

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.007

油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验

肖文立^{1,2} 廖宜涛^{1,2} 单伊尹¹ 李蒙良¹ 王磊¹ 廖庆喜^{1,2}
(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对油菜直播机常用外槽轮排肥器排肥稳定性和均匀性不足及各行一致性低等问题,设计了一种四头螺旋双行排肥器。分析了肥料颗粒在螺旋排肥中的运动特性,确定了排肥螺旋螺距范围和临界转速,运用 EDEM 仿真分析得出排肥螺旋头数为四头和螺距为 24 mm 时,排肥器具有最佳的排肥性能;开展了排肥螺旋转速对排肥器排肥性能影响和不同肥料适应性的台架试验,试验结果表明,排肥速率随排肥螺旋转速增大而增加,单行排肥速率为 461.19 ~ 1 328.57 g/min,排肥均匀性变异系数随排肥螺旋转速增大而变小,在转速大于 30 r/min 时,排肥均匀性变异系数小于 6.5%,总排肥量稳定性变异系数和双行排肥量一致性变异系数均小于 2.2%;同时研究表明一器双行四头螺旋排肥器能适应广泛应用的不同类型油菜直播常用复合肥,3 种试验肥料排肥均匀性变异系数均满足施肥标准,总排肥量稳定性变异系数和双行排肥量一致性变异系数均低于 3.3%。田间试验结果表明,理论施肥量为 28.87 kg 时,一器双行螺旋排肥器实际施用量与理论施用量相对误差为 2.33%,排肥均匀性变异系数为 6.73%,双行排肥量一致性变异系数为 1.98%。试验结果满足油菜直播生产施肥要求,可为油菜直播排肥器的结构改进和优化提供参考。

关键词: 油菜; 排肥器; 一器双行; 定量施肥; 多头螺旋

中图分类号: S224.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0068-10 OSID: 

Design and Experiment of Quad-screw Double-row Fertilizer Apparatus for Rape Seeding Machine

XIAO Wenli^{1,2} LIAO Yitao^{1,2} SHAN Yiyin¹ LI Mengliang¹ WANG Lei¹ LIAO Qingxi^{1,2}
(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China
2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: The outer grooved wheel fertilizer apparatus commonly used in rape direct seeding machine, has problems of inadequate fertilizer stability and low consistency coefficient of each row. Therefore, a quad-screw double-row fertilizer discharging device was designed. The movement of fertilizer particles in the device was analyzed. The range of the screw pitch and the speed of screw rotation were studied. The discharging device was best performed when the number of discharging screw was four and the screw pitch was 24 mm, which was analyzed by EDEM simulations. The bench tests studied the discharging affection for the speed of screw rotation and adaptability with different fertilizers. The results showed that the discharging rate was increased while the speed of screw rotation was added from 20 r/min to 60 r/min; the discharging rate of single-row was raised from 461.19 g/min to 1 328.57 g/min as well. The coefficient of variation (CV) of discharging rate was dropped with the increment of the screw rotation speed. When the screw rotation speed was over 30 r/min, the CV of discharging rate was less than 6.5%. The CV of the total discharge rate and the CV between two single-row were both less than 2.2%. Also the results showed that the quad-screw double-row fertilizer discharging device was compatible with different types of fertilizers commonly used for rapeseed direct-seeding in Hubei Province. The CV of three kinds of fertilizers were all in keeping with the fertilization standards, and the CV of the total discharge rate and the CV between two single-row was less than 3.3%. Field test results showed that

收稿日期: 2021-05-14 修回日期: 2021-07-13
基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000904)
作者简介: 肖文立(1987—),男,工程师,博士生,主要从事油菜播种技术与装备研究,E-mail: xiaowl@mail.hzau.edu.cn
通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoxq@mail.hzau.edu.cn

when the actual discharging amount was set as 28.87 kg, the error of the discharging device between the actual discharging amount and the theoretical amount was 2.33%, the CV of discharging was 6.73%, and the CV between two single-row were both 1.98%. The results showed that the quad-screw double-row fertilizer discharging device met the demand of fertilization for rapeseed direct-seeding. The research result may provide a reference for the structural improvement of fertilizer discharging device for rapeseed direct-seeding.

Key words: rape; fertilizer apparatus; double-row; quantitative fertilization; multi-start screw

0 引言

施肥是影响作物产量的重要因素之一,合理施用化肥有利于作物生长,达到节肥高效、稳产增收的目的^[1]。降低化肥使用量成为绿色农业施肥方式的主要发展趋势,定量施肥成为提高肥料利用率与保证作物优质高产的主要途径,合理选择排肥器是实现肥料减施减量的关键^[2-4]。

油菜直播常用排肥装置为外槽轮式排肥器,可实现一器一行,满足基本施肥要求。常规外槽轮排肥器受排肥槽轮结构及肥料尺寸不规则等影响,排肥均匀性变异系数偏高^[5-8],现有外槽轮排肥器由于结构因素无法有效降低排肥脉动现象^[9],难以满足不同施肥方式下油菜直播需肥量^[10-12],螺旋排肥器具有可计量、稳定性好等优点^[13],戚江涛等^[14]研究了等径双螺旋精准给料特点,表明等径双螺旋不同螺距给料稳定性较优;吕金庆等^[15]设计了一种对向螺旋施肥器,理论计算了螺旋排肥量,解决了马铃薯施肥量大和施肥不匀的问题;陈雄飞等^[16]针对排肥装置对肥料形态特征要求高的缺陷,设计了一种两级螺旋排肥装置,建立了排肥螺旋的单圈排肥量的数学模型;杨文武等^[17]基于螺旋排肥器排肥量随时间脉动的现象,开展了螺旋排肥器排肥口长度和排肥口角度对排肥性能影响关系的分析。位国建等^[18]设计了一种水田机械式强制排肥装置,试验表明机械式强制螺旋排肥装置工作稳定、堵塞率低。薛忠等^[19]基于离散元分析了排肥螺旋参数和排肥轴转速对排肥器排肥性能的影响,获得排肥器工作参数与排肥量和排肥稳定性变异系数的回归数学模型。以上研究依据作物需肥量,对螺旋排肥量进行了理论分析与计算,分析了影响排肥稳定的结构参数,但研究对象均为单头排肥螺旋^[19-22]。对多头螺旋排肥研究较少^[23-24]。

