

徐红梅, 赵亚兵, 李中鑫, 等. 风送式水稻侧深施肥装置的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(1): 276-287.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.01.030

风送式水稻侧深施肥装置的设计与试验

徐红梅, 赵亚兵, 李中鑫, 蒙焱仕, 张胤培, 张国忠

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

摘要 针对水田作业环境下施肥机械的排肥口末端易被泥土堵塞导致施肥机的排肥性能差的问题, 本研究综合双齿轮排肥器和螺旋排肥器的优点, 设计了一种风送式水稻侧深施肥装置。对水稻施肥装置进行整体设计, 并通过理论计算确定施肥装置的参数范围, 依据物料特性参数试验结果, 借助EDEM软件对关键部件进行离散元仿真分析, 以排肥稳定性变异系数为评价指标, 选取螺旋轴直径、螺距和转速为试验因素, 进行单因素及Box-Behnken响应曲面试验, 确定其最佳参数; 基于两级排肥器传动比对施肥装置排肥质量的影响规律确定两级排肥器最佳传动比。结果显示: 螺旋轴最佳组合参数为螺旋轴直径21 mm、转速140 r/min、螺距17 mm, 此时排肥稳定性变异系数为2.5%; 双齿轮排肥器和螺旋排肥器的传动比为1:4时排肥连续且均匀。样机试验表明, 两级排肥器的排肥一致性、稳定性、均匀性变异系数相比螺旋排肥器均有所提高。

关键词 水稻; 施肥机; 侧深施肥; 两级排肥器; 离散元

中图分类号 S224.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)01-0276-12

水稻是我国三大主要粮食作物之一, 对我国粮食安全有重要影响。合理的施肥方式能够提高水稻的产量和品质, 目前我国水稻施肥以速效肥表面撒施为主, 肥料施用量大、利用率低、污染大^[1-2]。水稻侧深施肥技术可以降低肥料使用量与径流损失, 提高肥料利用率, 减少环境污染^[3]。

近年来, 国内外专家学者对水稻侧深施肥技术进行大量的研究。齐兴源等^[4]研制了一种变量施肥机, 该施肥装置的施肥量可由单个排肥轮控制, 通过高速气流实现远距离输送肥料, 但其排肥均匀性及最佳工作参数还需要进一步研究。为实现水稻大田精量旱穴直播, 翟建波等^[5]设计了一种可用于旱田播种施肥的施肥机, 该施肥装置可以在水稻早播的同时进行施肥作业, 可以有效减少水稻种植工序和降低劳动强度。王金峰等^[6]对施肥机的外槽轮排肥器进行改进分析, 得出外槽轮转速越大施肥均匀性越好。雷小龙等^[7]针对颗粒肥料设计一种螺旋组合式供肥装置, 可根据作物的生长周期实时改变施肥量, 但该装置的适用肥料较单一。位国建等^[8]研制了一种螺旋强排肥装置, 试验验证该装置可降低肥料堵塞率, 提高排肥连续性。刘彩玲等^[9]研制了一种水平

涡轮叶片式排肥装置, 该排肥装置排肥均匀性高于传统排肥器。顿国强等^[10-11]针对传统排肥器均匀性较差, 先后对传统外槽轮及螺旋轴排肥器进行改进优化, 设计了间隙啮合渐开线双齿轮排肥器和同向双螺旋排肥器, 其施肥均匀性有明显提高。都鑫等^[12]设计了一种倾斜梯形孔式排肥装置, 该装置可在秧苗根系附近进行施肥, 有效减少施肥量。宋灿灿等^[13]研究了排肥槽轮的凹槽形状和列数对其排肥脉动性、准确性的影响规律, 确定了槽轮最佳结构。

总体而言, 目前关于施肥装置的研究已取得较大进展, 但仍需进一步完善和深入研究。如在提高排肥均匀性、防止排肥口堵塞及确定最佳工作参数等方面仍需进一步改进。本研究在上述研究的基础上, 综合双齿轮排肥器和螺旋排肥器的优点, 采用优化设计理论设计一种两级排肥器, 以期改善排肥口堵塞现象、降低制造成本, 同时提高两级排肥器的排肥均匀性和连续性, 实现插秧机水田环境下侧深精准施肥, 为水稻侧深施肥技术及装备研究提供理论依据和参考。

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2662022GXYJ003)

