

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.007

圆盘顶出式水田侧深施肥装置设计与试验

王金峰 尚文虎 翁武雄 王金武 王奇 陈鑫胜

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为保证水田侧深施肥的作业效率、提高侧深施肥装置的施肥均匀性,结合寒地水稻侧深施肥的农艺要求,设计了圆盘顶出式侧深施肥装置。阐述了该装置的工作原理,并对关键部件圆盘顶出式排肥器和风送系统进行分析,建立了施肥装置排肥过程的运动学模型,得出排肥圆盘转速是施肥性能的重要影响因素,通过 EDEM 虚拟仿真试验确定排肥圆盘最佳工作转速为 10 ~ 60 r/min;进行了侧深施肥装置施肥性能试验,结果表明:各行排量一致性、施肥稳定性均满足国家施肥机械作业标准要求;以肥槽有效工作长度为因素,以施肥量均值、施肥均匀性变异系数和总施肥量为指标进行施肥均匀性试验,结果表明:当肥料密度为 1.15 g/cm³、肥槽有效工作长度在 5 ~ 20 mm 之间调节时,总施肥量变化范围为 137 ~ 921 kg/hm²,施肥均匀性变异系数为 5.96% ~ 12.77%,满足国家施肥机械作业标准要求;与直槽轮式和斜槽轮式侧深施肥装置对比表明,圆盘顶出式侧深施肥装置有效提高了施肥均匀性,在满足施肥量要求的前提下,长时间作业未出现肥料挤压破碎现象;另选择 4 种不同密度的水田侧深施肥专用肥,验证施肥装置肥量调节性能,结果表明,所设计的侧深施肥装置对常用专用肥料具有良好适应性,获得了肥料密度在 0.85 ~ 1.40 g/cm³ 之间的肥槽有效工作长度与总施肥量的变化曲线,可应用于田间作业,为机具调试应用及实际施肥作业提供指导和参考。

关键词: 圆盘顶出式;水田;侧深施肥;风送系统;试验

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)06-0062-11

OSID:



Design and Experiment of Disc Ejection Type Paddy Field Side Deep Fertilization Device

WANG Jinfeng SHANG Wenhui WENG Wuxiong WANG Jinwu WANG Qi CHEN Xinsheng
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to ensure the operation efficiency of lateral deep fertilization in paddy field and improve the fertilization uniformity of lateral deep fertilization device, combined with the agronomic requirements of lateral deep fertilization of rice in cold region, a disc ejection type lateral deep fertilization device was designed, its working principle was expounded, and the key components, disc ejection type fertilizer discharger and air delivery system, were analyzed. Kinematics model of fertilizer discharging process was established, and the rotating speed of fertilizer discharge disc was an important factor affecting fertilization performance. The best work of fertilizer discharging disc was 10 ~ 60 r/min by EDEM virtual simulation test. The fertilization performance experiment of lateral deep fertilization device was carried out. The results showed that the consistency of discharge amount and stability of fertilization met the national operation standard of fertilization machinery. Taking the effective working length of fertilizer tank as a factor, the average value of fertilization amount, coefficient of variation of fertilization uniformity and total fertilization amount as indicators, the single factor experiment was carried out. The results showed that when the density of fertilizer was 1.15 g/cm³ and the effective working length of fertilizer tank was adjusted between 5 mm and 20 mm, the total fertilization amount was varied from 137 kg/hm² to 921 kg/hm², and the coefficient of variation of fertilization uniformity of lateral deep

收稿日期: 2021-01-03 修回日期: 2021-03-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0300105-4、2016YFD0300909-04)、黑龙江省博士后落户黑龙江项目(LBH-Q17012)和国家自然科学基金项目(52005094)

作者简介: 王金峰(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械研究,E-mail: jinfeng_w@126.com

通信作者: 王奇(1990—),男,讲师,博士,主要从事保护性耕作技术及其智能农业装备研究,E-mail: wangqi_4034@163.com

fertilization device was ranged from 5.96% to 12.77%. Compared with the straight-grooved wheel type and the inclined-grooved wheel type side-deep fertilization device, it was concluded that the disc ejection type side-deep fertilization device effectively improved the uniformity of fertilization, and there was no fertilizer crushing phenomenon in long-term operation under the premise of meeting the requirements of fertilization amount. Four special fertilizers with different densities were selected to verify the fertilizer adjustment performance of the fertilizer application device. The experimental results showed that the designed device had good adaptability to commonly used special fertilizers, and the obtained curves of effective working length of fertilizer tank and total fertilizer application with density of 0.85 ~ 1.40 g/cm³ can be directly applied to field operations, which had important reference value for debugging and application of machines and tools and actual production operations.

Key words: disc ejection type; paddy field; deep fertilization on side; wind conveying system; experiment

0 引言

施肥是水稻生产过程的重要环节,是实现水稻节本增效的重要手段^[1-3],合理施肥可有效提高肥料利用率。传统的施肥方式是在水稻生长的各个时期使用简易机械或人工直接将肥料撒施于水面,这种施肥方式不但费工、费时,还造成肥料流失严重,且肥料分布不均匀,导致环境污染、化肥利用率低,直接影响水稻产量^[4-5]。侧深施肥是在水稻插秧阶段使用施肥机械一次性将肥料定量、均匀施于水稻秧苗侧方3~5 cm、深度约5 cm处位置,其施肥量相对传统施肥量减少约20%,这种施肥方式对提高肥料利用率、降低环境污染、提高水稻产量有明显效果,目前已成为主要施肥方式^[6-8]。

侧深施肥装置是水田侧深施肥技术的主要应用载体,主要包括机械排肥结构和正压风送输肥结构^[9]。排肥器是侧深施肥装置的核心部件,目前,国内外研究与设计的水田侧深施肥排肥器形式主要包括外槽轮式、圆盘式、螺旋式等^[10-13]。外槽轮式排肥器应用最为广泛,如日本久保田公司和井关公司生产的标准化侧深施肥装置均采用直槽轮式排肥器,其结构简单、造价低廉、施肥量调节方便,但在工作过程中存在一定的脉动现象,肥料受潮粘附时容易堵塞排肥器,导致施肥均匀性差、施肥过程不稳定。日本洋马公司生产的水平圆盘式排肥器,可通过更换不同孔径的圆盘调节施肥量,其结构相对复杂、配件易磨损,且仅依靠肥料自身重力落肥,对排肥易潮解肥料适用性较差^[14-17]。早在20世纪60年代,国内已经开始研究水田深施机械,随着侧深施肥技术在国内的进一步推广,相关研究逐渐增多。位国建等^[18]设计了一种侧深螺旋排肥装置,该装置在开沟器上方安装螺旋排肥输送器装置,利用软轴传动输送器装置强制下肥,这在一定程度上解决了肥料堵塞输肥管的问题,但螺旋排肥输送器装置强制搅动导致缓释肥料破损严重,肥料深施效果不佳;

