
JIANG Chaoqiang, WANG Huoyan, LU Dianjun, et al. Single fertilization of urea in root zone improving crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(12):146-153. (in Chinese)
- [13] 王金武,李树伟,张翌,等.水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥系统设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(8):43-54.
WANG Jinwu, LI Shuwei, ZHANG Zhao, et al. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(8):43-54. (in Chinese)
- [14] 张勋.玉米穴播穴施肥装置的设计研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.
ZHANG Xun. Research on the equipment of hill-drop planter and fertilizer[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- [15] 吴南,林静,李宝筏.免耕播种机精量穴施肥系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(7):64-72.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa. Design and test on no-tillage planter precise hole fertilization system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(7):64-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180708&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.008. (in

- Chinese)
- [16] 张俊雄, 刘华猛, 高金, 等. 玉米分层正位穴施肥精播机 SPH 仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(9): 66–72. ZHANG Junxiong, LIU Huameng, GAO Jin, et al. Simulation and test of corn layer alignment position hole fertilization seeder based on SPH[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(9): 66–72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180907&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.007. (in Chinese)
- [17] 李沐桐, 温翔宇, 周福君. 中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(9): 37–43. LI Mutong, WEN Xiangyu, ZHOU Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9): 37–43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160906&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.006. (in Chinese)
- [18] 胡红, 李洪文, 王庆杰, 等. 玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016,32(24): 26–35. HU Hong, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between corn rows[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(24): 26–35. (in Chinese)
- [19] 刘正道, 王庆杰, 刘春鸽, 等. 腔盘式精量穴施肥装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(10): 137–144. LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LIU Chungge, et al. Design of flexible fertilizer protection mechanism for hole-fertilizing apparatus with notched plate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10): 137–144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181015&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.015. (in Chinese)
- [20] 袁文胜, 李坤, 金诚谦, 等. 穴施肥排肥器设计与试验[J]. 农机化研究, 2018,40(1): 145–149. YUAN Wensheng, LI Kun, JIN Chengqian, et al. Design and experiment of hill placement fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(1): 145–149. (in Chinese)
- [21] 刘正道, 王庆杰, 李洪文, 等. 腔盘式穴施肥装置柔性护肥机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(11): 97–103. LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11): 97–103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.011. (in Chinese)
- [22] 全国农业机械标准化技术委员会. 玉米一次性施肥技术指南:GB/T 37088—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [23] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015,52(4): 802–817. WU Liangquan, WU Liang, CUI Zhenling, et al. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(4): 802–817. (in Chinese)
- [24] 葛均筑, 展茗, 赵明, 等. 一次性施肥对长江中游春玉米产量及养分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013,19(5): 1073–1082. GE Junzhu, ZHAN Ming, ZHAO Ming, et al. Effects of single basal fertilization on yield and nutrient use efficiencies of spring maize in the Middle Reaches of Yangtze River[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013,19(5): 1073–1082. (in Chinese)
- [25] 雷小龙, 杨文浩, 刘礼阳, 等. 杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(11): 58–67. LEI Xiaolong, YANG Wenhao, LIU Liyang, et al. Design and experiment of seed hill feeding device in pneumatic centralized metering device for hybrid rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11): 58–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181107&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.007. (in Chinese)
- [26] 刘彩玲, 魏丹, 都鑫, 等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(1): 75–84. LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(1): 75–84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.008. (in Chinese)
- [27] 丁筱玲, 崔东云, 刘童, 等. 精准变量排肥器结构优化设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2019,40(1): 5–12. DING Xiaoling, CUI Dongyun, LIU Tong, et al. Optimization design and experiment of precision variable fertilizer device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(1): 5–12. (in Chinese)
- [28] 刘彩玲, 魏丹, 宋建农, 等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(9): 82–89. LIU Cailing, WEI Dan, SONG Jiannong, et al. Systematic study on boundary parameters of discrete element simulation of granular fertilizer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(9): 82–89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180909&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.009. (in Chinese)
- [29] DING Shangpeng, BAI Lu, YAO Yuxiang, et al. Discrete element modelling (DEM) of fertilizer dual-banding with adjustable rates[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,152: 32–39.