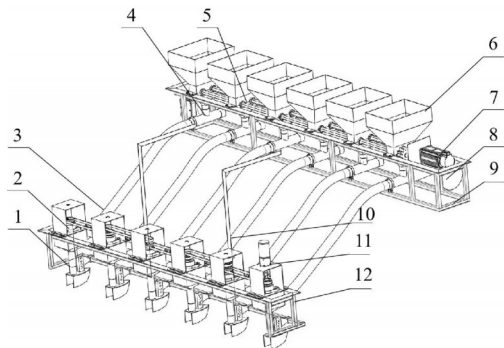
徐红梅, E-mail: xhm790912@163.com

通信作者: 张国忠, E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 整机结构与工作原理

风送式水稻侧深施肥装置主要由肥箱、机架、双齿轮排肥器^[10]、螺旋排肥器、分气管、输肥管、开沟器等结构组成(图 1)。其工作原理是由电机驱动传动轴排肥,气力输肥。工作时,插秧机匀速前行,先启动风机然后启动驱动电机,第一级排肥器肥箱中的肥料颗粒由第一级排肥器连续、均匀地排出,并下落至混肥管中,此时由风机吹出的气流被分气管均匀地分为若干组,然后肥料颗粒在混肥管处由气流推动,通过输肥软管被送至第二级排肥器的肥箱中,再由第二级排肥器将肥料颗粒排到开沟器中,与开沟器的折射板碰撞后均匀散落于泥土,从而完成施肥作业。在整个插秧施肥作业中,风送式水稻侧深施肥装置的作业宽幅与插秧机作业宽幅相同,通过转速控制器调节施肥装置的排肥量,风送式水稻侧深施肥装置的主要技术参数如表 1 所示。



1. 开沟器 Furrow opener; 2. 螺旋排肥器 Spiral fertilizer apparatus; 3. 输肥管 Fertilizer delivery pipe; 4. 连接架 Connecting frame; 5. 混肥管 Fertilizer mixing pipe; 6. 肥箱 Fertilizer box; 7. 双齿轮排肥器 Double-gear fertilizer apparatus; 8. 分气管 Gas distribution pipe; 9. 伺服电机 Servo motor; 10. 主机架 1 Main frame 1; 11. 减速电机 Gear motor; 12. 主机架 2 Main frame 2.

图 1 风送式水稻侧深施肥装置结构示意图
Fig.1 Structure sketch of wind-driven side deep fertilization device used for rice

1.2 两级排肥器设计

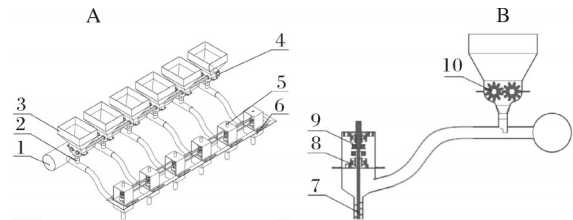
为提高施肥机排肥均匀性和连续性,同时针对常规侧深施肥机的排肥口容易堵塞这一难点,设计一种两级排肥器,其结构如图 2 所示,双齿轮排肥器主要保证施肥的均匀性,降低断条率,而螺旋排肥器主要防止排肥口末端被泥土堵塞,提高肥料利用率。

1) 双齿轮排肥器参数确定。双齿轮排肥器与颗粒肥料直接接触,是控制施肥机排肥量和保证施肥均匀性的关键结构。工作原理为:颗粒肥料先进入

表 1 风送式水稻侧深施肥装置主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of wind-driven side-deep fertilization device used for rice

项目 Items	参数 Parameters
机具尺寸(长×宽×高)/mm Machine size (length×width×height)	2 500×2 595×2 330
作业宽幅/mm Working width	1 800
插值行距/mm Interpolated line spacing	300
作业行数 Number of lines of work	6
侧深施肥行距/mm Sid-deep fertilization row spacing	240~360
工作速度/(m/s) Working speed	0~1.6
驱动电机功率/W Drive motor power	600
施肥深度/mm Fertilization depth	0~100
排肥量/(kg/hm ²) Fertilizer discharge	200~560
肥箱总容量/kg Total fertilizer tank capacity	36



A: 轴测图 Axonometric drawing; B: 剖面结构图 Section drawing; 1. 分气管 Gas distribution pipe; 2. 混肥管 Fertilizer mixing pipe; 3. 齿轮肥箱 Gear fertilizer box; 4. 传动齿轮 Transmission gear; 5. 螺旋传动轴 Spiral drive shaft; 6. 螺旋肥箱 Spiral fertilizer box; 7. 螺旋排肥器 Spiral fertilizer apparatus; 8. 轴承座 Bearing seat; 9. 传动带轮 Transmission pulley; 10. 双齿轮排肥器 Double-gear fertilizer apparatus.

