

水田机械式强制排肥装置设计与试验

位国建¹ 祁兵² 焦伟¹ 史嵩¹ 荐世春¹

(1. 山东省农业机械科学研究所, 济南 250100; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 目前水田机械施肥均匀性差,且作业时在施肥开沟器末端容易出现肥料粘结、架空、堵塞开沟器等现象。针对以上问题,本文设计了一种水田机械式强制排肥装置,并对其关键部件进行了结构设计及性能试验。将水田机械式强制排肥部件的工作过程分为3个阶段,通过运动学和动力学研究方法分析了各工作阶段肥料在螺旋强制排肥部件内的状态,以及影响排肥部件工作性能的关键因素,对螺旋强制排肥部件的直径、转速、螺距3个因素进行了设计计算。以排肥均匀性变异系数为响应指标,进行了螺旋强制排肥部件的单因素台架试验,通过对最小显著性差异进行统计分析,确定了各因素的取值范围;安排了二次正交旋转组合试验,并对试验结果进行了方差分析和响应面分析,确定了影响排肥性能指标因素的影响由大到小为转速、螺距、直径,建立了排肥性能指标与各因素之间的回归方程,运用 Design-Expert 软件对试验因素优化求解,确定了较优工作参数组合为螺旋输送机转速 120.09 r/min、直径 23.90 mm、螺距 21.54 mm,此时施肥装置台架试验的排肥均匀性变异系数为 7.18%。将所设计的强制排肥部件分别安装在水稻插秧机及水稻气力式施肥播种机上,进行了田间验证试验,试验结果表明,机械式强制螺旋排肥装置工作稳定、堵塞率低,水田防堵塞效果优于无该部件的施肥机械。

关键词: 水田; 螺旋输送机; 强制排肥; 部件设计; 性能试验

中图分类号: S224.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0154-11

Design and Experiment of Mechanical Forced Fertilizing Device for Paddy Field

WEI Guojian¹ QI Bing² JIAO Wei¹ SHI Song¹ JIAN Shichun¹

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China

2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: The technology of deep mechanical fertilization in paddy field has been developed rapidly as the research and development of special fertilizer for paddy field mechanical fertilization was mature. But the uniformity of mechanical fertilization in paddy field was poor at present, some phenomenon was still exist such as fertilizer bonding, overhead, ditcher blocked during the operating at the end of the furrow opener. In view of the current problems, a mechanical forced fertilizer discharging device adopted with the principle of screw auger forced transportation for paddy field was innovatively designed, and structural design and performance test of key components combined with the agronomic characteristics of paddy field mechanical fertilizer application were carried out. The working process of the forced fertilizer component was divided into three stages. The status of fertilizers in the spiral forced fertilizer discharging device and the key factors affecting the working performance of the device were analyzed by kinematics and dynamics, three factors of auger diameter, auger speed and auger pitch of forced fertilizer discharging parts were designed and calculated. The auger diameter, auger speed and auger pitch were taken as the test factors, and the variation coefficient of fertilizer uniformity was taken as the response index, and single factor bench test was carried out to determine the value range of each factor. The order of the primary and secondary factors affecting fertilizer discharge performance was determined as follows: screw auger speed, auger pitch and auger diameter by variance analysis, and response surface analysis were carried out on the test results which analyzed by quadratic orthogonal rotation combination test. By using

收稿日期: 2020-08-01 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700701)和公益性行业(农业)科研专项(201303103)

作者简介: 位国建(1986—),男,工程师,主要从事农业机械装备设计与理论研究,E-mail: woshitxwh@126.com

通信作者: 史嵩(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事农业机械装备设计与理论研究,E-mail: shisongfox@163.com

Design-Expert software, the optimal working parameter combination was determined as follows: auger speed was 120.09 r/min, auger diameter was 23.90 mm, and auger pitch was 21.54 mm, at this time, the variation coefficient of fertilizer uniformity in the bench test was 7.18%. A field verification test was carried out by installing the designed compulsory fertilizer discharging device on the paddy field machinery. The results showed that the mechanical compulsory screw fertilizer discharging device worked steadily and had a low plugging rate, the anti-blocking effect was better than that of the fertilizer machine without this part.

Key words: paddy field; screw conveyor; spiral forced fertilization; part design; performance test

0 引言

水稻是我国主要的粮食作物之一^[1]。在我国,由于长期缺乏专业水田施肥机械,水稻施肥多采用人工浅表抛撒方式,生长期分次施肥,施肥均匀性差,劳动力成本高,且肥料流失造成严重生态污染^[2-5]。机械化深施肥技术可有效降低劳动力成本,减少养分流失,提高资源利用率^[6]。随着水稻播种机械的改进完善,以及适用水田专用肥料研发成熟,水田机械深施肥技术得以较快发展^[7-8]。

近年来,我国科研人员对水田施肥装置进行了大量研究。陈雄飞等^[9]研制了水稻穴播深施肥机具,确定了深施肥深度,并进行了试验研究。左兴健等^[10]研制了风送式水稻精准施肥装置,对风送排肥理论和水田精准施肥控制方法进行了相关研究。陈长海等^[11-12]研制了水稻插秧机深施肥装置,根据多因子之间的交互试验,对各因子与相应指标影响规律进行了分析。王金峰等^[1,13]和 WANG 等^[14]使用 EDEM 软件对水田施肥装置关键部件进行设计和试验,得到各影响因素与不同响应指标之间的数学模型,并利用 Design-Expert 软件对各影响因素进行了优化,并试验验证。目前国内对水田施肥技术的研究依然处于探索阶段,现有水田施肥装置成熟度不高,部分关键问题未能有效解决^[15-16],如作业时在施肥开沟器末端容易出现肥料粘结、架空等现象,造成开沟器堵塞,影响施肥均匀性,而国外产品又存在结构复杂,损坏后维修困难,配件更换周期长等问题^[17]。国内学者对水田施肥装置和排肥部件的研究大部分集中在排肥器和输送系统方面^[18-22],且已形成较为成熟的研究方法和解决方案,但对于肥料排出施肥管至落入水田沟槽底部过程中的防堵塞问题研究较少。

本文针对水田施肥机械因肥料受潮粘结开沟器,导致施肥均匀性下降、肥料易堵塞的问题,采用螺旋输送机强制输送原理,设计一种机械式强制排肥装置,阐述强制排肥关键部件各工作阶段肥料颗粒所处状态,分析影响排肥关键部件作业性能的关键因素,通过单因素与二次正交旋转组合台架试