为适应长江中下游冬油菜产区油菜直播对肥料需求,结合常用复合肥物理特性与油菜直播施肥要求,本文设计一种四头螺旋双行排肥器,运用 EDEM 仿真确定排肥螺旋类型和排肥器主要结构参数,比较不同头数螺旋与转速对排肥性能影响,以期提高螺旋排肥器排肥均匀性,为油菜直播排肥器结构改

进和优化提供参考。

1 排肥器结构与工作过程

1.1 四头螺旋双行排肥器结构

油菜精量联合直播机能一次完成开沟、破茬、种床旋耕、精量播种、施肥、覆土等作业^[12]。为满足长江中下游冬油菜产区油菜直播不同需肥量要求,设计了一种与其配套的四头螺旋双行排肥器,其结构示意图如图 1 所示,为保证两侧肥腔肥料均匀,在排肥器上方设计分肥器,为利于排肥器与肥箱间落肥流畅,采用破结装置对肥料进行搅拌,增强肥料流动性的同时对成团肥料破结,避免肥料成拱。破结装置下方通过排肥螺旋施肥,保证肥料输送稳定。

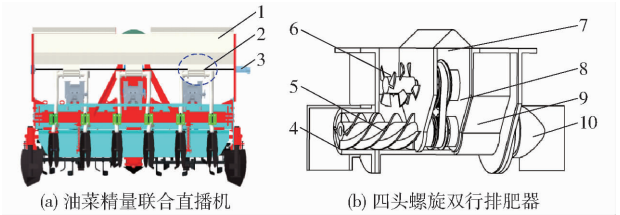


图 1 排肥器结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams of fertilizer apparatus

1. 油菜直播机肥箱 2. 排肥器 3. 驱动电机 4. 左导肥管
5. 排肥螺旋 6. 破结装置 7. 分肥器 8. 中间传动部件 9. 排肥器外壳 10. 右导肥管

1.2 排肥器工作过程

排肥器工作时,肥料由肥箱落入排肥器,分肥器将肥料分流到排肥器两侧,驱动电机通过联轴器与破结轴联动,从而驱动破结装置,并由中间传动带动排肥螺旋作业。破结装置对肥料进行搅拌,提高落肥均匀性的同时防止肥料因受潮结拱导致排肥不畅,搅拌后的肥料经排肥螺旋和导肥管均匀输送,最后经过排肥管落下,完成排肥过程。

2 排肥螺旋主要参数设计与分析

四头螺旋双行排肥器性能主要取决于排肥螺旋,其参数设计直接影响排肥器的排肥稳定性与均匀性。排肥螺旋结构参数如图 2 所示。

2.1 单位时间排肥速率

单位时间排肥速率受螺旋转速及填充系数等因素影响,排肥器排肥速率难以准确计算。为保证理

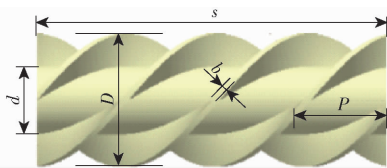


图2 排肥螺旋结构参数示意图

Fig.2 Structural parameters diagram of fertilizer screw

论排肥速率的准确性,在不考虑轴向阻力影响下,单位时间内排肥速率 $Q^{[16]}$ 计算式为

$$Q = \frac{\pi S[(D+2l)^2 - d^2] - 4ZbhL_p n \varphi \gamma \beta}{4} \quad (1)$$

$$\text{其中 } L_p = \sqrt{[\pi(D+d)/2]^2 + P^2} \quad (2)$$

$$h = \frac{D-d}{2} \quad (3)$$

式中 Z ——螺旋头数,对于单螺杆 $Z=1$

S ——螺旋导程,mm

D ——螺旋叶片外径,mm

l ——螺旋叶片与导肥管内壁间隙,mm

d ——螺旋叶片内径,mm

b ——螺旋厚度,mm

h ——螺旋深度,mm

L_p ——螺旋单位长度,mm

P ——排肥螺旋螺距,mm

n ——排肥轴转速,r/min

φ ——填充系数

γ ——复合肥容重,kg/m³

β ——螺旋叶片倾斜系数

实际田间作业时,单位时间农艺要求施肥量^[25]

为

$$Q_n = \frac{Q_a B v}{10^6} \quad (4)$$

式中 Q_n ——单位时间农艺要求的施肥量,g/s

Q_a ——农艺要求的单位面积目标施肥量,kg/hm²

v ——施肥作业速度,m/s

B ——施肥幅宽,m

单位时间内农艺要求的施肥量与排肥器排肥量

相等,结合式(1)、(4)可得

$$Q_a = \frac{10^6 \{ \pi S[(D+2l)^2 - d^2] - 4ZbhL_p \}}{4Bv} n \varphi \gamma \beta \quad (5)$$

由式(5)可知,田间作业时,施肥幅宽 B 、机具前进速度 v 一定,目标施肥量与 D 、 d 、 l 、 Z 、 b 、 P 、 n 、 φ 、 γ 及 β 有关。肥料物料特性一定的前提下,改变螺旋类型(头数)、螺距 P 和排肥轴转速 n 可有效调节排肥速率;不同类型排肥螺旋和不同转速 n 决定着排肥均匀性与稳定性;排肥螺旋转速具有一定的适

宜区间,目标施肥量相同时,低转速有利于肥料填充^[23]。

综合考虑四头螺旋双行排肥器整体结构并满足肥管设计要求^[16,18],确定螺旋叶片外径 D 为 38 mm。依据肥料颗粒尺寸,避免小颗粒肥料夹塞产生破碎,选定螺旋叶片与导肥管内壁间隙 l 为 1 mm。

2.2 排肥螺旋排肥分析

螺距影响螺旋升角及肥料在输送过程中的堆积方式,对单个螺距内充肥、排肥性能均有显著影响^[18]。基于保证肥料在螺旋内连续稳定输送的要求,应避免单个螺距内出现肥料夹塞和螺旋叶片轴向推力不足等问题。