图 2 两级排肥器结构简图

Fig.2 Structure sketch of two-stage fertilizer apparatus

如图 3 所示的阴影区中,然后由驱动电机带动传动齿轮转动,双齿轮排肥器开始同向转动,颗粒肥料由两轮齿间的空隙连续排出。由齿轮传动原理可知,双齿轮排肥器的排肥过程连续且均匀,在低转速的条件下可减少排肥断条现象,提高风送式水稻侧深施肥装置的排肥性能。

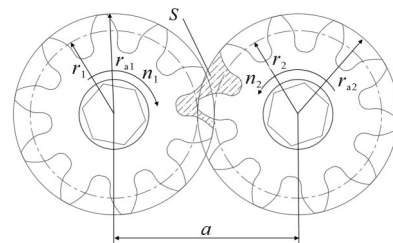


图 3 双齿轮排肥器的结构示意图

Fig.3 Structure sketch of double-gear fertilizer apparatus

影响双齿轮排肥器施肥量的关键参数有齿数、转速、模数、压力角、齿顶高系数、齿轮宽度以及两齿轮之间的间隙。双齿轮排肥器的齿轮齿数参照文献[14]中关于外槽轮式排肥器轮齿数量,确定双齿轮排肥器轮齿数量 $z=10$,双齿轮排肥器标准压力角 $\alpha=20^\circ$,初步选定双齿轮排肥器的分度圆直径 $d=60$ mm,因此,确定双齿轮排肥器的模数 $m=6$,选定齿顶高系数 $h_a^*=1$,齿轮的宽度 $l=50$ mm。

由文献[10]可知,双齿轮排肥器两齿轮间的间隙在5 mm时,颗粒肥料分布较为均匀、排肥性能更好。由于长江中下游地区目标施肥量为200~560 kg/hm²,将齿轮模数、压力角、分度圆半径、两齿轮间的间隙等参数代入双齿轮排肥器的排肥量计算公式^[10],可得双齿轮排肥器理论转速为23.42~44.8 r/min。

2)螺旋排肥器参数确定。螺旋排肥器结构示意图如图4所示,其施肥过程可以分为3个阶段,第1阶段为颗粒肥料只受重力和螺旋轴作用的充肥过程;第2阶段为驱动电机带动螺旋轴将颗粒肥料输送到下一个螺距,直到将颗粒肥料排出的输送过程;第3阶段为颗粒肥料由排肥器排出后,做自由落体运动的排肥过程。

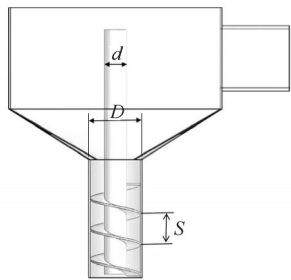


图4 螺旋排肥器结构示意图

Fig.4 Structure sketch of the spiral fertilizer apparatus

从螺旋排肥器的工作过程分析可以发现,影响螺旋排肥器的施肥性能的参数主要有直径、转速和螺距^[15]。根据长江中下游水稻目标施肥量为200~560 kg/hm²进行理论分析计算,得到螺旋轴螺距、转速和直径的值。

①螺旋轴直径。根据颗粒肥料的物料特性、长江中下游地区农艺要求以及机具前进速度设计螺旋轴直径。插秧机的工作宽幅为1 800 mm,插秧行距300 mm,设计适用于6行施肥作业的风送式水稻侧深施肥机。结合长江中下游地区的农艺要求设定排肥量为13.33~37.33 kg/667 m²,插秧机的工作效率为0.6 hm²/h,则目标施肥效率 Q 为117~333 kg/h,

螺旋轴直径的计算式为:

$$D = K \times \sqrt[2.5]{\frac{Q}{\phi\gamma C}} \quad (1)$$

式(1)中: K 为肥料颗粒特性系数, $K=0.063 2$; γ 为肥料颗粒密度, $\gamma=1.344$ g/cm³; ϕ 为肥料颗粒填充系数, $\phi=0.9$; C 为螺旋倾角系数, $C=0.46$ 。