验,确定机械式强制排肥部件最佳结构参数与工作参数,并将其安装在水稻插秧机及水稻气力式施肥播种机上进行田间验证试验。

1 机械式强制排肥装置整体结构及原理

1.1 机械式强制排肥装置结构

机械式强制排肥装置安装在水稻插秧机及水稻气力式施肥播种机末端,结构如图 1 所示,主要由肥箱、气力电动排肥器、驱动电机、软轴、强制排肥部件组成。肥箱下面设有与其相通的电动排肥器,排肥器出口口与输肥管一端连接,输肥管另一端连接强制排肥部件。强制排肥部件经软轴连接驱动电机,驱动电机及肥箱均固定安装在施肥播种机机架上。强制排肥部件主要由三通管、螺旋输送器和开沟器组成。

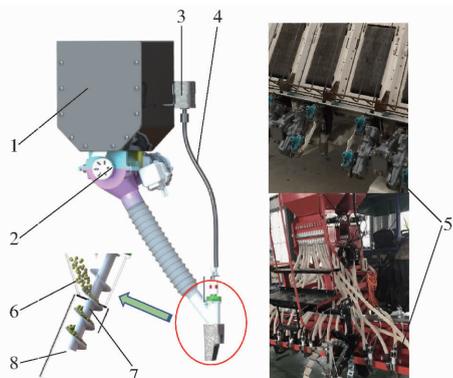


图 1 机械式强制排肥装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of mechanical forced fertilizer component

1. 肥箱 2. 电动排肥器 3. 驱动电机 4. 软轴 5. 强制排肥部件
6. 三通管 7. 螺旋输送机 8. 开沟器

1.2 工作原理

机械式强制排肥装置采用直流电机驱动、螺旋输送机强推输肥的工作原理。正常作业时,首先经控制器启动驱动电机,此时电机通过软轴带动螺旋输送机转动;继而,启动电动排肥器,槽轮转动将肥料从肥箱排出经施肥管落入机械式强制排肥部件中,排肥量变化由控制器调节电动排肥器电机转速实现。机械式强制排肥部件中螺旋输送机将肥料强推排入开沟器已经开好的沟槽内。

2 强制排肥部件工作过程分析与结构设计

2.1 工作过程分析

根据工作过程中肥料所处位置不同,可以将强制排肥部件的工作过程分为3个阶段^[19]:①充肥阶段。电动排肥器排出的肥料颗粒,在自身重力作用下进入强制排肥部件,被螺旋输送机带入部件内。②输送阶段。肥料进入三通和螺旋输送机组成的螺旋槽内,在螺旋面强制推动与三通内壁约束的作用下,向底部运移。③排肥阶段。肥料颗粒在螺旋输送机下表面螺旋推力作用下强制排出螺旋输送机,自由下落,排入沟槽底部。为了分析工作过程中影响强制排肥部件排肥均匀性的因素,对各阶段肥料的受力进行了分析。

2.1.1 充肥阶段

在充肥阶段,肥料颗粒依靠自重进入强制排肥部件,逐渐被送入螺旋输送机槽内,随着螺旋输送器的转动,肥料被强制带入下一个螺距。如图2所示,以三通管建立定参考系 $oxyz$,以转动的螺旋输送机轴建立动参考系 $O'XYZ$,三通和螺旋输送器的轴线分别为 z 轴和 Z 轴方向,且两者重合。

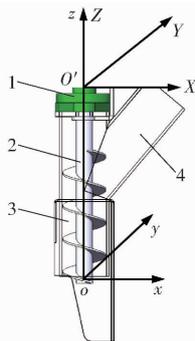


图2 强制排肥部件坐标系建立

Fig.2 Establishment of mechanical forced fertilizer component

1. 轴承 2. 螺旋输送机 3. 开沟器 4. 三通管

随机选取肥料颗粒 i 为研究对象,并忽略与其相邻的肥料颗粒间相互作用。假定某一时刻 t ,肥料颗粒 i 进入螺旋输送机外缘轮廓,沿螺旋面相对滑动,且肥料颗粒 i 的速度与螺旋输送机外缘的线速度相同。对肥料颗粒 i 在 t 时刻所处状态进行受力分析,肥料颗粒初始状态受力分析如图3所示。

在 t 时刻,肥料颗粒 i 的受力为重力 G_i 、滑动摩擦力 f_i 、螺旋面支撑力 N_i 、牵连惯性力 F_{e1} 和科氏力 F_{c1} ,肥料 i 的动力学方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_i = \mathbf{G}_i + \mathbf{f}_i + \mathbf{N}_i + \mathbf{F}_{e1} + \mathbf{F}_{c1} = \\ G_i + \mu_i N_i + N_i + m_i \omega_i^2 r_i + 2m_i \omega v_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中 m_i ——所选取颗粒 i 质量, kg

ω ——螺旋输送机角速度, rad/s

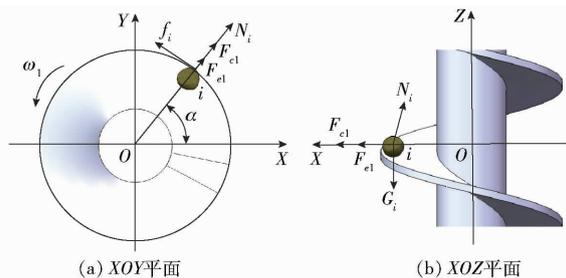


图3 肥料颗粒初始受力分析

Fig.3 Initial force analysis of fertilizer particles

v_i ——颗粒 i 与螺旋输送机外径相对速度, m/s

r_i ——颗粒 i 质心距 Z 轴距离, m

ω_i ——颗粒 i 与螺旋输送机外缘相对角速度, rad/s

μ_i ——颗粒 i 与螺旋输送机螺旋面摩擦因数

如果考虑相邻肥料颗粒和三通管内壁对所选颗粒 i 的作用,则颗粒 i 与螺旋输送机外缘相对角速度 ω_i 很小, F_{c1} 可忽略不计。因此,颗粒 i 此时相对运动轨迹的法线加速度 a_{rn} 和切线加速度 a_{rr} 计算式为

$$\begin{cases} a_{rn} = \frac{G_i \sin \alpha - 2m_i \omega v_i - N_i}{m_i} \\ a_{rr} = \frac{\mu_i N_i - G_i \cos \alpha}{m_i} \end{cases} \quad (2)$$