大螺距有利于肥料填充,增加肥料之间相互接触,易发生“打滑”现象,避免肥料夹塞出现。根据物料流动特性,排料口最小尺寸至少应为物料颗粒尺寸 3~6 倍^[26],即螺距应满足有 3 颗及以上肥料均布,即

$$P > 3d_f \quad (6)$$

式中 d_f ——肥料平均等效直径,mm

排肥过程中,为实现肥料颗粒有序输送,肥料所受的轴向推力应大于摩擦阻力。图 3 为肥料在输送过程中的受力分析^[23]。

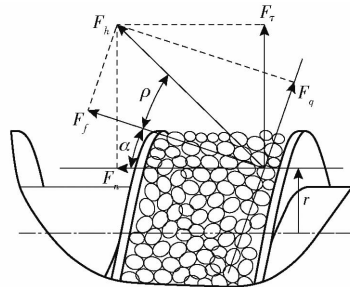


图3 螺旋中肥料颗粒受力分析图

Fig.3 Force diagram of fertilizer particles in screw

由图 3 可得

$$F_n = F_h \cos(\alpha + \rho) \quad (7)$$

$$F_\tau = F_h \sin(\alpha + \rho) \quad (8)$$

$$\text{其中 } \alpha = \arctan \frac{P}{2\pi r} \quad (9)$$

$$\rho = \arctan \mu \quad (10)$$

式中 F_n ——肥料颗粒所受轴向分力,N

F_τ ——肥料颗粒所受周向分力,N

F_h ——肥料颗粒所受合力,N

r ——肥料离轴中心的距离,mm

α ——距轴线距离 r 处的螺旋升角,(°)

ρ ——肥料对螺旋面的摩擦角,约等于合力与法线的夹角,(°)

μ ——肥料与螺旋面摩擦因数

当排肥器作业时,排肥螺旋轴向推力须满足

$F_n > 0$ 才能实现轴向运动。由式(7)可得

$$\alpha < \frac{\pi}{2} - \rho \quad (11)$$

排肥螺旋上各点的螺旋升角随点到螺旋轴中心的距离而变化,由式(7)可知,当肥料接触螺旋轴时螺旋升角最大,肥料受到的轴向力最小。由式(9)~(11)可得

$$P_{\max} < \frac{\pi d}{\mu} \quad (12)$$

图 4 为肥料在螺旋输送过程中运动分析^[26],肥料颗粒速度 V_h 可分解为圆周速度 V_y 和轴向速度 V_x 。

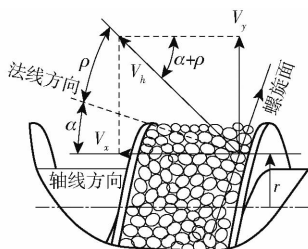


图 4 螺旋中肥料颗粒运动分解图

Fig. 4 Motion decomposition diagram of fertilizer particles in screw

由图 4 可得肥料颗粒速度与圆周速度 V_y 、轴向速度 V_x 间的关系为

$$\begin{cases} V_h = \frac{2\pi r n \sin \alpha}{60 \cos \rho} \\ V_y = V_h \sin(\alpha + \rho) \\ V_x = V_h \cos(\alpha + \rho) \end{cases} \quad (13)$$

由式(9)、(10)及

$$\begin{cases} \sin \alpha = \frac{\frac{P}{2\pi r}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P}{2\pi r}\right)^2}} \\ \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{P}{2\pi r}\right)^2}} \end{cases} \quad (14)$$

则 V_x 、 V_y 表示为

$$\begin{cases} V_y = \frac{Pn \left(\frac{P}{2\pi r} + \mu \right)}{60 \left[\left(\frac{P}{2\pi r} \right)^2 + 1 \right]} \\ V_x = \frac{Pn \left(1 - \mu \frac{P}{2\pi r} \right)}{60 \left[\left(\frac{P}{2\pi r} \right)^2 + 1 \right]} \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知,螺距 P 和转速 n 是轴向速度和圆周速度的主要影响因素。确定最大许用螺距时须满足肥料颗粒具有合理速度分量,即轴向速度越大越好,同时满足 $V_x \geq V_y$,即

$$P \leq \pi D \tan \left(\frac{\pi}{4} - \rho \right) \quad (16)$$

基于输送过程中肥料受力与运动分析,螺距应满足

$$\begin{cases} P > 3d_f \\ P_{\max} \leq \frac{\pi d}{\mu} \\ P \leq \pi D \tan \left(\frac{\pi}{4} - \rho \right) \end{cases} \quad (17)$$

将已知参数 d_f 、 d 、 ρ 、 D 代入式(17),计算得排肥螺旋螺距为 10.32 ~ 36.38 mm。

2.3 排肥螺旋转速

转速是影响螺旋排肥器性能的关键因素^[23]。当排肥器作业时,肥料颗粒在重力及摩擦力的作用下,沿着排肥螺旋叶片输送方向运动。当转速低于一定范围时,肥料间相对滑动少,易出现堵塞现象^[26]。当螺旋转速大于过临界转速,肥料因离心力过大将沿垂直于输送方向跳跃翻滚,易产生碰撞挤压而破碎。此时排肥螺旋叶片主要为搅拌肥料,对肥料颗粒轴向推进作用较小。为实现肥料正常输送,螺旋轴转速应低于其临界值。临界情况下肥料所受惯性离心力与自身重力应该满足以下条件

$$m\omega_{\max}^2 r \leq mg \quad (18)$$

其中

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi n_{\max}}{60} \quad (19)$$

式中 $\omega_{\max}$ ——排肥螺旋最大角速度,rad/s

考虑肥料的综合系数影响,则

$$n_{\max} \leq \frac{30k}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{D}} \quad (20)$$

式中 k ——物料综合特性系数^[17]

令 $A = \frac{30k\sqrt{2g}}{\pi}$,则式(20)可转换为

$$n_{\max} \leq \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (21)$$

考虑实际排肥速率,选取 $A = 25$,计算可得 $n_{\max} \leq 125$ r/min。

3 排肥螺旋类型与螺距确定

螺旋排肥过程中易出现排肥量周期波动现象,主要包括以下两方面原因:①螺旋中肥料为准静态流,肥料动能主要来自颗粒间接触力链作用,排肥口肥料由于力链作用而同时掉下。②螺旋周期性转动而引起的螺旋与排肥导管尺寸变化^[17]。为选定较优的排肥螺旋类型,本文选取单头、双头、三头、四头 4 种类型螺旋进行分析^[24]。