将以上数据代入式(1)计算可得, $D=16.62\sim 25.09$ mm,取整后螺旋轴直径调整为17~26 mm。

②螺旋轴螺距。螺旋排肥器螺距是影响施肥机排肥量的关键参数,对于施肥机的排肥性能有重要影响。在排肥量和螺旋轴直径已知的情况下,螺距太大将会阻滞颗粒肥料,导致颗粒肥料输送较慢;反之,颗粒肥料移运较快。可由式(2)计算螺旋排肥器螺距。

$$P = K_1 D \quad (2)$$

式(2)中: K_1 为肥料颗粒流动特性系数,当螺旋轴水平设计时 K_1 的取值范围为0.8~1.0,倾斜设计时 $K_1 \leq 0.8$ 。 P 为螺旋轴螺距,mm; D 为螺旋轴直径,mm。

本研究设计的螺旋排肥器为垂直水平面,因此理论上 K_1 的取值要小于0.8,但考虑到施肥机进行水田作业时物料的流动性差,本研究以 $K_1=0.8$ 进行计算。因此,螺旋轴螺距的取值范围为13.6~20.8 mm,取整后为14~20 mm。

③螺旋轴转速。螺旋排肥器转速是影响施肥机排肥性能的关键参数,提高螺旋轴的转速,螺旋排肥器输送肥料效率增高,施肥机排肥量增加,同时肥料颗粒受离心力增大将会导致肥料填充系数减小;随着转速减小,螺旋排肥器的排肥量降低,达不到地区目标排肥量,因此需要合理的转速保证螺旋排肥器施肥稳定性。根据颗粒肥料的重力和向心力之间的关系,螺旋排肥器的最大转速计算公式为:

$$\begin{cases} m\omega^2 R \leq mg \\ \omega = \frac{2\pi n_{\max}}{60} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: m 是颗粒肥料质量, g ; R 是螺旋排肥轴半径,mm; n_{\max} 是螺旋排肥器最大转速,r/min; ω 是螺旋排肥器角速度,rad/s。

将式(3)化简调整后可得:

$$n \leq n_{\max} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{30K_0}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (0 < K_0 \leq 1) \quad (4)$$

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

$$n \leq n_{\max} = \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (5)$$

式(4)~(5)中： A 是物料综合特性系数， $A=28$ 。 D 为螺旋排肥轴直径，mm； n_{max} 为螺旋排肥器最大转速，r/min； n 是螺旋排肥器实际转速，r/min。将螺旋排肥轴直径 $D=17\sim 26$ mm代入式(5)中，可得螺旋排肥轴的最大转速为214.75 r/min。

前文已经得到排肥轴最大转速，为获得排肥轴最低转速，采用式(6)进行计算，并结合长江中下游地区的目标排肥量，计算螺旋排肥器的最低转速。

$$n = \frac{Q}{15\pi\gamma\phi SC \left[(D+2\lambda)^2 - d^2 \right]} \quad (6)$$

式(6)中： D 为螺旋排肥轴外径，mm； d 为螺旋排肥轴内径，mm； n 为螺旋排肥轴实际转速，r/min； P 为螺旋排肥轴螺距，mm； λ 为螺旋轴外径与护肥管间隙，mm； ϕ 为肥料颗粒填充系数； γ 为肥料颗粒密度，g/cm³； C 为螺旋轴倾斜系数。将长江中下游目标排肥量200~560 kg/hm²代入式(6)中，可得螺旋排肥器的最低转速为106.32 r/min。综上，螺旋排肥器的转速范围为106.32~214.75 r/min，取整后范围为110~210 r/min。

1.3 两级排肥器仿真试验

1)物料特性参数测量。颗粒肥料物理参数对于施肥机关键部件的设计有重要影响，为后期离散元仿真试验中的颗粒肥料模型的建立提供参考依据。本研究用史丹利公司生产的复合肥作为样本材料，如图5所示，采用直接测量法去获取颗粒肥料的长、宽、厚、质量、体积，得到上述参数后，颗粒肥料的球形度 ϕ 、等效直径 S_ϕ 和密度 ρ ，可以由公式(7)~(9)计算得到。