左兴健等^[19]设计了风送式水稻侧深精准施肥装置,该装置利用电机驱动排肥、全球定位系统测速的原理,采用风送输肥的方式,通过实时匹配排肥驱动电机转速和车辆行驶速度进行精准控制施肥,但该装置的可靠性与稳定性有待进一步提高;王金峰等^[20]设计了一种叶片调节式水田侧深施肥装置,该装置设有独立的防堵排肥机构,可通过改变组合叶片中心通孔大小调节排肥和施肥量,但无法保证施肥的稳定性。

为此,本文根据黑龙江省寒地稻作区侧深施肥的农艺要求,设计一种圆盘顶出式水田侧深施肥装置,以期通过改变肥槽有效工作长度实现施肥量的调节。采用电机驱动排肥、风送输肥的工作原理,通过对圆盘顶出式排肥器和风送输肥系统的设计与分析,确定侧深施肥装置的基本参数,通过台架试验和仿真试验对该装置施肥性能进行验证,以期解决肥料潮解、堵塞排肥器的问题,提高施肥均匀性和稳定性。

1 结构与工作原理

水田侧深施肥装置与插秧机配套连接结构简图如图1所示。常规的6行水田侧深施肥装置为一个肥箱搭配3个或6个排肥器设置为一排,放置在秧箱和车座之间。本文研究的水田侧深施肥装置为一个肥箱搭配3个排肥器,配套6行高速插秧机进行作业时设置为两排,分别放置在插秧机的两侧,这样可增加上秧工人的作业空间,方便在上秧时给毯状苗根区与秧箱表面之间浇水,提高了机插秧侧深施肥的作业效率。

侧深施肥装置主要由肥箱、圆盘顶出式排肥器、驱动电机、支撑架、风送系统等组成,如图2所示。肥箱由3个相通的子肥箱组成,每个子肥箱分别与对应的排肥器入肥口相连,通过螺栓固定在支撑架上,3个驱动电机并列一字排开,与支撑架通过螺栓固定连接,每个驱动电机分别通过转轴与排肥器连

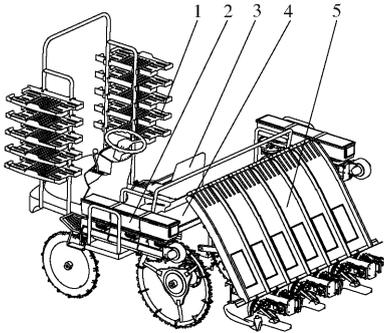


图1 侧深施肥装置与插秧机配套连接结构简图

Fig. 1 Schematic of supporting connection structure between lateral deep fertilization device and transplanter
1. 载秧盘 2. 侧深施肥装置 3. 车座 4. 底盘 5. 秧箱

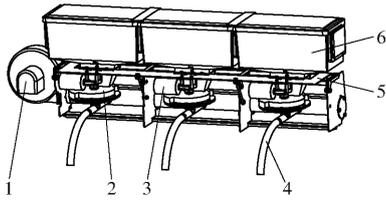


图2 侧深施肥装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of paddy field side deep fertilization device

1. 风送系统 2. 圆盘顶出式排肥器 3. 驱动电机 4. 输肥管
5. 支撑架 6. 肥箱

接,风送系统整体固定在支撑架上,与3个排肥器的下肥口相通,支撑架通过螺栓或其他紧固部件与不同品牌型号的插秧机连接配套使用,实现在水稻机插秧的同时进行侧深施肥作业。

圆盘顶出式水田侧深施肥装置在工作前,通过肥量调节装置改变肥槽有效工作长度。作业时,接通驱动电机带动转轴工作进而带动排肥器进行强制顶出排肥作业,排出的肥料在风送系统产生的气流和自身重力双重作用下落到秧苗一侧划好的沟槽内。

2 关键部件设计

2.1 圆盘顶出式排肥器设计

2.1.1 排肥器结构及工作原理

圆盘顶出式排肥器的结构主要包括上壳体、入肥口、弧形凸起、刮肥毛刷、排肥顶杆、排肥圆盘、压力弹簧、排肥转轴、肥量调节装置、下壳体等,结构如图3所示。上壳体固定安装在支撑架上,在上壳体上部开设入肥口与肥箱连接,入肥口底部两侧分别固装刮肥毛刷,在上壳体内部轴孔附近设置弧形凸起,排肥转轴穿过上壳体轴向固定安装在驱动电机上,驱动电机通过螺栓固定在支撑架上,在排肥转轴上套装肥量调节装置,排肥圆盘通过紧固螺母固装在排肥转轴下部,排肥圆盘上均匀开设8个肥槽并

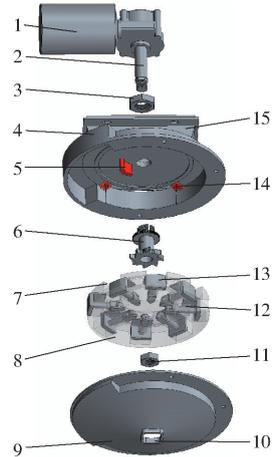


图3 圆盘顶出式排肥器

Fig. 3 Disc ejection type fertilizer discharger

1. 驱动电机 2. 排肥转轴 3. 肥量紧固螺母 4. 上壳体 5. 弧形凸起 6. 肥量调节装置 7. 肥槽 8. 排肥圆盘 9. 下壳体
10. 下肥口 11. 紧固螺母 12. 压力弹簧 13. 排肥顶杆 14. 刮肥毛刷 15. 入肥口

分别插配排肥顶杆,排肥顶杆和排肥圆盘之间套装压力弹簧,下壳体通过螺栓与上壳体锁紧固定,在下壳体底部开设下肥口与风送系统管路相通。

排肥作业前,先通过肥量调节装置改变肥槽有效工作长度设定排肥量,后将肥量调节装置紧锁在排肥转轴上。排肥作业时,接通驱动电机带动排肥转轴转动进而带动排肥圆盘水平转动,当排肥圆盘转过入肥口,肥料在自身重力作用下充满肥槽,刮肥毛刷刮除多余的肥料,随后依靠随排肥圆盘转动的排肥顶杆与固定的弧形凸起逐渐接触配合将肥槽内的肥料强制顶出,完成排肥。在一个排肥顶杆排肥阶段结束时,下一个排肥顶杆刚好开始接触弧形凸起进行排肥,避免了肥料潮解粘在肥槽内,保证了整个排肥作业连续均匀稳定。