3.1 仿真模型建立与试验方法

仿真试验以螺旋类型为试验因素,以排肥性能为试验指标,目的是得到较优的排肥螺旋类型与螺

距。为确保不同类型排肥螺旋总排肥量一致,结合油菜直播常用需肥量,螺旋导程设为 48 mm,螺旋转速为 30 r/min。破结装置与排肥螺旋转速比设定为 0.75^[25]。运用 EDEM 2020 对不同类型排肥螺旋进行仿真试验。

3.1.1 仿真模型建立

仿真模型主要由外壳、排肥螺旋、破结装置、导肥管 4 部分组成。材质均为工程塑料 ABS。肥料颗粒为类球形,选取母女红复合肥中间尺寸肥料颗粒扫描得到其外形,仿真中导入肥料颗粒扫描模型,接触模型选取 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型。仿真模型如图 5 所示,肥料、工程塑料 ABS 的材料特性及其相互间仿真参数见表 1^[17,20]。

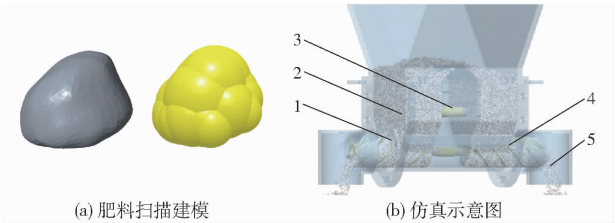


图 5 排肥器 EDEM 仿真

Fig.5 EDEM simulation of fertilizer apparatus

1. 排肥器外壳 2. 肥料 3. 破结装置 4. 排肥螺旋 5. 导肥管

表 1 肥料与排肥器仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of fertilizer and material properties

属性	参数	数值
颗粒	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 122
	泊松比	0.28
	剪切模量/Pa	2.7×10^8
ABS 材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 335
	泊松比	0.39
	剪切模量/Pa	8.96×10^8
相互作用	肥料间恢复系数	0.30
	肥料间静摩擦因数	0.32
	肥料间动摩擦因数	0.11
	肥料与 ABS 恢复系数	0.35
	肥料与 ABS 静摩擦因数	0.46
	肥料与 ABS 动摩擦因数	0.30

3.1.2 仿真模型建立

仿真时间为 15 s,以肥料颗粒力、肥料颗粒速度、瞬时排肥效果开展排肥螺旋排肥性能定性分析。肥料颗粒接触力为螺旋上方肥料颗粒在排肥过程中所受合力,颗粒接触力分布不均易造成排肥螺旋填充不均,从而导致排肥不均匀。肥料颗粒速度为颗粒在螺旋内运动速率,螺旋内颗粒轴向速度越大,越不容易出现堵塞现象。瞬时排肥效果截取同一周期不同相位角瞬时排肥状态,不同相位脉冲越小,排肥越均匀。为便于观察,肥料颗粒力、肥料颗粒速度沿

螺旋轴线的中心平面展开分析。

取肥料填充系数、排肥量均匀性变异系数与排肥口瞬时排肥速率变异系数开展排肥螺旋排肥性能定量分析。肥料填充系数为肥料在不同螺旋段填充系数,即单位长度内肥料颗粒所占体积与等长度排肥螺旋空间体积的比值。变异系数按 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》测定^[27]。每种试验条件下取 3 组数据求平均值。单一试验条件下评价指标数值为两侧均值。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 不同类型排肥螺旋排肥性能定性分析

图 6 为仿真试验 9 s 时 4 种不同类型排肥螺旋上方颗粒接触力(箭头表示接触力方向,深蓝色为 0,红色为峰值接触力)^[24,28]。单头和双头排肥螺旋上方红色区域集中在出料口端壁;三头排肥螺旋上方红色区域分布在螺旋始端壁和出料端壁;四头排肥螺旋上方红色区域均匀分布。比较 4 种不同类型排肥螺旋,四头排肥螺旋上方肥料颗粒受力较均匀。

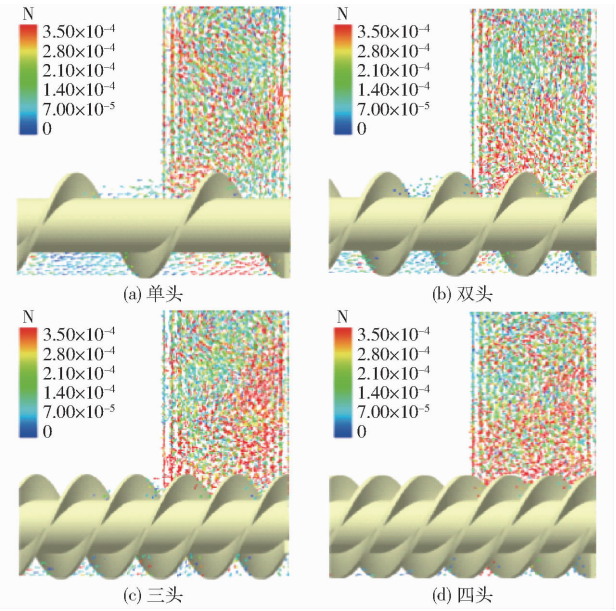


图 6 9 s 时不同类型排肥螺旋中心平面颗粒接触力

Fig.6 Particle force profiles in centre plane of different types of screw at 9 s

图 7 为仿真试验 9 s 时 4 种不同类型排肥螺旋颗粒速度(箭头表示速度方向,深蓝色为 0,红色为峰值速度)。排肥螺旋转速一定的情况下,由图 7 可知,随着排肥螺旋头数增加,螺旋内红色区域占比越大,螺旋内轴向速度大的肥料颗粒越多^[24,29],即四头排肥螺旋内肥料颗粒均速最大。

针对螺旋排肥过程中易出现脉冲现象,对 4 种类型排肥螺旋进行了瞬时排肥特性分析^[17]。图 8 为 4 种排肥螺旋不同相位瞬时排肥效果。单头、双头和三头排肥螺旋脉冲现象明显,主要原因是排肥