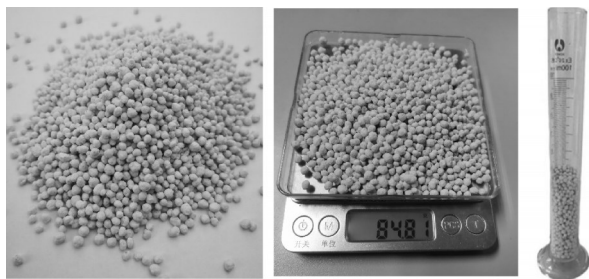


图5 测量颗粒肥料的尺寸、质量和体积
Fig.5 Measurement of the size, mass, and volume of granular fertilizers

$$S_\phi = \frac{\phi}{L} \quad (7)$$

$$\phi = \sqrt[3]{LWT} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (9)$$

式(7)~(9)中： ϕ 是颗粒肥料的等效直径，mm； W 是颗粒肥料宽，mm； L 是颗粒肥料长，mm； S_ϕ 是颗

粒肥料的球形度； T 是颗粒肥料厚，mm； m 是颗粒肥料的质量，g； ρ 是颗粒肥料的密度，g/cm³； v 是颗粒肥料的体积，cm³。由试验结果可得，颗粒肥料的球形度为0.95、等效直径2.7 mm、实际密度为1.344 g/cm³。

2)仿真参数设定。选取的史丹利化肥的等效直径为2.71 mm，因此，颗粒肥料的仿真模型设置为直径为2.71 mm的球体，肥料颗粒生成速度为20 000粒/s，颗粒垂直下落的初始速度为1.5 m/s，两级排肥仿真试验总时间为10 s，单级螺旋排肥需要重复3次计算变异系数，故设为30 s，仿真试验的步长为1.0×10⁻⁶ s，每隔0.01 s记录仿真数据，接触模型为Hertz-Mindlin无滑动接触模型，以及输肥管的材料采用的是ABS树脂，排肥轮和肥箱等机身的材料采用的是304不锈钢，参考文献[16-17]设定排肥器与肥料参数，如表2所示。

表2 颗粒肥料与双齿轮排肥器仿真参数

Table 2 Simulation parameters of the granular fertilizer and double-gear fertilizer apparatus

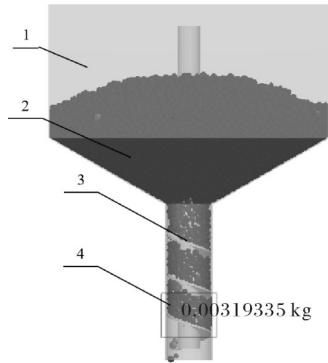
参数 Parameters	肥料 Fertilizer	排肥轮与肥箱 Fertilizer wheel and box	输肥管 Fertilizer delivery pipe
剪切模量/Pa Shear modulus	1×10 ⁷	7×10 ¹⁰	1.3×10 ⁹
泊松比 Poisson's ratio	0.233	0.300	0.430
密度/(kg/m ³) Density	1 344	7 800	1 135
碰撞恢复系数(与颗粒) Coefficient of restitution	0.480	0.414	0.481
静摩擦因素(与颗粒) Coefficient of static friction	0.352	0.493	0.457
滚动摩擦因素(与颗粒) Coefficient of rolling friction	0.189	0.100	0.200

3)螺旋轴关键参数性能仿真试验。以排肥稳定性变异系数(公式(10))为评价指标，以直径、转速和螺距为试验因素进行仿真试验。建立螺旋排肥器仿真模型，其接触参数如表2所示，在排肥口处添加流量监测器测量排肥质量用于计算排肥变异系数，最终建立仿真模型如图6所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{Q} &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M Q_j \\ S &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M (Q_j - \bar{Q})^2}{M-1}} \\ V &= \frac{S}{\bar{Q}} \times 100\% \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式(10)中： V 为排肥稳定性变异系数，下文简称

变异系数; M 为试验次数,本研究为3次; \bar{Q} 为 M 次试验排肥量的平均值, g ; S 为排肥量标准差; Q_j 为单次试验的排肥量, g 。



1. 肥箱 Fertilizer box; 2. 颗粒肥料 Fertilizer; 3. 排肥螺旋轴 Fertilizer screw shaft; 4. 流量监测器 Flow detector.