2.1.2 排肥器基本结构参数

施肥量是排肥器设计的重要参考指标之一。当施肥量一定时,若排肥圆盘直径过小,则需要适当增加肥槽个数与排肥圆盘转速,但排肥圆盘转速过高,会导致排肥圆盘外端线速度过大,肥槽充肥时间变短易出现充不满现象,排肥均匀性降低,同时转速过高会导致离心力过大,肥槽内肥料颗粒均被甩出,施肥稳定性难以保证;若排肥圆盘直径过大,则需降低排肥圆盘转速或减小肥槽有效工作长度,此时,肥料会在充肥区聚集,刮肥毛刷的作用会相对减小,一定程度上增大了排肥圆盘的阻力,导致肥料破损率增加,缓释肥施肥效果不佳,此外,排肥圆盘直径过大,会增加排肥顶杆的长度与排肥器的整体质量,机构运动的稳定性无法保证^[21]。由于肥箱的纵向安装空间受秧箱和载秧盘的影响,同时要给随车工人预

留足够的活动空间方便上秧和给秧苗浇水,肥箱整体长度不能超过 1 000 mm,每个子肥箱长度约为 333 mm,为方便人工调节施肥量及收集和清理剩余肥料,仍需留出足够的操作空间,因此,考虑排肥器结构合理性,设计排肥圆盘直径为 240 mm。为保证施肥均匀性与稳定性,避免排肥过程中出现脉动现象,设计肥槽 8 个。

排肥圆盘每转排肥量对排肥器的理论分析有重要影响,对侧深施肥装置工作时施肥量的确定有一定指导作用。由于排肥器与肥箱直接相连,排肥器在进行排肥作业时,肥料颗粒在重力的作用下填充肥槽。肥槽内的肥料颗粒随着排肥圆盘转动而被排肥顶杆强制顶出的部分称为主动层,处在排肥圆盘和上壳体之间被摩擦力带动排出的小部分肥料称为被动层^[22],所以排肥器每转排量 q_0 为主动层排量 q_1 和被动层排量 q_2 之和,即

$$q_0 = q_1 + q_2 \quad (1)$$

其中 $q_1 = \sigma \rho z h_0 S$ $q_2 = \lambda \sigma \rho z h_1 S$

式中 σ ——肥槽内肥料颗粒填充系数

ρ ——肥料颗粒密度, g/cm^3

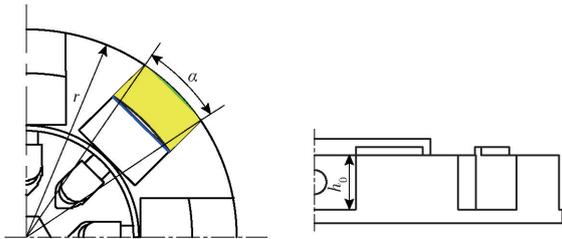
z ——肥槽个数 h_0 ——肥槽高度, mm

h_1 ——排肥圆盘和上壳体之间的间隙, mm

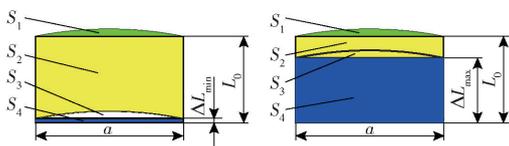
S ——单个肥槽充肥横截面积, mm^2

λ ——肥料颗粒被动层特性系数

由于该排肥器设置有刮肥毛刷,可刮除肥槽外多余的肥料,防止其进入排肥区,所以 $q_2 \approx 0$ ^[22]。单个肥槽横截面如图 4 所示,每个肥槽的截面由两条法向线段、一条切向线段及一段圆弧围成,圆弧半径即为排肥圆盘的外径。肥槽的横截面积在工作中随着排肥圆盘转动随时变化,且是关于肥槽有效工作长度的函数。



(a) 单个肥槽填充示意图



(b) 单个肥槽最大与最小横截面

图 4 肥槽横截面积示意图

Fig. 4 Schematic of cross-sectional area of fertilizer tank

由于排肥顶杆在肥槽内工作,占有一定空间,所以单个肥槽充肥横截面积 S 为圆冠面积 S_1 与长方

形面积 S_2 之和减去圆冠面积 S_3 和可变长方形面积 S_4 ,即

$$S = S_1 + S_2 - S_3 - S_4 = S_2 - S_4 \quad (2)$$

其中

$$S_1 = S_3 = \frac{\alpha r^2}{2} - \frac{r^2}{2} \sin \alpha$$

$$S_2 = aL_0 \quad S_4 = a\Delta L$$

式中 α ——圆冠面积 S_1 、 S_3 所对应的圆心角, rad

r ——排肥圆盘外径, mm

a ——肥槽宽度, mm

L_0 ——最大肥槽有效工作长度, mm

ΔL ——肥槽有效工作长度的变化量, mm

弧形凸起是圆盘顶出式排肥器的关键部件之一,排肥顶杆沿其表面滑动进行排肥作业,为了保证排肥的连续性与稳定性,需要在一个排肥顶杆将肥槽内肥料完全顶出时,相邻排肥顶杆刚好开始接触弧形凸起进行顶出排肥作业。假设肥槽内肥料完全由排肥顶杆顶出,排肥顶杆的整个作业过程沿着弧形凸起外表面进行,所以弧形凸起的外边缘曲线即为排肥顶杆作业的运动轨迹。考虑到弧形凸起的外边缘曲线应同时满足排肥顶杆的相对运动和牵连运动为匀速运动,因此,将弧形凸起的外边缘曲线设计为阿基米德螺旋线^[23]

$$r(\psi) = A + B(\psi) \quad (3)$$

式中 B ——阿基米德螺旋线系数, $mm/(\circ)$

ψ ——旋转角,阿基米德螺旋线转过的总角度, (\circ)

A —— $\psi = 0$ 时的极径, mm

弧形凸起的旋转角 ψ 对应的极径总增加量应与最大肥槽有效工作长度保持一致。弧形凸起的旋转角 ψ 为排肥顶杆在排肥作业时转过的角度,其会影响施肥均匀性。在肥槽有效工作长度和个数和已知的情况下,旋转角 ψ 取值为

$$\psi \approx \frac{360^\circ}{z} \quad (4)$$

根据排肥圆盘的肥槽个数 $z = 8$,结合排肥顶杆与排肥转轴的安装位置,同时为排肥顶杆脱离弧形凸起预留一定的缓冲角,设计弧形凸起的旋转角 ψ 为 48° 。

排肥顶杆是主要排肥部件,直接起到控制肥槽有效工作长度的作用,因此,排肥顶杆的行程应与肥槽有效工作长度时刻保持一致。为保证排肥顶杆可顺畅顶肥,考虑排肥顶杆的行程及排肥圆盘外径,设计排肥顶杆的整体长度为 55 mm。