式中 α ——螺旋面的螺旋升角, ($^\circ$)

螺旋输送机正常充肥状态下,肥料颗粒 i 只能沿着螺旋面做相对滑动,即

$$a_{rn} = 0 \quad (3)$$

$$a_{rr} = dv_i/dt = d^2 s_i/dt^2 \quad (4)$$

求解可得

$$v_i = e^{-2\mu_i \omega} \left[\omega r_i + \frac{g(\mu_i \sin \alpha - \cos \alpha)(e^{2\mu_i \omega} - 1)}{2\mu_i \omega} \right] \quad (5)$$

此时,颗粒 i 的绝对速度 v_a 、螺旋输送机外缘切向速度 v_e 、颗粒 i 沿螺旋输送机外缘相对速度 v_i 满足

$$v_a = v_e + v_i \quad (6)$$

式中, $v_e > v_i$, v_a 与 v_e 同向。肥料颗粒 i 沿螺旋输送机外缘以相对速度 v_i 开始滑动,由于相邻颗粒和螺旋面的作用促使颗粒 i 进入下一螺距,进而完成充肥过程。由式(5)可知,肥料颗粒 i 的充肥过程与螺旋输送机角速度 ω (螺旋输送机转速 n)、螺旋外缘颗粒质心距 Z 轴距离 r_i (螺旋输送机直径 D)、螺旋面的螺旋升角 α (螺距 S) 相关。

2.1.2 输送阶段

当肥料颗粒完成充肥阶段进入到输送阶段,随着螺旋输送机转动,充肥阶段进入排肥部件的肥料

颗粒将被输送至下一个螺距内。随着螺旋输送机继续转动,经过 Δt 时间,肥料颗粒被输送至螺旋输送机底端,在重力及螺旋输送机叶片强制推力下离开排肥部件。

随机选取肥料颗粒 j 为研究对象,假定颗粒 j 在进入输送过程的第 1 个螺距段的最底端螺旋面处,此时颗粒 j 相对螺旋面静止。以充肥阶段所建的定坐标系 $oxyz$ 和动坐标系 $O'XYZ$ 为基础,对肥料颗粒 j 进入下一螺距段前的状况进行受力分析,如图 4 所示。

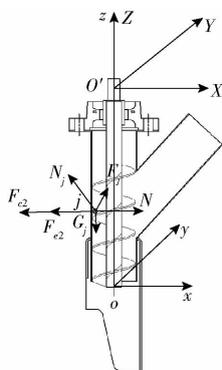


图 4 肥料颗粒受力分析

Fig. 4 Force analysis of fertilizer particle

此时,肥料 j 的动力学方程为

$$G_j + f_j + F_{c2} + F_{c2} + N + N_j = 0 \quad (7)$$

式中 G_j ——肥料颗粒 j 的重力

f_j ——静摩擦力

F_{c2} ——牵惯性力

F_{c2} ——科氏力

N ——三通管内壁对肥料颗粒 j 的支撑力

N_j ——螺旋面对肥料颗粒 j 的支撑力

由于肥料颗粒 j 未产生相对位移,因此科氏力 F_{c2} 为零;当肥料颗粒 j 开始滑动瞬间,肥料颗粒 j 沿螺旋面有相对运动趋势,肥料颗粒 j 离开三通管内壁,此时支撑力 N 为零,受力状况如图 5 所示。

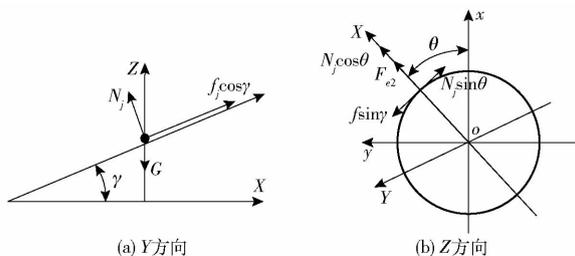


图 5 肥料颗粒滑动瞬间的受力分析

Fig. 5 Force analysis at moment of fertilizer particle sliding

由于肥料颗粒 j 开始滑动的瞬间,其运动趋势为沿螺旋面进行,则颗粒 j 受到静摩擦力作用,假设所受静摩擦力方向与其即将运动趋势方向相同,将静摩擦力在坐标平面 XOZ 上投影,静摩擦力 f_j 与其投影面 XOZ 的夹角为 γ 。由图 5 可知, γ 越大,颗粒

j 的相对运动轨迹会越接近于 Y 轴方向,越容易进入下一螺距,且沿 Z 轴方向的滑移量越小; γ 越小,越不容易进入下一螺距,螺距内肥料填充系数变小。将式(7)分别在 X 、 Y 、 Z 轴上投影,肥料颗粒 j 滑动瞬间的方程为

$$F_{c2} + N_j \cos \theta = 0 \quad (8)$$

$$N_j \sin \theta - f_j \sin \gamma = 0 \quad (9)$$

$$-G_j + f_j \cos \gamma \sin \alpha + N_j \cos \alpha = 0 \quad (10)$$

其中 $F_{c2} = m_j r_j \omega^2 \quad (11)$

$$f_j = \mu_j N_j \quad (12)$$

式中 θ —— X 轴与 x 轴的夹角, ($^\circ$)

m_j ——肥料颗粒 j 的质量

r_j ——肥料颗粒 j 质心与 Z 轴距离

μ_j ——颗粒 j 与螺旋输送机螺旋面摩擦因数

由式(8)~(10)联立可得

$$\tan \gamma = \frac{r_j \omega^2 \sin \theta \cos \alpha}{g \cos \theta - r_j \omega^2 \sin \alpha} \quad (13)$$

由式(13)可知,夹角 γ 与螺旋输送机角速度 ω (螺旋输送机转速 n)、螺旋外缘颗粒质心距 Z 轴距离 r_j (螺旋输送机直径 D)、颗粒肥开始滑动的初始角度 θ 、螺旋面的螺旋升角 α (螺距 S) 相关。