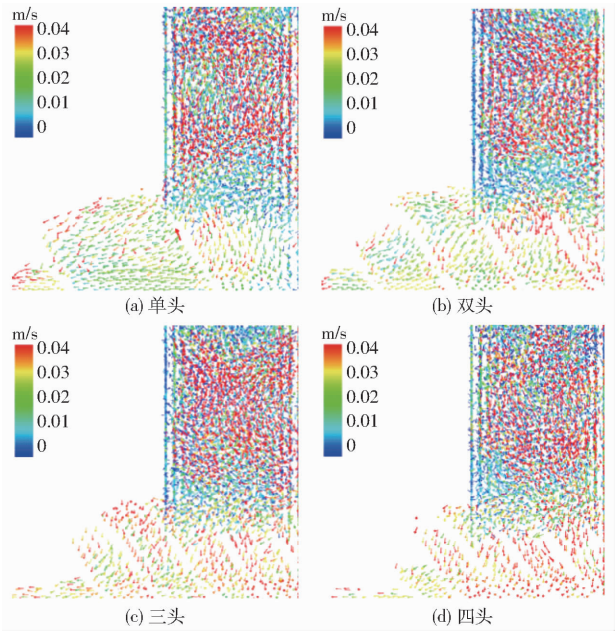


图 7 9 s 时不同类型排肥螺旋中心平面颗粒速度
Fig. 7 Particle velocity in centre plane of different types of screw at 9 s

螺旋与导肥管之间排肥口大小变化不规律。对于双头螺旋和三头螺旋,螺旋相位重叠也是影响排肥均匀性的重要因素。由图 8 可知,四头排肥螺旋瞬时排肥均匀性较好,是由于四头螺旋叶片在圆周呈对称布置,在任意相位起到互补作用。

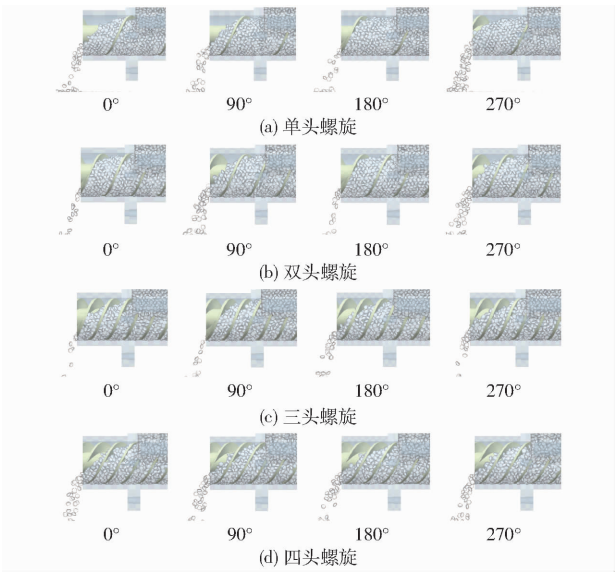


图 8 不同类型排肥螺旋 9 ~ 11 s 不同相位瞬时排肥效果
Fig. 8 Fertilization effect in different phases of different types of screw at 9 ~ 11 s

相较单头、双头、三头螺旋,四头排肥螺旋上方颗粒接触力分布均匀,排肥螺旋内肥料颗粒速度大,瞬时排肥均匀性较好,具有较优排肥性能。

3.2.2 不同类型排肥螺旋排肥性能定量分析

填充系数影响着排肥器排肥效率,其稳定性决定了排肥的均匀性^[17]。图 9 为不同类型排肥螺旋

分段填充系数。不同类型排肥螺旋肥料填充系数从螺旋始端到排肥口均呈先增加再减小的趋势。填充系数变化幅度越小,表明肥料填充越均匀。图 9 显示,四头排肥螺旋分段填充系数变化幅度最小,整个螺旋段具有较均匀的肥料填充性。

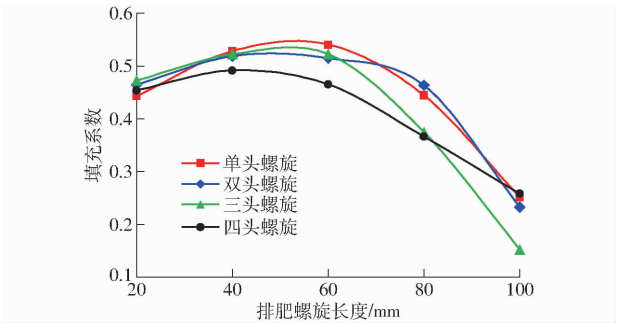


图 9 不同类型排肥螺旋分段填充系数
Fig. 9 Packing fraction in different spaces of different types of screw

不同排肥螺旋类型对排肥均匀性变异系数与瞬时排肥速率变异系数的影响如图 10 所示。

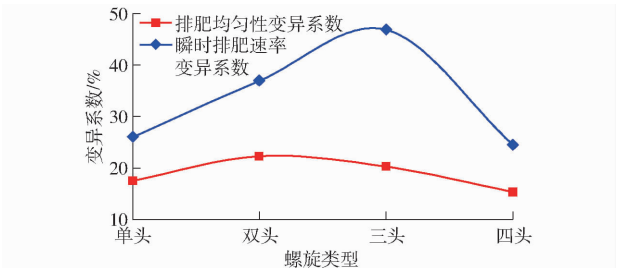


图 10 螺旋类型对排肥性能的影响
Fig. 10 Effect of screw type on fertilizer discharge performance

在导程和转速一定时,4 种不同排肥螺旋排肥均匀性变异系数与瞬时排肥速率变异系数均呈先增大后减小的趋势,双头排肥螺旋排肥均匀性变异系数最大,为 22.27%,四头排肥螺旋排肥均匀性变异系数最小,为 15.32%;四头排肥螺旋瞬时排肥速率变异系数最小,为 24.49%。综合考虑排肥器结构与排肥性能,在导程和转速一定的情况下,四头排肥螺旋排肥性能较优。