2.1.3 排肥过程分析

排肥器工作过程包括充肥、运肥、排肥和空转 4 个阶段,本文主要对排肥过程进行理论分析,探究肥料颗粒的运动规律及结构参数与运行参数对排肥

器排肥性能的影响。在理想状态下,肥槽内的肥料全部作为一个整体随排肥圆盘转入排肥区时,均匀稳定地被排肥顶杆顶出,并在自身重力作用下经下壳体落入下肥口。同时在一个肥槽内的肥料被完全顶出的瞬间,另一个肥槽内的肥料已经开始被顶出,肥料会不间断地流到下肥口。但当排肥圆盘进入排肥区后转过的角度小于单个肥槽所对应的圆心角时,排肥顶杆还没有进行顶出作业,此时肥槽外端先暴露在排肥区的小部分肥料在离心力的作用下会被甩出。随后当排肥圆盘转过的角度等于单个肥槽所对应的圆心角时,肥槽完全处于排肥区内,此时排肥顶杆开始接触弧形凸起进行顶出排肥作业。由于被甩出的较小部分肥料颗粒运动过程较为简单,因此,对肥槽完全处于排肥区时排肥顶杆顶出的大部分肥料颗粒的运动进行分析。

假设肥槽内的这一部分肥料被排肥顶杆匀速顶出。选取下壳体建立参考系 oxy ,取一肥料颗粒 M ,则 M 在肥槽内的运动为法向匀速直线运动和切向随排肥圆盘匀速转动的复合运动,运动轨迹是一条和弧形凸起外边缘曲线重合的阿基米德螺旋线,肥料颗粒 M 在排肥过程中沿着这条轨迹运动,在脱离肥槽后仍然只受到重力作用,如图 5 所示。因此,在离开肥槽后其运动变成速度方向不与排肥圆盘相切的平抛运动,其平抛运动的初速度及抛出后在水平方向与垂直方向的位移为

$$X = v_x t \quad (5)$$

$$Y = v_y t \quad (6)$$

$$Z = \frac{1}{2} g t^2 \quad (7)$$

其中 $v_x = \omega r \quad (8)$

$$v_y = \frac{L\omega}{\psi} \quad (9)$$

式中 ω ——排肥圆盘角速度, rad/s

L ——肥槽有效工作长度, mm

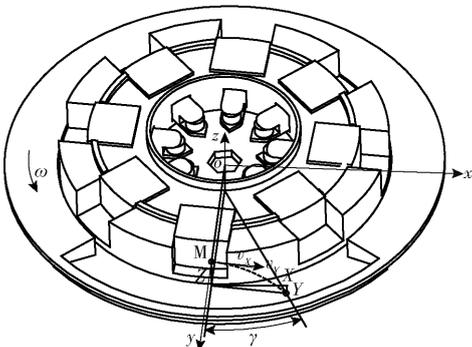


图 5 排肥过程肥料颗粒运动分析

Fig. 5 Movement analysis of fertilizer particles in fertilizer discharge process

v_x ——肥料颗粒 M 做平抛运动时 x 方向速度, m/s

v_y ——肥料颗粒 M 做平抛运动时 y 方向速度, m/s

X ——肥料颗粒 M 落到下壳体上水平 x 方向位移, m

Y ——肥料颗粒 M 落到下壳体上水平 y 方向位移, m

Z ——肥料颗粒 M 落到下壳体上垂直位移, m

g ——重力加速度, m/s^2

t ——肥料颗粒 M 做平抛运动的时间, s

肥料颗粒 M 从开始抛出到落在下壳体上结束所发生的转角 γ 为

$$\gamma = \arctan \frac{X}{Y+r} = \arctan \frac{\omega r \sqrt{\frac{2Z}{g}}}{\frac{L\omega}{\psi} \sqrt{\frac{2Z}{g}} + r} \quad (10)$$

由式(10)可知,肥料颗粒从开始抛出到落在下壳体结束所发生的转角 γ 与排肥圆盘角速度 ω 、排肥圆盘外径 r 、肥槽有效工作长度 L 、弧形凸起的旋转角 ψ 及肥料颗粒落到下壳体发生的垂直位移 Z 有关。当排肥圆盘外径 r 和肥料颗粒垂直位移 Z 一定时,随着排肥圆盘角速度 ω 的增大,肥料颗粒下落所发生的转角 γ 也会增大。 γ 越大,肥料颗粒越容易在排肥区末端聚集,导致排肥器落肥缓慢和施肥均匀性不佳,易造成肥料堵塞排肥器的现象。由此可知,排肥圆盘角速度是施肥性能的重要影响因素。

2.1.4 EDEM 仿真分析

由于排肥过程肥料颗粒发生的位移无法确定,肥料颗粒下落所发生的转角 γ 直接计算误差较大,且排肥圆盘转速对肥料颗粒充肥过程也有一定的影响,因此,应用 EDEM 软件进行充肥和排肥仿真试验,寻求排肥圆盘转速最佳工作范围。根据排肥器的实际状况,仿真试验所用参数见表 1^[24]。肥料颗粒表面光滑,无粘附力作用,接触模型选用 Hertz-Mindlin 模型。圆盘顶出式排肥器仿真模型如图 6 所示。

通过分析排肥圆盘转速影响施肥性能的预试验,参考现有排肥器与排种器的研究成果^[9,20,25-26],分别选取排肥圆盘转速为 5、10、35、60、65 r/min 进行仿真试验,肥槽有效长度设置为最大长度,分析不同排肥圆盘转速对充肥与排肥性能的影响。以排肥圆盘转速为 5 r/min 时仿真试验为例,对其仿真结果进行分析,如图 7 所示。

图 7a 为排肥器仿真模型仰视图下排肥圆盘转

表1 仿真模型材料具体参数

Tab.1 Specific parameters of simulation model

materials		
项目	参数	数值
肥料	泊松比	0.21
	剪切模量/GPa	0.32
	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.32
PLA 塑料	泊松比	0.29
	剪切模量/GPa	0.22
	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.11
肥料-肥料	恢复系数	0.35
	静摩擦因数	0.26
	滑动摩擦因数	0.08
肥料-PLA 塑料	恢复系数	0.42
	静摩擦因数	0.24
	滑动摩擦因数	0.06