2.1.3 排肥阶段

机械式螺旋强制排肥部件随作业机具同步前进,此时肥料颗粒的水平初速度与机具的前进速度相等。肥料颗粒由螺旋输送机底端沿下曲面被强制排出后,由牛顿第二定律可知,肥料颗粒的运动轨迹为抛物线。忽略空气阻力的影响,建立排肥过程的运动微分方程为

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg \end{cases} \quad (14)$$

式中 m ——肥料颗粒质量, kg

x ——肥料颗粒水平方向位移, m

y ——肥料颗粒垂直方向位移, m

当 $t = 0, x = 0$ 时, $\frac{dx}{dt} = v_x$; 当 $t = 0, y = 0$ 时, $\frac{dy}{dt} = 0, v_x$ 为肥料颗粒的水平初速度, m/s。

此时,肥料颗粒运动方程为

$$\begin{cases} y = \frac{1}{2} g t^2 \\ x = v_x t \end{cases} \quad (15)$$

求解得

$$y = \frac{g}{2v_x^2} x^2 \quad (16)$$

由式(16)可知,排肥过程肥料颗粒的运动轨迹为抛物线,其水平初速度与作业机具前进速度有关,

作业机具行驶速度越大,颗粒水平位移越大;反之,颗粒水平位移越小。因此,作业机具的行驶速度将影响肥料颗粒的落点,进而影响机械式强制螺旋排肥部件的排肥性能。实际作业时,由于作业机具匀速行进,只有在起始和终止排肥阶段速度有变化,而中间匀速作业过程排肥性能指标几乎不变。

综上所述,螺旋输送机直径、转速、螺距是影响排肥均匀性关键参数,本文将依据强制排肥装置的作业实际需求,进行理论计算,确定上述3个关键参数的合理取值范围。

2.2 结构设计

2.2.1 螺旋输送机直径

螺旋输送机直径是强制排肥部件的重要参数之一,直接影响强制施肥部件的排肥均匀性变异系数,同时也会决定三通管直径,进而影响开沟器的外型尺寸以及安装位置和结构。依据肥料特性、排肥结构及使用方式来设计螺旋输送机直径。选取12行水稻气力式施肥播种机配套该强制排肥装置,根据农艺要求设定目标排肥量为250~500 kg/hm²,匹配该机具作业生产率为0.3~0.6 hm²/h,则可计算每行施肥部件输送能力 Q 为0.0125~0.045 t/h。螺旋输送机直径计算式为

$$D = K \sqrt[2.5]{\frac{Q}{\varphi \rho c}} \quad (17)$$

式中 K ——物料(该处指颗粒肥)特性系数,取0.0632

φ ——物料填充系数,取0.90

c ——螺旋输送机倾角系数

ρ ——物料密度,取1.032 t/m³

代入数据可得 $D = 0.0154 \sim 0.0257$ m。

计算后取螺旋输送机直径标准整数系列,螺旋输送机直径 D 的取值范围调整为16~26 mm。

2.2.2 螺距

螺旋输送机螺距不仅决定施肥装置施肥量,还对排肥均匀性变异系数有重要影响。螺距的变化会导致肥料运移速度的变化,输送量 Q 和直径 D 一定时,螺距是影响施肥部件施肥性能的关键因素。

通常螺旋输送机螺距计算式为

$$S = K_1 D \quad (18)$$

式中 K_1 ——系数,通常为0.8~1.0,与物料流动性有关

由于本设计的螺旋输送机为垂直水平面的布置形式,且水田作业时物料流动性差,根据已有设计经验,综合分析取 $K_1 = 1$ 。因此,螺距取值范围为16~26 mm。

2.2.3 螺旋输送机转速

在施肥量满足农艺要求的前提下,尽量提高排肥均匀性,设计合理的螺旋输送机转速以保证施肥部件的施肥稳定性。为达到合理输送肥料的目的,应依据施肥量、螺旋输送机直径和肥料相关参数来设计螺旋输送机转速。由于螺旋输送机转速过高时,离心力的作用会导致肥料跳跃,因此肥料自身的重力与向心力之间应该满足相应条件。

通常螺旋输送机转速计算式为

$$m \omega^2 R \leq mg \quad (19)$$

$$\text{即} \quad m \left(\frac{2\pi n_{\max}}{60} \right)^2 R \leq mg \quad (20)$$

化简得

$$\frac{\pi n_{\max}}{30} R \leq \sqrt{gR} \quad (21)$$

考虑到不同的物料影响则有

$$\frac{\pi n_{\max}}{30} R \leq K_0 \sqrt{gR} \quad (0 < K_0 < 1) \quad (22)$$

$$n_{\max} = \frac{30K_0}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{30K_0 \sqrt{2g}}{\pi \sqrt{D}} \quad (23)$$

令

$$A = \frac{30K_0 \sqrt{2g}}{\pi}$$

则简化为

$$n_{\max} = A / \sqrt{D} \quad (24)$$

式中 A ——物料综合系数

K_0 ——物料综合特性系数

n_{\max} ——螺旋输送机最大转速, r/min

n ——螺旋输送机实际转速, r/min

将式(17)计算结果代入式(24)得: $n \leq n_{\max} = 221$ r/min。

由输送量

$$Q = \frac{\pi [(D + 2\lambda)^2 - d^2]}{4} 60 \varphi S n \rho c \quad (25)$$

可得转速为

$$n = \frac{Q}{15 \pi \varphi \rho S c [(D + 2\lambda)^2 - d^2]} \quad (26)$$

每行施肥部件输送能力为0.0125~0.045 t/h,计算后取螺旋输送机转速标准整数系列,螺旋输送机转速 n 的取值范围调整为60~200 r/min。

2.3 肥料通过性分析

由螺旋强制排肥装置工作过程可知,在充肥阶段,随着螺旋输送器的转动,肥料颗粒流没有形成肥料颗粒堆积,故肥料在自身重力作用下进入螺旋输送机,被带入部件内,未对肥料产生挤压;在输送阶段,肥料在螺旋输送机螺旋面强制推动与三通管内

壁约束的作用下,向底部运移,螺旋输送机螺旋面下表面没有形成较大的有效剪切作用力区,有效摩擦面积相对较小;在排肥阶段,肥料颗粒在螺旋输送机下表面螺旋推力作用下强制排出螺旋输送机,肥料受到的作用力主要来自螺旋输送机下表面。通过追踪肥料颗粒的运动轨迹,分析肥料颗粒流场的发展过程可知,肥料受剪切作用较小,且螺旋输送机与三通管设计间隙较小,除特殊细小肥料颗粒通过螺旋输送机时会产生挤压破碎,肥料颗粒流均可正常被施入土壤中。