3.2.3 螺距对四头排肥螺旋排肥性能分析

在确定螺旋类型的前提下,为得到四头排肥螺旋较优参数,以螺距为试验因素。选取螺距为 12 ~ 36 mm、增量为 6 mm、转速为 30 r/min。研究不同螺距对排肥均匀性变异系数及瞬时排肥速率变异系数的影响。得到排肥均匀性变异系数及瞬时排肥速率变异系数与螺距的关系如图 11 所示。

由图 11 可知,在许用螺距范围内,排肥均匀性变异系数随螺距增大先减小后增大,在螺距为 24 mm 时达到最小值 6.27%,随后缓慢变大达到稳态。瞬时排肥速率变异系数在许用螺距范围

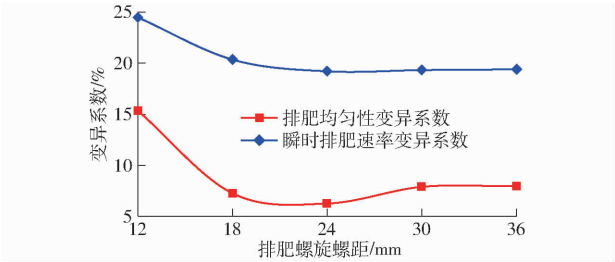


图 11 螺距对排肥性能的影响

Fig.11 Effect of screw pitch on fertilizer discharge performance

内,随螺距增大逐渐减小,当螺距大于 24 mm,瞬时排肥速率变异系数趋于稳定。在螺距为 24 mm

表 2 试验用复合肥基本物理参数

Tab.2 Basic physical parameters of compound fertilizer for experiment					
名称	养分及比例	等效直径/mm	容重/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	球形度	休止角/($^{\circ}$)
三宁	$\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=17:17:17$,总养分大于等于 51%	3.08	820.14	0.94	27.7
常青树	$\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=15:15:15$,总养分大于等于 45%	3.19	1 122.5	0.92	29.3
母女红	$\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=16:16:16$,总养分大于等于 48%	3.44	915.3	0.83	33.9

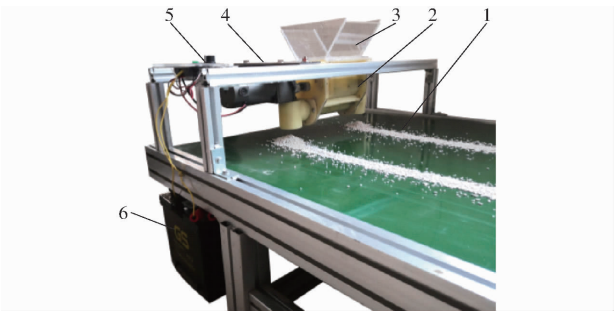


图 12 台架试验

Fig.12 Bench test

1. 系统台架 2. 四头螺旋双行排肥器 3. 肥箱 4. 减速电机
5. 调速系统 6. 蓄电池

4.2 试验设计与方法

为确定四头螺旋双行排肥器排肥速率以适应油菜直播不同施肥量要求和机具作业速度,以母女红复合肥为试验材料开展了不同转速下四头螺旋双行排肥器台架试验,根据油菜直播施肥量要求,排肥器选取转速为 20~60 r/min,以 10 r/min 为增量,试验重复 3 次。为检验排肥器对不同肥料适应性,以三宁复合肥、常青树复合肥、母女红复合肥为试验材料,分析转速为 20、40、60 r/min 条件下排肥性能。试验均以排肥均匀性变异系数、总排肥量稳定性变异系数(1 min 内排肥量)和双行排肥量一致性变异系数为评价指标。试验按照 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》^[27] 进行排肥器排肥性能试验和测定。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 排肥螺旋转速对排肥性能的影响

排肥螺旋转速对排肥性能的影响结果(图 13)

时,排肥均匀性变异系数和瞬时排肥速率变异系数较优。

综上,当螺旋类型为四头排肥螺旋,螺距为 24 mm 时,排肥器具有最佳的排肥性能。

4 四头螺旋双行排肥器台架试验

4.1 试验材料与装置

以三宁复合肥、常青树复合肥、母女红复合肥 3 种湖北省内油菜直播常用复合肥为试验材料,应用自制的试验台架开展不同类型肥料适应性试验^[29],肥料机械物理特性参数见表 2,排肥器试验台如图 12 所示。

表明,排肥速率随着排肥螺旋转速增加而增加,在目标施肥量范围内,单行排肥速率为 461.19~1 328.57 g/min,排肥速率满足课题组研制油菜精量联合直播机单行不同施肥量要求。每分钟实际排肥量与仿真排肥量偏差在 9% 以内,是由于肥料填充系数差别导致。排肥均匀性变异系数随排肥螺旋转速增加而降低,当转速大于 30 r/min 时,均匀性变异系数低于 6.5%。总排肥量稳定性变异系数和双行排肥量一致性变异系数均低于 2.2%。评价指标均满足 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》中排肥均匀性变异系数要求。在油菜直播需肥量范围内,排肥螺旋转速越高,四头螺旋双行排肥器排肥性能越好。

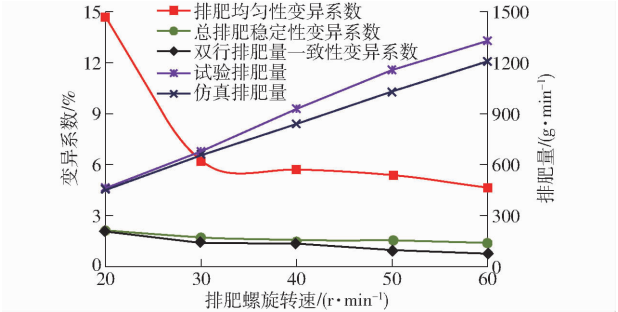


图 13 转速对排肥性能的影响曲线

Fig.13 Effect of rotational speed on fertilizer discharge performance

4.3.2 排肥器对油菜直播常用肥料适应性分析

不同复合肥具有不同的表征参数和流动特性,为检验排肥器对不同肥料的适应性,本文选取湖北省内油菜直播常用三宁复合肥、常青树复合肥、母女

红复合肥 3 种肥料作为试验材料进行台架试验,肥料相关参数如表 2 所示。图 14 为排肥器转速为 40 r/min 时,3 种不同肥料排肥效果。表 3 为不同类型复合肥对排肥性能的影响。