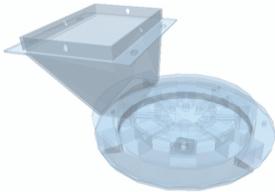


图6 排肥器仿真模型

Fig.6 Simulation model of fertilizer discharger

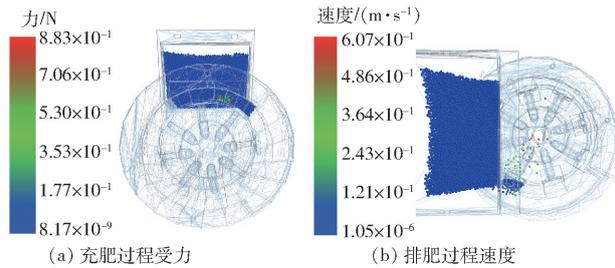


图7 EDEM 仿真结果分析

Fig.7 Analysis of EDEM simulation results

速为 5 r/min 时充肥过程肥料颗粒受力,此时肥料颗粒充肥过程中在肥槽上方聚集时间过长,受到摩擦力及剪切力较大,受力集中在 $0.353 \sim 0.883 \text{ N}$,不仅加剧肥料颗粒对排肥器壳体的磨损,同时会造成肥料颗粒破碎率增加,肥料粉末粘附排肥器及输肥管路表面造成排肥器堵塞,且转速过慢时施肥效率较低;另外,当排肥圆盘转速为 10 r/min 时,肥料颗粒在充肥过程中受力明显减小,受力主要集中在 $0.056 \sim 0.111 \text{ N}$;当排肥圆盘转速大于 35 r/min 时,肥料颗粒的摩擦力及剪切力已变得极小,可忽略不计。图7b为排肥器仿真模型俯视图下排肥圆盘转速为 5 r/min 时排肥过程中肥料颗粒的速度,另通过分析排肥圆盘转速小于 35 r/min 时仿真试验结果,排出的肥料颗粒速度主要集中在 $0.121 \sim 0.526 \text{ m/s}$,通过追踪大部分肥料颗粒的运动轨迹及下落位置,根据式(10)可以得出,肥料颗粒从肥槽中排出到落

在下壳体所发生的转角 γ 变化范围为 $9^\circ \sim 46^\circ$;当排肥圆盘转速为 60 r/min 时,排出肥料颗粒的速度集中在 $0.270 \sim 0.405 \text{ m/s}$,转角 γ 的变化范围为 $23^\circ \sim 68^\circ$;当排肥圆盘转速为 65 r/min 时,排出肥料颗粒速度集中在 $0.568 \sim 0.757 \text{ m/s}$,肥槽内大部分肥料会撞击排肥区末端壳体后才沿壳体滑向下肥口,此时转角 γ 变化范围的最大值已经大于排肥区所对应的圆心角,且肥料颗粒在排肥区末端大量堆积易造成排肥器堵塞,此时已不利于排肥。综上,考虑充肥过程肥料颗粒的受力情况及排肥过程肥料颗粒的转角变化,确定排肥圆盘最佳工作转速是 $10 \sim 60 \text{ r/min}$ 。

每公顷水田总施肥量 q 计算公式为

$$q = \frac{q_0 n T N}{1000} \quad (11)$$

式中 n ——排肥圆盘转速, r/min

T ——每公顷水田插秧作业用时, min

N ——排肥圆盘个数

根据水田侧深施肥总施肥量 $150 \sim 930 \text{ kg/hm}^2$ 要求,一般6行高速插秧机作业速度 $0.7 \sim 1.2 \text{ m/s}$ 及作业幅宽 1.8 m ^[3-4],为保证作业速度超过 1.2 m/s 时排肥圆盘转速仍有一定的调节空间,设定插秧机作业速度为 1.2 m/s 时排肥圆盘转速为 50 r/min ,根据式(11)可计算出每转排量的调节范围为 $6.4 \sim 40 \text{ g}$,根据式(1)、(2)可知,排肥圆盘每转排量与填充系数有关,且肥槽体积和形状对填充系数有一定影响,因此,设计肥槽有效工作长度的变化范围为 $5 \sim 20 \text{ mm}$,且连续可调,可通过肥量紧固螺母来实现。

2.2 风送系统设计

风送系统是侧深施肥装置的辅助输肥系统,是实现稳定施肥的关键^[19],其主要由风机、风机调速开关、送风管、文丘里管和输肥管等组成。其中,文丘里管是风送系统的关键部件,包括进肥口、进风口、收缩段、喉部和出风口。排肥器下肥口、送风管和输肥管分别与文丘里管的3个接口相连。在工作时,由风送系统前端的风机产生一定压力的压缩气体,流经文丘里管收缩段在喉部增加速度后,在下肥口处形成负压,肥料颗粒顺利落入输肥管路与气流充分混合,再通过输肥管运送至在秧苗一侧划好的沟槽内。

风送系统主要参数包括空气流量、输送气流速度和输肥管路内径^[19]等。根据文献[9]对风送系统进行设计,空气流量为 $174 \text{ m}^3/\text{h}$,输送气流速度为 20.06 m/s ,文丘里管各项参数为:进风口和出风口直径为 32 mm ,收缩角为 21° ,喉部高度为 16.5 mm ,

长度为 16.5 mm, 收缩段长度为 42 mm。进肥口与排肥器下肥口横截面均是边长为 24 mm 的正方形, 文丘里管总体长度为 136 mm。

由于风送系统是在肥料颗粒从排肥器中落下后进行风送作业, 因此, 风机风速不会对排肥器的排肥能力造成影响。为保证机插秧侧深施肥的作业效率, 在实际工作过程中应将风机风速设置为一个定值, 该风速需要满足总施肥量为最小 150 kg/hm^2 或最大 930 kg/hm^2 时均可保持较好的施肥连续性与稳定性。由文献[9]可知, 当风机风速在 26 m/s 左右时施肥均匀性变异系数较小; 文献[27]对气送式施肥装置进行仿真分析, 风速 $18 \sim 25 \text{ m/s}$ 时肥料颗粒分布均匀, 施肥效果最佳; 由文献[28]得到, 风速为 $25 \sim 35 \text{ m/s}$ 时有利于提高施肥精确性和均匀性, 因此, 在保证空气流量的前提下, 将风机风速确定为 25 m/s 进行水田侧深施肥作业。

根据空气流量与输送气流速度, 选取工作电压为 12 V , 功率为 72 W 可调速离心风机, 最大风量可达 $300 \text{ m}^3/\text{h}$, 满足风量要求。