3 试验

3.1 试验条件与方法

为确定机械式强制排肥部件最佳结构参数与工作参数,在 PS-12 型排种、排肥性能检测试验台上进行了排肥部件的室内台架试验。试验装置主要由肥箱、安装架、电动排肥器、强制排肥部件、控制器等组成,试验装置如图 6 所示。强制排肥部件由伺服电机直接驱动,电机采用反馈闭环控制,转速控制误差 $\pm 3\%$ 。

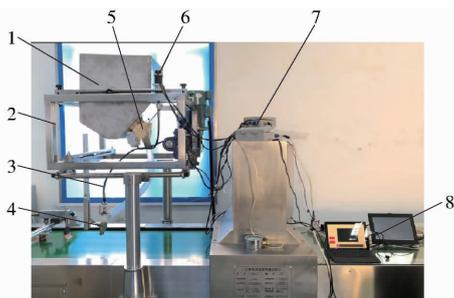


图 6 施肥装置台架试验

Fig. 6 Bench test of fertilizing device

1. 肥箱 2. 安装架 3. 软轴 4. 强制排肥部件 5. 电动排肥器
6. 驱动电机 7. 驱动器 8. 控制器

利用排肥均匀性变异系数衡量排肥均匀性,排肥均匀性测定为动态试验^[23-26]。肥料选用山东金正有限公司生产的颗粒状复合肥,粒径平均为 3.5 mm,密度 1.07 g/cm³,含水率 10.7%,自然休止角 33.6°。肥料供给通过电动螺旋排肥器控制,肥料供给速率为 (9.0 ± 3.3) g/s (按照机具前进速度 0.8 m/s、行距 30 mm、施肥量 375 kg/hm² 计算)。排肥均匀性测定试验时,肥箱及强制排肥部件固定于安装架上,排肥试验台传送带上设置总长度为 3 m 的肥料收集带,用于肥料颗粒收集,收集带内间隔长度为 0.1 m,通过调节试验台电动机变频器频率控制传送带前进速度。

试验结束后,对排出的肥料颗粒进行分段统计,肥料颗粒平均质量计算式为

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^m X_i}{p} \quad (27)$$

式中 X_i ——间隔内收集肥料的质量, g

p ——测定次数

取样区域内所有肥料颗粒质量标准差 σ 计算式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2}{p - 1}} \quad (28)$$

强制排肥部件排肥均匀性变异系数计算式为

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \quad (29)$$

变异系数 V 越小,说明排肥部件排肥均匀性越高,排肥性能就越好。

3.2 单因素试验

3.2.1 螺旋输送机转速

由理论分析可知,螺旋输送机转速会影响螺旋强制排肥装置排肥均匀性变异系数。根据理论计算结果,在排肥试验中,取螺旋输送机转速 n 为 60 ~ 220 r/min,进行螺旋输送机转速对施肥性能影响单因素试验,其中螺旋输送机直径均为 21 mm、螺距均为 21 mm,每组试验重复 3 次,对其均值、置信区间内上下限、最小显著性差异(LSD)进行统计,均值差的显著水平为 0.05,结果如图 7 所示。

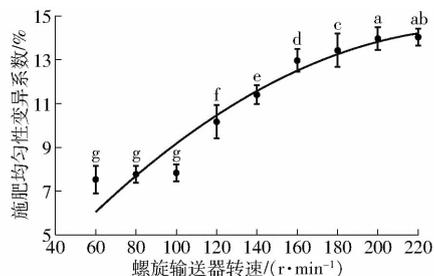


图 7 螺旋输送机转速对排肥性能影响

Fig. 7 Effect of auger rotation speed on fertilizing performance

从图 7 可看出,当螺旋输送机转速小于 100 r/min 时,排肥均匀性变异系数均值差不显著;大于 120 r/min 时,随着螺旋输送机转速增大,排肥均匀性变异系数不断增大,当螺旋输送机转速为 200 r/min 时,排肥均匀性变异系数最大,最大为 13.9%。

3.2.2 螺旋输送机直径

螺旋输送机直径对螺旋强制排肥装置排肥均匀性变异系数存在一定的影响,在排肥试验中,设定螺旋输送机转速 $n = 130$ r/min;螺距 $S = 21$ mm,螺旋输送机直径 D 取 14 ~ 28 mm,进行螺旋输送机直径对施肥性能影响单因素试验,每组试验重复 3 次。对最小显著性差异(LSD)进行统计分析,螺旋输送

器直径对排肥均匀性变异系数影响曲线如图8所示。

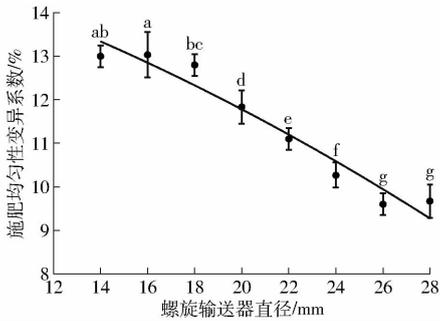


图8 螺旋输送机直径对排肥性能影响

Fig. 8 Effect of auger diameter on fertilizing performance

从图8可看出,随着螺旋输送机直径增大,排肥均匀性变异系数逐渐减小,螺旋输送机直径为26 mm时,排肥均匀性变异系数最小,说明螺旋输送机直径在26 mm附近时,螺旋强制排肥装置排肥均匀性最好。由于受安装空间限制,螺旋输送机直径应小于28 mm。

3.2.3 螺旋输送机螺距

在排肥试验中,设定螺旋输送机转速 $n = 130$ r/min;螺旋输送机直径 $D = 21$ mm,螺旋输送机螺距 S 取14~28 mm,进行排肥均匀性效果试验,每组试验重复3次。螺旋输送机螺距对排肥均匀性变异系数影响曲线如图9所示。