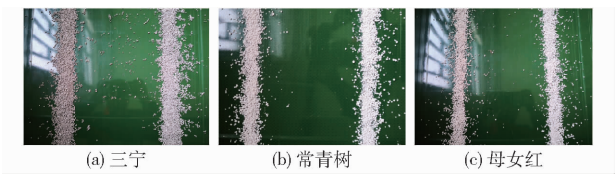


图 14 排肥器对油菜直播常用复合肥适应性
Fig. 14 Adaptability of fertilizer feeding device to common granular fertilizer for rape direct seed

由图 14 和表 3 可知,3 种肥料在输送带上分布较均匀。不同肥料施肥带宽度存在一定差异性,主要与肥料球形度及休止角有关,不考虑其他因素影响,肥料球形度越大,肥料休止角越小,施肥带越宽,肥料分布越均匀。

表 3 排肥器对不同复合肥适应性分析				
Tab. 3 Adaptability analysis of fertilizer feeding device to common granular fertilizer for rape direct seed				
名称	排肥螺旋 转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	均匀性变 异系数/ %	稳定性 变异系数/ %	双行排肥量 一致性变 异系数/%
三宁	20	13.54	2.69	1.96
	40	5.33	1.95	1.25
	60	4.61	1.58	0.83
常青树	20	14.72	2.91	2.17
	40	5.94	2.12	1.45
	60	4.86	1.81	0.99
母女红	20	16.75	3.24	2.48
	40	6.14	2.55	1.82
	60	5.28	1.99	1.28

5 田间试验

为进一步验证台架试验结果,考察油菜四头螺旋双行排肥器的排肥性能,于 2020 年 12 月 28 日在华中农业大学现代农业科研基地开展了油菜直播排肥性能试验(图 15),前茬作物为水稻,复合肥选用母女红复合肥,目标施肥量为 450 kg/hm^2 。试验以阿波斯 1204 拖拉机为牵引动力,机组平均前进速度为 2.48 km/h ,作业幅宽为 $2\,000 \text{ mm}$,采用肥料侧方

位混施,试验中将拖拉机蓄电池作为直流电机电源,通过步进电机调速器驱动并调节油菜一器双行螺旋排肥器转速,转速为 40 r/min 。试验田面积为 0.05 hm^2 ,预测施肥量为 28.87 kg ,实际施肥量为 29.54 kg ,实际施肥量与台架试验值相对误差为 2.33% ,实际排肥均匀性变异系数为 6.73% ,与台架测试值相差 0.59% 。双行排肥量一致性变异系数为 1.98% 。表明设计的排肥器满足油菜直播基肥施用要求。



图 15 田间试验
Fig. 15 Field test
1. 油菜精量联合直播机 2. 拖拉机 3. 肥箱 4. 四头螺旋双行排肥器 5. 直流电机 6. 复合肥

6 结论

- (1)排肥性能仿真试验表明,螺旋类型为四头,螺距为 24 mm 时,排肥螺旋具有最佳的排肥性能。
- (2)台架试验研究排肥螺旋转速为 $20 \sim 60 \text{ r/min}$ 时排肥器排肥性能,结果表明,双行螺旋排肥器排肥均匀性变异系数、总排肥量稳定性变异系数、双行排肥量一致性变异系数均随排肥螺旋转速增加而降低,当转速大于 30 r/min 时,均匀性变异系数低于 6.5% ;总排肥量稳定性变异系数和双行排肥量一致性变异系数均低于 2.2% 。同时不同肥料适应性试验结果表明,试验转速范围内 3 种肥料排肥均匀性变异系数均满足施肥标准,总排肥量稳定性变异系数和双行排肥量一致性变异系数均低于 3.3% 。
- (3)田间试验结果表明,目标施肥量为 28.87 kg 时,实际施肥量与试验目标施肥量相对误差为 2.33% ,田间试验排肥均匀性变异系数为 6.73% ,双行排肥量一致性变异系数为 1.98% 。满足油菜直播基肥施用量与排肥均匀性要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 兰志龙,MUHAMMAD N K, TANVEER A S,等. 25 年长期定位不同施肥措施对关中壤土水力学性质的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(24):100-106.