3 性能试验优化与分析

3.1 试验条件

试验地点为东北农业大学排种性能实验室, 试验台架为 JPS-12 型排种器性能检测试验台。试验肥料为中化集团有限公司生产的水稻侧深施肥专用肥, 肥料密度为 1.15 g/cm^3 。试验时, 将侧深施肥装置固定安装在试验台架上, 设置肥槽有效工作长度后锁定肥量调节装置, 通过风机调速开关稳定控制风机风速为 25 m/s , 通过电机调速器控制排肥圆盘转速, 通过调节排种试验台电动机变频器来控制传送带的速度模拟插秧机田间作业过程, 将自制每小段长度为 100 mm , 总长度为 6000 mm 的肥料颗粒收集带放置在传送带上收集肥料, 该肥料收集带两边及每两个小段之间均有长 80 mm 的隔板, 可防止肥料进入相邻小段, 以免影响试验数据的准确性。侧深施肥装置试验台如图 8 所示。

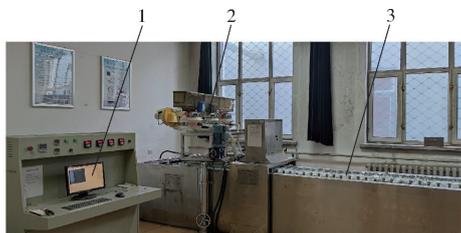


图 8 圆盘顶出式侧深施肥装置试验台

Fig. 8 Test bench of disc ejection type lateral deep fertilization device

1. 排种性能试验台 2. 侧深施肥装置 3. 肥料收集带

3.2 试验设计与方法

台架试验参照 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》进行, 主要测定指标有各行排量一致性、施肥稳定性与施肥均匀性。

各行排量一致性测定为静态试验。试验时肥料容积超过肥箱的一半, 测定行数为 3 行。肥槽有效工作长度设置为 20 mm , 排肥圆盘转速分别设置为 $10, 20, 30, 40, 50, 60 \text{ r/min}$, 每个排肥器在每个转速下重复试验 5 次, 所有排肥器同时开始同时结束, 每次截取 1 min 收集肥料。

施肥稳定性测定为静态试验。试验时, 用肥料收集带收集不同排肥圆盘转速下相同时间内的总排肥量。肥槽有效工作长度设置为 20 mm , 排肥圆盘转速分别设置为 $10, 20, 30, 40, 50, 60 \text{ r/min}$, 每次测定 10 s , 每个转速下重复测定 5 次。

施肥均匀性测定为动态试验。试验时, 沿传送带前进方向按 100 mm 长度连续等分不少于 30 段, 分别收集各小段内的肥料并称量。由于插秧机在田间工作中施肥量调节主要依靠肥量调节装置来控制, 即插秧机的作业速度和排肥圆盘转速存在一种较为复杂的同步关系, 作业速度快时排肥圆盘转速也需相应加快, 这样既可以保证每公顷水田设定的总施肥量, 又能够免去频繁调整转速用时来提高作业效率。因此, 总施肥量只需在插秧作业前通过调节肥量调节装置改变肥槽有效工作长度即可实现。

根据式(11)可知, 总施肥量与排肥圆盘转速、每转排量及作业时间有关, 已知

$$T = \frac{10000}{1.8v \times 60} \quad (12)$$

式中 v ——插秧机作业速度, m/s

因此, 联立式(11)、(12), 总排肥量与排肥圆盘转速、每转排量和插秧机作业速度的关系式为

$$q = \frac{q_0 n N}{10.8v} \quad (13)$$

由于插秧机作业速度与排肥圆盘转速存在同步关系, 当总施肥量最大时, 每转排量应取最大值, 肥槽有效工作长度也应为最大值, 即 $q = 930 \text{ kg/hm}^2$, $N = 6$, $q_0 = 40 \text{ g}$, v 取最大插秧机作业速度 1.2 m/s 时, 可得 $n \approx 50 \text{ r/min}$, 此时肥槽有效工作长度 $L = 20 \text{ mm}$ 。因此, 为减小排肥圆盘转速与作业速度对排肥性能的影响, 试验时将排肥圆盘转速设定为 50 r/min , 作业速度设定为 1.2 m/s , 风机风速设定为 25 m/s , 肥槽有效工作长度分别设置为 $5, 10, 15, 20 \text{ mm}$ 进行施肥均匀性试验的测定, 同时探究肥槽有效工作长度与总施肥量之间的关系。每个肥槽有效工作长度重复试验 5 次, 每次测定 5 s 。

试验完成后,将收集带内的肥料依次编号,用精度为0.01 g的天平称量并记录。各行排量一致性、施肥稳定性和施肥均匀性都由施肥量均值、标准差和变异系数来衡量。试验结果参照 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》进行计算。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 各行排量一致性

通过 Design-Expert 6.0 软件对各行排量一致性测定结果进行方差分析,结果表明排肥圆盘转速对各行排量一致性施肥量均值和各行排量一致性变异系数影响显著,回归方程分别为

$$y_1 = 24.95 + 38.55x_1 \quad (R^2 = 0.99) \quad (14)$$

$$y_2 = 4.28 - 1.47 \times 10^{-1}x_1 + 1.8 \times 10^{-3}x_1^2 \quad (R^2 = 0.47) \quad (15)$$

随着排肥圆盘转速的增大,各行排量一致性施肥量均值呈线性增加,每转排量逐渐减小。在不同排肥圆盘转速下,各行排量一致性的变异系数均较小,满足 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》中各行排量一致性变异系数小于13%的要求,说明该侧深施肥装置各行排量一致性较好。

3.3.2 施肥稳定性

对施肥稳定性测定结果进行方差分析,结果表明排肥圆盘转速对施肥稳定性施肥量均值和施肥稳定性变异系数影响显著,回归方程分别为

$$y_3 = 11.18 + 19.36x_1 \quad (R^2 = 0.99) \quad (16)$$

$$y_4 = 6.27 - 2.43 \times 10^{-1}x_1 + 2.90 \times 10^{-3}x_1^2 \quad (R^2 = 0.84) \quad (17)$$

随着排肥圆盘转速的增大,施肥稳定性施肥量均值呈线性增加。在不同排肥圆盘转速下,施肥稳定性变异系数均较小。假设某地区水稻种植需总施肥量为450 kg/hm²,插秧机作业速度1.2 m/s,肥槽有效工作长度为20 mm即每转排量 q_0 约为40 g,根据式(13)可计算出排肥圆盘转速为24.3 r/min,此时施肥稳定性变异系数为2.07%,满足 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》中施肥稳定性变异系数小于7.8%的要求,说明该侧深施肥装置施肥稳定性较好。