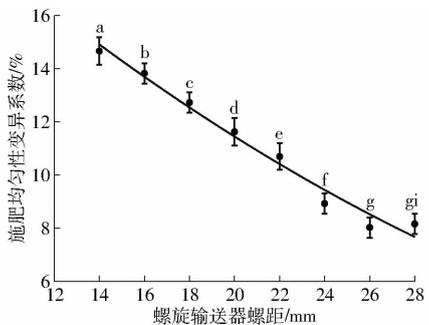


图9 螺旋输送机螺距对排肥性能影响

Fig. 9 Effect of auger pitch on fertilizing performance

从图9中可以看出,随着螺旋输送机螺距增大,排肥均匀性变异系数逐渐减小,在螺旋输送机螺距为26 mm时,排肥均匀性变异系数最小。

3.3 二次回归正交试验

通过分析螺旋输送机转速、直径和螺距对装置排肥均匀性影响,在单因素试验的基础上,选取螺旋输送机转速取值区间为100~200 r/min,螺旋输送机直径取值区间为16~26 mm,螺旋输送机螺距取值区间为16~26 mm,采用三因素三水平二次回归正交组合设计安排试验。研究螺旋输送机转速 x_1 、直径 x_2 、螺距 x_3 3个因素对施肥装置的排肥性能的影响,以排肥均匀性变异系数 $V(\%)$ 作为评价指标。

试验因素水平编码如表1。

表1 因素编码

Tab. 1 Coding of factors and levels

编码	因素		
	直径 x_1 /mm	转速 x_2 /(r·min ⁻¹)	螺距 x_3 /mm
1.682	26	200	26
1	24	180	24
0	21	150	21
-1	18	120	18
-1.682	16	100	16

依据因素、水平数选择三元二次正交旋转组合设计的结构矩阵来进行试验方案设计,按照二次回归正交旋转组合方案共设计23组试验,试验方案与结果见表2。

表2 二次正交组合试验结果

Tab. 2 Quadratic regression rotary experiment results

序号	因素			变异系数 V/%
	直径	转速	螺距	
1	-1	-1	-1	12.6
2	1	-1	-1	8.4
3	-1	1	-1	15.2
4	1	1	-1	14.5
5	-1	-1	1	9.1
6	1	-1	1	6.7
7	-1	1	1	9.3
8	1	1	1	10.3
9	-1.682	0	0	12.7
10	1.682	0	0	8.1
11	0	-1.682	0	7.4
12	0	1.682	0	13.3
13	0	0	-1.682	15.1
14	0	0	1.682	7.3
15	0	0	0	10.1
16	0	0	0	10.4
17	0	0	0	10.1
18	0	0	0	9.8
19	0	0	0	9.2
20	0	0	0	9.1
21	0	0	0	9.6
22	0	0	0	8.9
23	0	0	0	10.2

3.4 各因子对排肥均匀性影响的方差分析

依据表2的二次正交旋转组合试验结果,利用Design-Expert软件进行二次回归分析,得到排肥均匀性变异系数 y 的二次回归方程为

$$y = 98.24 - 3.99x_1 - 0.08x_2 - 3.20x_3 + 9.58 \times 10^{-3}x_1x_2 + 0.05x_1x_3 - 6.81 \times 10^{-3}x_2x_3 + 0.03x_1^2 + 2.64 \times 10^{-4}x_2^2 + 0.06x_3^2 \quad (30)$$

对该回归方程及其各系数进行显著性检验^[27]。各因子对排肥均匀性变异系数的方差分析如表3

所示。

表 3 排肥均匀性变异系数方差分析

Tab.3 Variance analysis of fertilization uniformity variation coefficient

来源	平方和	自由度	均方	F	P
x_1	14.43	1	14.43	45.47	<0.000 1 **
x_2	36.81	1	36.81	116.05	<0.000 1 **
x_3	59.13	1	59.13	186.40	<0.000 1 **
x_1x_2	5.95	1	5.95	18.76	0.000 8 **
x_1x_3	1.53	1	1.53	4.83	0.046 8 *
x_2x_3	3.00	1	3.00	9.46	0.008 8 **
x_1^2	1.03	1	1.03	3.26	0.094 2
x_2^2	0.90	1	0.90	2.82	0.116 8
x_3^2	4.60	1	4.60	14.49	0.002 2 **
模型	127.31	9	14.15	44.59	<0.000 1 **
残差	4.12	13	0.32		
失拟项	1.80	5	0.36	1.23	0.376 3
纯误差	2.33	8	0.29		
总和	131.44	22			

注: **表示差异极显著 ($P < 0.01$); *表示差异显著 ($P < 0.05$)。

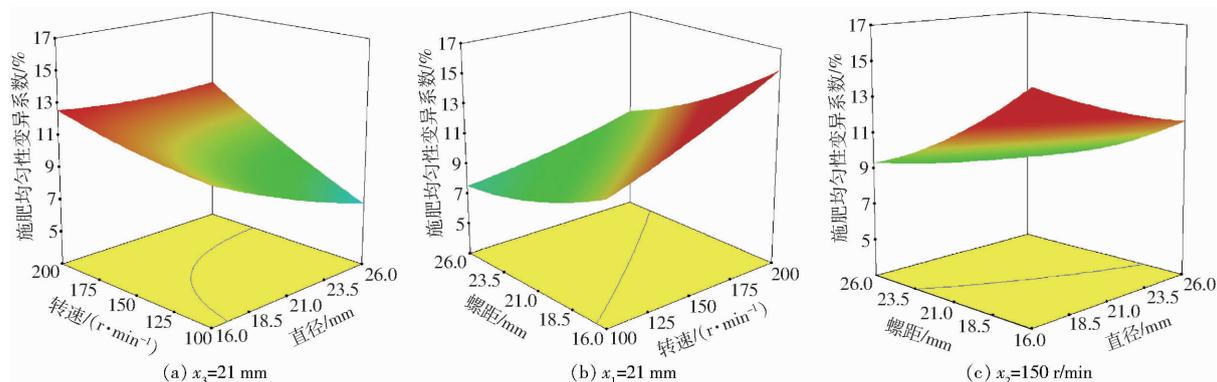


图 10 各因素对排肥均匀性变异系数影响的响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of all factors to variation coefficient of fertilization uniformity