- LAN Zhilong, MUHAMMAD N K, TANVEER A S, et al. Effects of 25-year located different fertilization measures on soil hydraulic properties of lou soil in Guanzhong area [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 100–106. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 刘晓东,丁幼春,舒彩霞,等.螺旋锥体离心式排肥器扰动防堵机理分析与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(12):44–54.
LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Mechanism analysis and test of disturbance and blockage prevention of screw cone centrifugal fertilizer apparatus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 44–54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.005. (in Chinese)
- [5] 王金峰,高观保,王金武,等.叶片调节式水田侧深施肥装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(3):68–76.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, WANG Jinwu, et al. Design and test of adjustable blades side deep fertilizing device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 68–76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180308&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.008. (in Chinese)
- [6] 祝清震,武广伟,陈立平,等.槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J].农业工程学报,2018,34(18):12–20.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 12–20. (in Chinese)
- [7] 顿国强,高志勇,郭艳玲,等.圆弧齿轮排肥器圆弧结构参数仿真试验及优化[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2020,46(5):625–636.
DUN Guoqiang, GAO Zhiyong, GUO Yanling, et al. Simulation test and optimization for structural parameters of circular arc gear discharging fertilizer apparatus[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2020, 46(5): 625–636. (in Chinese)
- [8] 刘彩玲,张福印,都鑫,等.水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(增刊1):165–174.
LIU Cailing, ZHANG Fuyin, DU Xin, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1):165–174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.019. (in Chinese)
- [9] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2018.
- [10] 邹楠.油菜移栽机施肥装置的设计与试验研究[D].长沙:湖南农业大学,2016.
ZOU Nan. Design and experimental study of fertilizer apparatus of rape transplanting machine[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [11] 肖文立,肖文芳,廖宜涛,等.油菜直播机犁式正位深施肥装置设计与性能试验[J].华中农业大学学报,2018,37(4):131–137.
XIAO Wenli, XIAO Wenfang, LIAO Yitao, et al. Design and performance test of plough-type positive deep fertilizer apparatus for rapeseed direct planter[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(4): 131–137. (in Chinese)
- [12] 廖宜涛,高丽萍,廖庆喜,等.油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(2):65–75.
LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 65–75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002008&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.008. (in Chinese)
- [13] 涂德浴,许爱华,陈欣,等.生物质螺旋输送过程静力学分析及数值模拟[J].机械设计,2015,32(4):81–86.
TU Deyu, XU Aihua, CHEN Xin, et al. Force characteristics analysis and numerical simulation of biomass screw feeder in feeding process[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(4): 81–86. (in Chinese)
- [14] 臧江涛,蒙贺伟,坎杂,等.基于EDEM的双螺旋奶牛饲喂装置给料性能分析与试验[J].农业工程学报,2017,33(24):65–71.
QI Jiangtao, MENG Hewei, KAN Za, et al. Analysis and test of feeding performance of dual-screw cow feeding device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 65–71. (in Chinese)
- [15] 吕金庆,王泽明,孙雪松,等.马铃薯螺旋推进式排肥器研究与试验[J].农机化研究,2015,37(6):194–196,200.
LÜ Jinqing, WANG Zeming, SUN Xuesong, et al. Design and experimental study of feed screw potato planter propulsion[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 194–196, 200. (in Chinese)
- [16] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等.两级螺旋排肥装置的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(3):10–16.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of a fertilizer distribution apparatus with double-level screws[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 10–16. (in Chinese)
- [17] 杨文武,方龙羽,罗锡文,等.螺旋排肥器排肥口参数对排肥性能影响的试验研究[J].农业工程学报,2020,36(17):1–8.
YANG Wenwu, FANG Longyu, LUO Xiwen, et al. Experimental study of the effects of discharge port parameters on the fertilizing performance for fertilizer distribution apparatus with screw[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 1–8. (in Chinese)
- [18] 位国建,祁兵,焦伟,等.水田机械式强制排肥装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(增刊1):154–164.
WEI Guojian, QI Bing, JIAO Wei, et al. Design and experiment of mechanical forced fertilizing device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1):154–164. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s118&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.018. (in Chinese)
- [19] 薛忠,赵亮,王凤花,等.基于离散元法的螺旋式排肥器性能模拟试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(5):548–553.
XUE Zhong, ZHAO Liang, WANG Fenghua, et al. Performance simulation test of the screw fertilizer distributor based on

- discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition), 2019, 45(5): 548–553. (in Chinese)
- [20] 曹艳文. 基于离散元法的螺旋式排肥器仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
CAO Yanwen. Simulation analysis and experimental study of screw fertilizer distributor based on EDEM[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [21] 赵亮. 基于离散元的芒果施肥机螺旋式排肥器仿真与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
ZHAO Liang. Simulation and test of screw fertilizer sprinkler of mango fertilizer based on discrete element[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [22] JUSTIN W F, PAUL W C, WILLIAM M. Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(22): 5585–5601.
- [23] ROBERTS A W. The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors[J]. Powder Technology, 1999, 104(1): 56–67.
- [24] GUILHEM D, PIERRE-ANDRE G, NICOLAS D, et al. Computational fluid dynamics modeling for the design of Archimedes screw generator[J]. Renewable Energy, 2018, 118: 847–857.
- [25] 雷小龙, 李蒙良, 张黎骅, 等. 颗粒化肥水平气送式螺旋组合可调定量供肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 9–18.
LEI Xiaolong, LI Mengliang, ZHANG Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 9–18. (in Chinese)
- [26] 洪致育, 林良明. 连续运输机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [27] NY/T 1003—2006 施肥机械质量评价技术规范[S]. 2006.
- [28] 石云飞, 张西良, 徐云峰, 等. 加料机单、双头螺旋对颗粒群接触力的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 76–81.
SHI Yunfei, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. Effect of single/double screw feeder on contact force of particles[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 76–81. (in Chinese)
- [29] 杨庆璐, 李子涵, 李洪文, 等. 基于 CFD-DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 81–89.
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81–89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190809&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)
-
- (上接第 48 页)
- [23] 张仕林, 赵武云, 戴飞, 等. 全膜双垄沟起垄覆膜机镇压作业过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 20–30.
ZHANG Shilin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation analysis and test on suppression operation process of ridging and film covering machine with full-film double-furrow[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 20–30. (in Chinese)
- [24] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 微垄式覆膜覆土联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 97–105, 129.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of operation machine for filming and covering soil on tiny ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 97–105, 129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200311&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.011. (in Chinese)
- [25] 刘宏俊, 赵淑红, 谭贺文, 等. 基于刮削与振动原理的减粘降阻镇压装置研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 86–92.
LIU Hongjun, ZHAO Shuhong, TAN Hewen, et al. Investigation on press device in reducing adhesion and resistance based on scrape and vibration principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 86–92. (in Chinese)
- [26] JIA Q, CHEN K, CHEN Y, et al. Mulch covered ridges affect grain yield of maize through regulating root growth and root-bleeding sap under simulated rainfall conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 101–111.
- [27] 张付根, 薛金国, 尤扬. 城市园林设计[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [28] 张晓伟, 蒋武生, 原玉香. 白菜甘蓝优质高效栽培技术[M]. 郑州: 中原农民出版社, 2008.
- [29] 车艳芳, 杨英茹. 白菜萝卜辣椒种植技术[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2014.
- [30] 王金峰, 王金武, 孔彦军, 等. 悬挂式水田筑埂机及其关键部件研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 28–34.
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, KONG Yanjun, et al. Development and experiment of suspension ridger and its key components for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 28–34. (in Chinese)
- [31] 孙一源. 农业土壤力学[M]. 北京: 农业出版社, 1985.
- [32] SAHIN M, HABIB K. Design and development of an electronic drive and control system for micro-granular fertilizer metering unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 921–930.
- [33] 秦宽, 丁为方, 方志超, 等. 复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 1–8.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Analysis and experiment of tillage depth and width stability for plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 1–8. (in Chinese)
- [34] 杨松, 廖庆喜, 陈立, 等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机播种油菜的田间植株分布规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 23–28.
YANG Song, LIAO Qingxi, CHEN Li, et al. Distribution of rapeseed sowed by 2BFQ-6 precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 23–28. (in Chinese)