3.3.3 施肥均匀性

对施肥均匀性测定结果进行方差分析,结果表明肥槽有效工作长度对施肥均匀性施肥量均值和施肥均匀性变异系数及总施肥量影响显著,回归方程分别为

$$y_5 = -0.515 + 0.158x_2 \quad (R^2 = 0.98) \quad (18)$$

$$y_6 = 14.62 - 0.437x_2 + 1.0 \times 10^{-3}x_2^2 \quad (R^2 = 0.92) \quad (19)$$

$$y_7 = 46 + 9.06x_2 + 1.74x_2^2 \quad (R^2 = 0.99) \quad (20)$$

随着肥槽有效工作长度的增加,施肥均匀性施肥量均值呈线性增加,施肥均匀性变异系数呈现逐渐减小的变化趋势。假设某地区水稻种植需总施肥量为450 kg/hm²,插秧机作业速度为1.2 m/s,排肥圆盘转速为50 r/min,据式(20)可知肥槽有效工作长度约为13 mm,此时施肥均匀性变异系数为9.11%,满足 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》中施肥均匀性变异系数小于40%的要求,说明该侧深施肥装置施肥均匀性较好。

为验证圆盘顶出式水田侧深施肥装置的施肥均匀性,与目前最常用的槽轮式水田侧深施肥装置进行对比。根据文献[20]中对直槽轮式水田侧深施肥装置进行的施肥均匀性测定结果可知,直槽轮式水田侧深施肥装置在不同前进速度和不同槽轮转速下的施肥均匀性变异系数最优为45.11%,未达到 NY/T 1003—2006 中要求的施肥均匀性变异系数小于40%的要求;文献[9]中对斜槽轮式水田侧深施肥装置以不同排肥轮转速、前进速度及风机风速进行的试验结果可知,施肥均匀性变异系数平均为22.08%,从研究结果看,斜槽轮式排肥器满足 NY/T 1003—2006 中要求的施肥均匀性变异系数小于40%的要求,一定程度上提高了均匀性,但作业过程中易出现肥料颗粒被挤碎的现象。研究的圆盘顶出式水田侧深施肥装置在不同肥槽有效工作长度下作业,施肥均匀性变异系数变化范围为5.96%~12.77%,平均为9.34%,有效提高了施肥均匀性,且在总施肥量为450 kg/hm²时长时间工作未出现肥料挤压破碎现象。

根据试验测定结果,总施肥量变化范围为137~921 kg/hm²,通过对试验数据进行处理,拟合得肥槽有效工作长度与总施肥量之间的关系曲线如图9所示。随着肥槽有效工作长度的增加,总施肥量逐渐增大,但曲线变化不均匀,主要是因为当肥槽有效工作长度发生变化时,充肥体积随之变化,肥料颗粒填充系数会发生变化,导致相应的每转排量变化不均匀,总施肥量变化也不稳定。此外,当肥槽有效工作长度较大时肥槽易出现充不满肥料的现象,因此总施肥量测定结果较离散。

目前,常用的水田侧深施肥专用肥密度在0.85~1.40 g/cm³之间。为验证施肥装置肥量调节性能,选取云天化集团有限公司生产的两种不同含量的水稻专用复合肥(14-18-18、17-14-16)和哈尔滨金农科肥业生产的两种不同含量的水稻侧深施肥专用肥(20-10-15、18-10-12)进行试验,密度分别为1.40、1.30、1.00、0.85 g/cm³,试验后对试

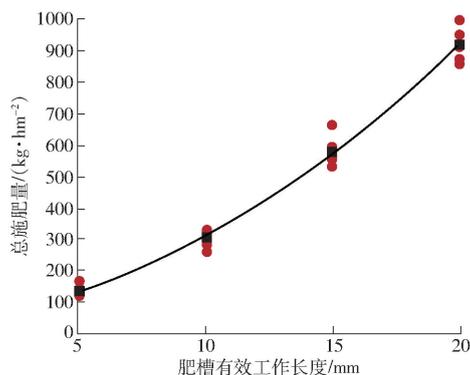


图9 肥槽有效工作长度对总施肥量的影响

Fig.9 Effect of effective work length of fertilizer tank on total fertilize amount

验结果进行处理,根据拟合结果绘制出了肥料密度在 $0.85 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 之间的肥槽有效工作长度与总施肥量的变化曲线,如图10所示。

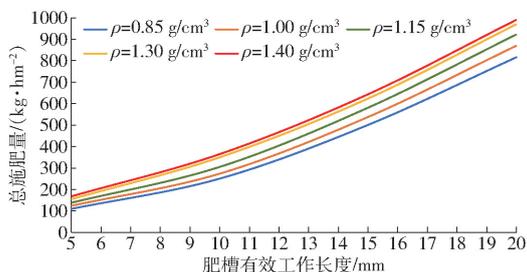


图10 总施肥量调节示意图

Fig.10 Schematic of total fertilization adjustment

当肥料密度不同时,总施肥量随肥槽有效工作长度变化关系不同,但整体变化趋势一致。随着肥槽有效长度的增加,总施肥量逐渐增大,且密度越大总施肥量增加速率越快。在应用本文研究的水田侧深施肥装置进行田间作业时,可以根据不同密度的肥料选择相近的施肥曲线进行总施肥量的调节,为施肥作业提供指导意见。黑龙江省哈尔滨市阿城区种植龙洋16号水稻的总施肥量为 450 kg/hm^2 左右,

为密度较小肥料,调节肥槽有效工作长度应在 14 mm 左右,选择密度稍大肥料时,肥槽有效工作长度在 12 mm 左右即可满足要求;黑龙江省哈尔滨市阿城区种植稻花香水稻总施肥量为 300 kg/hm^2 左右,选择密度较小肥料时,调节肥槽有效工作长度应在 11 mm 左右,密度稍大肥料,肥槽有效工作长度控制在 8.5 mm 左右即可满足施肥量要求。

4 结论

(1)设计了一种圆盘顶出式水田侧深施肥装置,阐述了其工作原理,并确定了其关键部件圆盘顶出式排肥器和风送系统的基本结构参数,对侧深施肥装置的排肥过程进行运动学分析,建立了施肥装置排肥过程的运动学模型,得出排肥圆盘转速是施肥性能的重要影响因素,通过EDEM虚拟仿真试验确定排肥圆盘最佳工作转速为 $10 \sim 60 \text{ r/min}$ 。