螺距、直径。

3.6 试验结果的目标优化与验证

根据水稻种植农艺要求,排肥均匀性变异系数需符合 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》要求,水田施肥装置排肥均匀性变异系数越小越好。因此,需对该施肥装置的关键部件相关参数进行进一步的优化求解,并得到优化条件下相应的排肥均匀性变异系数。为寻求相关因素之间最优组合,以变异系数回归模型为目标函数,已求解的参数范围为约束条件,利用 Design-Expert 软件求解目标函数最小值,优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min y(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 16 \text{ mm} \leq x_1 \leq 26 \text{ mm} \\ 100 \text{ r/min} \leq x_2 \leq 200 \text{ r/min} \\ 16 \text{ mm} \leq x_3 \leq 26 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

求得优化解为螺旋输送机转速 120.09 r/min、

3.5 因素间交互作用的响应曲面分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件得到各因素对排肥均匀性变异系数响应曲面如图 10 所示。

由图 10a 可知,当螺旋输送机螺距为零水平时,排肥均匀性变异系数随着螺旋输送机转速的增大而增大,随着直径的增大而减小。从响应曲面可知,螺旋输送机转速对排肥均匀性变异系数的影响更为显著。由图 10b 可知,当螺旋输送机直径为零水平时,排肥均匀性变异系数随着螺旋输送机转速的增大而增大,随着螺旋输送机螺距的增大而减小。从响应曲面可知,螺旋输送机转速对排肥均匀性变异系数的影响更为显著。由图 10c 可知,当螺旋输送机转速为零水平时,排肥均匀性变异系数随着螺旋输送机螺距的增大而减小,随着螺旋输送机直径的增大变化不大。从响应曲面可知,螺旋输送机螺距对排肥均匀性变异系数的影响更为显著。

因此,各因素对强制排肥部件排肥均匀性变异系数的影响由大到小次序依次为螺旋输送机转速、

螺旋输送机直径 23.90 mm、螺距 21.54 mm,此时施肥装置的排肥均匀性变异系数为 6.55%。

根据优化确定工作参数组合,于 2018 年 5 月在 PS-12 型排种/排肥性能检测试验台上进行验证试验。构造最优参数组合下的螺旋强制排肥部件,排肥均匀性变异系数平均值为 7.18%,验证结果与优化结果较为一致,所设计的机械式强制螺旋排肥部件施肥性能基本满足农艺要求。

3.7 对比试验

为检验强制施肥部件的田间作业性能,针对不同肥料,于 2018 年 6 月和 2020 年 7 月分别在平湖市、临沂市河东区及南京市溧水区与不带强制排肥部件的水稻施肥机械进行田间试验对比。试验样机选择 2ZGQ-6 型插秧机和 2BDQ-12 型水稻气力式施肥播种机,样机半幅安装强制螺旋排肥部件,另外行数作为对比,没有安装强制施肥部件,设定施肥量参照当地常规施肥量,试验方案如表 4 所示。

表4 田间对比试验方案

Tab.4 Program of field comparison experiment

试验地点	试验面积/ hm ²	设定施肥量/ (kg·hm ⁻²)	前进速度/ (m·s ⁻¹)
平湖市	0.5	390	0.8
临沂市	0.5	450	0.8
南京市	0.5	375	0.8

为避免肥料类型影响试验结果,试验采用3种不同类型颗粒状复合肥,肥料物理特性参数如表5所示。试验前,用筛子将结块颗粒筛出,装入肥箱内按设定施肥量进行田间试验。

表5 试验颗粒肥料物理特性参数

Tab.5 Physical properties of tested granular fertilizer

品牌	平均粒径/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	自然休止 角/(°)
杭州利时	3.9	0.97	2.0	30.6
金正大	3.3	1.35	5.4	33.4
新洋丰	3.7	1.19	3.3	28.7

观察机具在作业过程中能否正常连续作业,分别记录试验面积内堵塞次数以及连续作业未堵塞时间,水稻气力式施肥播种机田间对比试验见图11,试验强制排肥部件采用3D打印,安装在水稻插秧机及水稻气力式施肥播种机末端。田间防堵性能测定结果如表6所示。



图11 带强制排肥部件的水稻施肥机田间试验
Fig.11 Field experiment of rice transplanter with forced fertilizer discharging device

1. 水稻直播施肥机 2. 水稻插秧施肥机 3. 强制排肥部件 4. 水稻 5. 肥料

传统气送式水稻施肥装置对肥料形状、均匀性及含水率要求较高,肥料吸湿会附着在槽轮和施肥管中,造成粘结堵塞。肥料排入土壤中时,在排肥阶段肥料大量接触水面,施肥深度均匀性变差。为进一步验证强制机械式强制排肥部件的先进性,将施肥装置的各行排肥一致性变异系数和排肥稳定性变异系数以及施肥深度均匀性等作为检验施肥装置性

表6 防堵性能测定结果

Tab.6 Measurement results of blocking performance

试验地点	考核指标	肥料类型		
		杭州利时	金正大	新洋丰
平湖市	带排肥 堵塞次数	0	1	0
	部件 连续作业时间/min	58	16	60
	不带排 堵塞次数	1	2	1
	肥部件 连续作业时间/min	39	8	31
临沂市	带排肥 堵塞次数	0	0	0
	部件 连续作业时间/min	56	58	61
	不带排 堵塞次数	0	1	1
	肥部件 连续作业时间/min	56	33	41
南京市	带排肥 堵塞次数	0	0	0
	部件 连续作业时间/min	60	59	63
	不带排 堵塞次数	1	1	0
	肥部件 连续作业时间/min	27	49	63

能的指标,按照国家标准与气送式水稻插秧施肥装置进行田间对比试验,试验结果如表7所示。

表7 田间试验性能参数测量结果

Tab.7 Measured results of experiment performance parameters in field

技术性能指标	气吹施肥	强制排肥
施肥深度均匀性变异系数/%	12.8	9.1
排量稳定性变异系数/%	7.8	6.9
各行排肥一致性变异系数/%	13	8.6
肥料适用性	肥料形状、均匀性及含水率要求较高	常规肥料

相同试验条件下,水稻气力式施肥播种机安装有强制螺旋排肥部件,试验过程中作业顺畅,未发生中、重度堵塞。仅在平湖市试验地使用金正大肥料时发生一次轻微堵塞现象;对照未安装强制螺旋排肥部件,在试验过程中一共出现8次堵塞,其中有3次是严重堵塞。带有强制螺旋排肥部件的水稻气力式施肥播种机发生堵塞一次,原因是由于平湖市试验地前期田间处理不当导致土壤粘度较大,且所使用金正大肥料颗粒大小不匀,差异较大,导致排肥部件运转不流畅。试验结果表明,针对不同处理类型,带有机械式强制排肥部件的施肥机械适应性强,不容易产生堵塞,作业性能明显优于不带强制排肥部件的施肥机械,相比传统气力输送式施肥机械,有着更高的肥量利用率。