图6 螺旋排肥器仿真模型

Fig.6 Simulation model of the spiral fertilizer apparatus

螺旋轴直径性能仿真试验时,将螺旋轴的转速设定为取值范围的中间值 160 r/min,螺距设定为取值范围的中间值 18 mm,取直径范围中 18、20、22、24、26 mm 共 5 个直径点,设定螺旋轴的转速和螺距后进行 5 组仿真试验,每组试验重复 3 次,以排肥稳定性变异系数为评价指标,提取流量监测传感器单次试验总排肥量 Q_j 。

4)螺旋轴关键参数组合仿真试验。为获得螺旋排肥轴最优的组合参数,以排肥稳定性变异系数(公式(10))为评价指标,选取螺旋排肥器的直径、螺距和转速进行三因素三水平 Box-Behnken 仿真试验,其取值范围同单因素试验设定值如表 3 所示。

表3 试验因素表

Table 3 Table of test factors

编码 Code	直径 x_1 /mm Diameter	转速 x_2 /(r/min) Rotational speed	螺距 x_3 /mm Pitch
-1	18	110	14
0	22	160	17
1	26	210	20

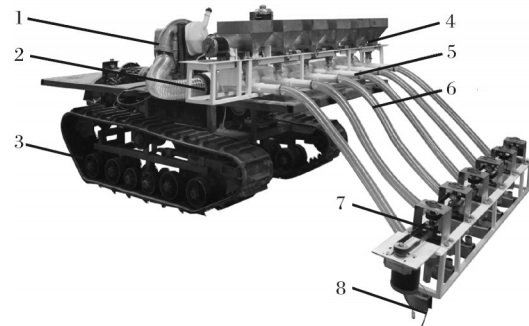
1.4 样机试验

1)试验材料与装置。选用史丹利公司生产的复合肥为试验材料,施肥行数为 6 行(图 7)。

2)试验评价指标。试验按照 NY/T 1003—2006 《施肥机械质量评价技术规范》进行,以排肥一致性变异系数、排肥稳定性变异系数、排肥均匀性变异系数为评价指标。排肥一致性变异系数计算公式为:

$$\left\{ \begin{aligned} Q_i &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M Q_{i,j} \\ \bar{Q}_i &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \\ S &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2}{k-1}} \\ V &= \frac{S}{\bar{Q}_i} \times 100\% \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式(11)中: M 为试验次数,本研究为 3 次; $Q_{i,j}$ 为第 j 次第 i 行试验排肥量的值, g ; N 为施肥机工作行数,本研究为 6 行; Q_i 为 n 次试验第 i 行排肥量的平均值, g ; S 为 N 行排肥量的标准差; \bar{Q}_i 为 N 行排肥量的平均值, g ; V 为排肥一致性变异系数, %。



1. 汽油吹风机 Gasoline blower; 2. 分风管 Air distribution pipe; 3. 双电机履带式动力底盘 Dual motor crawler power chassis; 4. 双齿轮排肥器 Double-gear fertilizer apparatus; 5. 混肥管 Fertilizer mixing pipe; 6. 输肥管 Fertilizer delivery pipe; 7. 螺旋排肥器 Spiral fertilizer apparatus; 8. 开沟器 Furrow opener.

图7 试验样机示意图

Fig.7 Test prototype

排肥稳定性变异系数同排肥一致性变异系数,计算公式为:

$$\left\{ \begin{aligned} Q_i &= \sum_{j=1}^N Q_{i,j} \\ \bar{Q}_i &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Q_i \\ S &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (Q_i - \bar{Q}_i)^2}{M-1}} \\ V &= \frac{S}{\bar{Q}_i} \times 100\% \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式(12)中: M 为试验次数,本研究为 3 次; S 为排肥量的标准差; $Q_{i,j}$ 为第 i 次第 j 行试验测量排肥量的值, g ; \bar{Q}_i 为 n 次试验测量排肥量的平均值, g ; Q_i 为 N 行第 i 次试验测量排肥量值的和, g ; N 为施肥机工作行数,本研究为 6 行; V 为排肥稳定性变异系数, %。