(2)台架性能试验表明,各行排量一致性、施肥稳定性和施肥均匀性满足国家施肥机械作业标准要求,当肥料密度为 1.15 g/cm^3 、肥槽有效工作长度在 $5 \sim 20 \text{ mm}$ 之间调节时,总施肥量变化范围为 $137 \sim 921 \text{ kg/hm}^2$,施肥均匀性变异系数为 $5.96\% \sim 12.77\%$;与直槽轮式和斜槽轮式水田侧深施肥装置对比表明,圆盘顶出式水田侧深施肥装置可有效提高施肥均匀性,在总施肥量为 450 kg/hm^2 时,长时间作业未出现肥料挤压破碎现象。

(3)通过试验得到肥槽有效工作长度与总施肥量之间的关系曲线,选择密度为 1.40 、 1.30 、 1.00 、 0.85 g/cm^3 肥料进行验证试验,得到肥料密度在 $0.85 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 之间的肥槽有效工作长度与总施肥量的变化曲线,可据此应用于田间作业,为机具调试应用及实际施肥作业提供指导和参考。

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.jcsam.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] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学,2018,51(11):2116-2125. BAI Youlu. The situation and prospect of research on efficient fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(11): 2116-2125. (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] 马昕,杨艳明,刘智蕾,等. 机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(4):1095-1103. MA Xin, YANG Yanming, LIU Zhilei, et al. Yield increasing effect of mechanical topdressing of polymer-coated urea mixed with compound fertilizer in cold area rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(4): 1095-1103. (in Chinese)

- [5] 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.
- [6] PENG X L, YANG Y M, YU C L, et al. Crop management for increasing rice yield and nitrogen use efficiency in northeast China[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(5): 1682-1690.
- [7] 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.
- [8] 付宇超, 袁文胜, 张文毅, 等. 我国施肥机械化技术现状及问题分析[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 251-255, 263.
FU Yuchao, YUAN Wensheng, ZHANG Wenyi, et al. Present situation and problem analysis of the technology of fertilizer mechanization in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 251-255, 263. (in Chinese)
- [9] 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&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.011. (in Chinese)
- [10] 顿国强, 于春玲, 郭艳玲, 等. 双齿轮式排肥器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 87-96.
DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Design and experiment of double-gear type fertilizer apparatus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 87-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200310&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.010. (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] 李树伟. 水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥装置设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
LI Shuwei. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization drive for precision rice hill-direct-seeding machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [13] 潘世强, 赵亚祥, 金亮, 等. 2BFJ-6型变量施肥机外槽轮式排肥器的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(1): 40-42.
PAN Shiqiang, ZHAO Yaxiang, JIN Liang, et al. Design and experimental research of external grooved wheel fertilizer apparatus of 2BFJ-6 type variable rate fertilizer applicator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 40-42. (in Chinese)
- [14] 梁方, 杨淦光, 许丰, 等. 外槽轮式播种机播量控制系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 153-157.
LIANG Fang, YANG Ganguang, XU Feng, et al. The seeding rate control system design and experiment of the external grooved wheel seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 153-157. (in Chinese)
- [15] 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 Wenyong. The paddy field mechanization state in Japan China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2002, 24(3): 23-25. (in Chinese)
- [16] 汪博涛. 基于离散元法的外槽轮排肥器工作过程仿真参数优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
WANG Botao. Simulation and parameter optimization of the working process of the outer grooved wheel fertilizer distributor based on discrete element method[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [17] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻穴播同步侧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)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 刘春波, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻直播机螺旋槽轮排种器设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(6): 734-739.
LIU Chunbo, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of spiral grooved wheel for rice direct seeding machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(6): 734-739. (in Chinese)
- [22] 张信, 李光林, 白秋薇, 等. 一种外槽轮体积自动可调的定量排肥装置设计与试验[J]. 西南大学学报(自然科学版),

2020,42(8):158-166.

ZHANG Xin, LI Guanglin, BAI Qiuwei, et al. Design and test of a quantitative fertilizer discharge device with automatically adjustable volume of external groove wheel[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(8): 158-166. (in Chinese)

- [23] 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)
- [24] 高观保. 风送式水稻侧深施肥装置关键部件设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
GAO Guanbao. Design and experiment of key parts of side-depth fertilizer device with pneumatic conveying for paddy[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] 王永梅, 杨宛章, 王希贵. 螺旋槽轮式排种器的研究[J]. 新疆农业大学学报, 2006, 29(1): 67-70.
WANG Yongmei, YANG Wanzhang, WANG Xigui. Study on row sowing device with spiral sheave[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2006, 29(1): 67-70. (in Chinese)
- [26] 尹文庆, 赵璐, 李骅, 等. 气力槽轮组合式蔬菜精密排种器吸嘴型孔设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 68-76, 136.
YIN Wenqing, ZHAO Lu, LI Hua, et al. Design and experiment on suction nozzle type hole of pneumatic-sheave combined vegetable precision metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 68-76, 136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190408&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.008. (in Chinese)
- [27] 李立伟, 孟志军, 王晓鸥, 等. 气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 171-180.
LI Liwei, MENG Zhijun, WANG Xiaou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 171-180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s023&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.023. (in Chinese)
- [28] 杨庆璐, 李子涵, 李洪文, 等. 基于 CFD-DEM 耦合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?file_no=20190809&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)

(上接第 61 页)

- [29] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农业大学学报, 1982(2): 64-69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982(2): 64-69. (in Chinese)
- [30] 严霖元. 对农业机械工作部件滑切角的探讨[J]. 江西农业大学学报, 1991, 13(1): 64-68.
YAN Linyuan. An approach to the sliding cutting angle of the working parts of agricultural machinery[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1991, 13(1): 64-68. (in Chinese)
- [31] 梁仲维, 齐龙, 马旭, 等. QSC-2 型步进式水稻除草机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(8): 115-119.
LIANG Zhongwei, QI Long, MA Xu, et al. Design and test of QSC-2 marching type paddy weeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 115-119. (in Chinese)
- [32] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软粘土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1065-1071.
CHEN Yingping, HUANG Bo, CHEN Yunmin. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1065-1071. (in Chinese)
- [33] LEWIS B A. MANUAL for LS-DYNA soil material model 147 (FHWA-HRT-04-095) [R]. USA Department of Transportation: Federal Highway Administration, 2004.
- [34] 齐龙, 梁仲维, 马旭, 等. 耙压式除草轮与水田土壤作用的流固耦合仿真分析及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 29-37.
QI Long, LIANG Zhongwei, MA Xu, et al. Validation and analysis of fluid-structure interaction between rotary harrow weeding roll and paddy soil[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 29-37. (in Chinese)