4 结论

(1)设计了水田机械式强制排肥部件,通过理论分析,确定了强制排肥部件各工作阶段作业性能关键影响因素,通过数学计算,确定了螺旋输送器直径、转速、螺距3个因素的取值范围,并对肥料通过性进行了分析。

(2)以排肥均匀性变异系数为响应指标在 PS-12 型排种/排肥性能检测试验台上进行单因素试验和二次正交旋转组合排肥试验,分析各因素对排肥性能指标影响因素的主次关系。各因素对强制排肥部件排肥均匀性变异系数的影响由大到小依次依次为螺旋输送机转速、螺距、直径。

(3)利用回归方程建立优化模型,确定了较优工作参数组合为螺旋输送机转速 120.09 r/min、直径 23.90 mm、螺距 21.54 mm,此时施肥装置的排肥均匀性变异系数为 7.18%。田间对比试验表明,机械式强制螺旋排肥装置工作稳定、堵塞率低,水田防堵塞效果明显,性能参数优于传统施肥装置。

参 考 文 献

- [1] 王金峰,高观保,翁武雄,等.水田侧深施肥装置关键部件设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(6):92-104.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of key components of side deep fertilization device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):92-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180611&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.011. (in Chinese)
- [2] 王吉亮,王序俭,曹肆林,等.中耕施肥机械技术研究现状及发展趋势[J].安徽农业科学,2013,41(4):1814-1816,1825.
WANG Jiliang, WANG Xujian, CAO Silin, et al. The status and development trend of cultivator and fertilizer mechanization technique[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(4):1814-1816,1825. (in Chinese)
- [3] 潘圣刚,莫钊文,罗锡文,等.机械同步深施肥对水稻群体质量及产量的影响[J].华中农业大学学报,2013,32(2):1-5.
PAN Shenggang, MO Zhaowen, LUO Xiwen, et al. Effects of deeply mechanized fertilizer application on the quality and grain yield of direct seedling rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(2):1-5. (in Chinese)
- [4] SHOJI S, DELGADO J, MOSIER A, et al. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32(7-8):1051-1070.
- [5] BAUTISTA U, KOIKE M, SUMINISTRADO D C. PM-power and machinery: mechanical deep placement of nitrogen in wetland rice[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(4):333-346.
- [6] ZHU Conghua, XIANG Jing, ZHANG Yuping, et al. Mechanized transplanting with side deep fertilization increases yield and nitrogen use efficiency of rice in Eastern China[J/OL]. Scientific Reports, 2019, 9, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42039-7>.
- [7] SU Ning, XU Taosheng, SONG Liangtu, et al. Variable rate fertilization system with adjustable active feed-roll length[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(4):19-26.
- [8] 位国建,荐世春,李娜,等.水田侧深施肥装置的分析与试验[J].农机化研究,2019,41(4):154-159.
WEI Guojian, JIAN Shichun, LI Na, et al. Analysis and experiment of paddy field side deep fertilizing device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4):154-159. (in Chinese)
- [9] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等.水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究[J].农业工程学报,2014,30(16):1-7.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Experiment of synchronous side deep fertilizing technique with rice hill-drop drilling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16):1-7. (in Chinese)
- [10] 左兴健,武广伟,付卫强,等.风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(3):14-21.
ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3):14-21. (in Chinese)
- [11] 陈长海,许春林,毕春辉,等.水稻插秧机侧深施肥技术及装置的研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2012,24(6):10-12.
CHEN Changhai, XU Chunlin, BI Chunhui, et al. Researching of rice transplanter deep side fertilizing technology and device [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012, 24(6):10-12. (in Chinese)
- [12] 陈长海.水稻插秧机螺旋搅龙式侧深施肥装置的设计与试验研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2016.
- [13] 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.spx?flag=1&file_no=20180308&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.008. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 位国建,荐世春,崔荣江,等.水稻机插秧同步侧深施肥技术分析及试验[J].农机化研究,2017,39(9):190-194.
WEI Guojian, JIAN Shichun, CUI Rongjiang, et al. Analysis and experiment of mechanical transplanting rice sync with the side deep fertilizing technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9):190-194. (in Chinese)
- [16] 位国建,荐世春,付乾坤,等.水稻插秧施肥联合作业机的设计[J].农机化研究,2015,37(11):104-107,112.

- WEI Guojian, JIAN Shichun, FU Qiankun, et al. Analysis and experiment of paddy field side deep fertilizing device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(11):104-107,112. (in Chinese)
- [17] 鲍秉启,安龙哲,胡文英. 我国和日本等国水田机械发展概况[J]. 农机化研究,2002,24(3):23-25.
BAO Bingqi, AN Longzhe, HU Wenying. The paddy field mechanization state in Japan China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2002, 24(3):23-25. (in Chinese)
- [18] 齐兴源,周志艳,杨程,等. 稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6):20-26.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6):20-26. (in Chinese)
- [19] 董晓威. 垂直螺旋式水稻侧深施肥机理与装置参数研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2019.
DONG Xiaowei. Mechanism and parameters of vertical spiral rice deep-side fertilizing device [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [20] 顿国强,陈海涛,冯夷宁,等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7):36-42.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, FENG Yining, et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7):36-42. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 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)
- [23] 周韦. 基于散粒体动力学的稻田侧深施肥装置的分析方法和试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015.
ZHOU Wei. The experiment and analysis of paddy field deep fertilizing device based on discrete element method [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [24] 王金峰,高观保,闫东伟,等. 水田电动双行深施肥除草机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):46-57.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, YAN Dongwei, et al. Design and experiment of electric control double row deep fertilizing weeder in paddy field [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):46-57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180706&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.006. (in Chinese)
- [25] 中国农业机械化科学研究院. 农机机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [26] 田立权,王金武,唐汉,等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5):46-52.
TIAN Liqun, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Design and performance experiment of helix grooved rice seeding device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):46-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160507&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.007. (in Chinese)
- [27] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2017.