排肥均匀性变异系数计算公式为：

$$\begin{cases} Q_{j,k} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Q_{i,j,k} \\ Q_k = \sum_{j=1}^N Q_{j,k} \\ \bar{Q}_k = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L Q_k \\ S = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^L (Q_k - \bar{Q}_k)^2}{L - 1}} \\ V = \frac{S}{\bar{Q}_k} \times 100\% \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中： M 为试验次数，本研究为3次； Q_k 为第1段 N 行排肥量平均值的和， g ； L 为每行肥料的段数，本研究将每行肥料分为5段； $Q_{j,k}$ 为第 j 行第 k 段 n 次试验测量排肥量的平均值， g ； $Q_{i,j,k}$ 为第 i 次试验第 j 行第 k 段测量排肥量的值， g ； N 为施肥机工作行数，本研究为6行； S 为排肥量标准差； \bar{Q}_k 为 N 行 L 段排肥量的平均值， g ； V 为排肥均匀性变异系数， $\%$ 。

3) 试验方法。进行排肥一致性、排肥稳定性对比试验时，为保证排肥器所排出肥料被全部收入，将集肥袋固定安装在排肥口，沿从左到右的方向依次给集肥袋标记1~6号(图8)。由于螺旋轴是靠同步带轮带动的，存在转速差，无法达到理论条件下的转速，因此，选择螺旋轴转速范围为100~180 r/min，以20 r/min为转速增量，进行两级排肥器试验时，双齿轮排肥器的转速按1:4设置。测试过程中，首先将汽油吹风机启动，当汽油吹风机工作一段时间后再启动驱动电机，同时开始计时，每组试验重复3次，试验总时长为30 s。

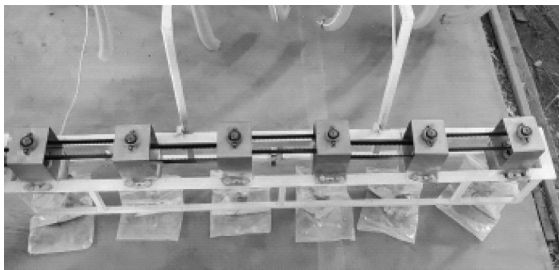


图8 排肥一致性及稳定性试验

Fig.8 Fertilizer discharge consistency and fertilizer discharge stability test

排肥均匀性为施肥装置排出肥料在一定长度内的分布情况，为准确统计施肥机的排肥均匀性，驱动双电机履带式动力底盘向前直线行驶至少20 m(图9)。根据NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》，以相当于正常作业速度驱动机具平稳行驶

通过测区并排肥即可，本研究所用底盘最大作业速度1.6 m/s，考虑到行走轮滑转等问题，试验时取机具前进速度1.2 m/s。本次试验向前行驶22 m，并选取其中15 m肥料均匀段落作为样本，将其均匀分为5段，每3 m为1段，收集每部分的颗粒肥料，并进行编号称质量。



图9 排肥均匀性试验

Fig.9 Fertilizer discharge uniformity test

2 结果与分析

2.1 螺旋排肥器的排肥性能仿真分析

1) 螺旋轴关键参数性能仿真试验结果。如表4所示，排肥稳定性变异系数随着直径增加而增大，当螺旋轴直径为26 mm时，排肥稳定性变异系数达到最大值，说明此时排肥稳定性最差。其原因可能是随着螺旋轴直径的增大，螺旋槽中的颗粒肥料逐渐增多，使颗粒肥料之间、颗粒肥料与护肥管壁之间的碰撞逐渐增多，导致排肥稳定性降低。

表4 螺旋轴直径对排肥性能的影响

Table 4 Effect of spiral shaft diameter on performance of fertilizer discharge

直径D/mm Diameter	单次试验总排肥量 Q_j/g Total fertilizer discharge			变异系数 $V/\%$ Coefficient
	0~10 s	10~20 s	20~30 s	
18	73.01	74.98	71.14	2.63
20	74.05	77.72	73.14	3.23
22	80.67	80.27	76.20	3.68
24	86.66	79.16	80.65	4.83
26	89.86	88.33	82.08	5.68

螺旋轴螺距的性能仿真试验时，将螺旋轴的转速设定为取值范围的中间值160 r/min，直径设定为取值范围的中间值22 mm，螺旋轴的螺距取值分别为14、16、18、20 mm 4个螺距节点，设定螺旋轴的转速和直径后进行4组仿真试验，每组试验重复3次，以排肥稳定性变异系数为评价指标，提取流量监测传感器单次试验总排肥量 Q_j 。由表5可知，排肥稳定性变异系数随着螺距增加而增大，当螺旋排肥器的

螺距为 20 mm 时,达到最大值,说明此时排肥稳定性最差。可能是因为螺旋排肥器的螺距增大,导致肥料填充系数减小,进而排肥稳定性降低。

表5 螺旋轴螺距对排肥性能的影响

Table 5 Influence of spiral shaft pitch on performance of fertilizer discharge

螺距 P/mm Pitch	单次试验总排肥量 Q_j/g Total fertilizer discharge			变异系数 $V/\%$ Coefficient
	0~10 s	10~20 s	20~30 s	
14	70.33	70.83	74.83	3.42
16	78.32	73.78	80.74	4.55
18	84.70	84.42	77.15	5.22
20	99.27	98.27	86.15	7.72

螺旋轴转速性能仿真试验时,将螺旋轴的直径设定为取值范围的中间值 22 mm,螺距设定为取值范围的中间值 18 mm,螺旋排肥器的转速取 6 个转速节点值,分别为 110、130、150、170、190、210 r/min,设定螺旋轴的直径和螺距后进行 6 组仿真试验,每组试验重复 3 次,以排肥稳定性变异系数为评价指标,提取流量监测传感器单次试验总排肥量 Q_j 。

如表 6 所示,当螺旋轴转速为 170 r/min 时,排肥稳定性变异系数最小,此时螺旋排肥器的排肥稳定性最好。排肥稳定性变异系数随着螺旋轴转速增加而先减小再增大,其原因是螺旋轴转速太小,颗粒肥料受螺旋面和护肥管内壁的支撑力、摩擦力以及向心力等力的交互作用力较小,导致螺旋对颗粒肥料的推力减小,颗粒肥料无法及时进入下一段螺距,因而排肥稳定性较差。相反,螺旋轴转速太大,颗粒肥料受螺旋面和护肥管内壁的支撑力、摩擦力以及向心力等力的交互作用力较大,颗粒肥料在螺旋槽内的运动加剧,导致排肥稳定性变差。

表6 螺旋轴转速对排肥性能的影响

Table 6 Effect of spiral shaft speed on the fertilizer discharge performance

转速 $n/(\text{r}/\text{min})$ Rotational speed	单次试验总排肥量 Q_j/g Total fertilizer discharge			变异系数 $V/\%$ Coefficient
	0~10 s	10~20 s	20~30 s	
110	71.18	74.33	81.76	7.17
130	75.23	75.64	83.94	6.28
150	85.64	84.74	77.18	5.63
170	79.73	86.31	80.95	4.25
190	83.87	82.65	91.01	5.26
210	98.27	98.33	86.18	7.42

2)螺旋轴关键参数组合仿真试验结果。为获得螺旋排肥器的最佳组合参数,将表 7 的仿真结果导入

Design-Expert 13 中,进行响应面分析,得到稳定性变异系数方差分析表(表 8)。

表7 螺旋轴关键参数组合试验方案与结果

Table 7 Protocol and results of key parameter combination of spiral shaft experiment

试验号 Test number	直径 x_1/mm Diameter	转速 $x_2/(\text{r}/\text{min})$ Rotational speed	螺距 x_3/mm Pitch	变异系数 $V/\%$ Coefficient
1	22	160	17	2.8
2	18	210	17	7.5
3	22	210	20	6.3
4	26	160	20	7.3
5	18	110	17	3.5
6	22	160	17	2.6
7	22	160	17	2.9
8	22	160	17	2.8
9	22	110	14	3.6
10	26	160	14	5.7
11	18	160	20	5.9
12	22	160	17	3.1
13	18	160	14	5.4
14	22	210	14	3.7
15	22	110	20	3.2
16	26	210	17	7.0
17	26	110	17	7.7

由方差结果(表 8)可知,模型失拟差 $P>0.05$,失拟项不显著;模型 $P<0.01$,回归模型极显著,没有其他主要因素影响结果,同时回归方程决定系数 $R^2=0.989$,说明回归方程拟合程度较高。三因素对变异系数影响大小的顺序为螺旋排肥轴转速、直径和螺距,其中螺旋轴直径、转速、螺距、螺旋排肥轴直径与转速的交互作用和螺旋排肥轴螺距与转速的交互作用对排肥稳定性极显著,剔除不显著项 AC 得到各因素与排肥稳定性变异系数之间的回归方程为:

$$y = 2.84 + 0.675x_1 + 0.813x_2 + 0.538x_3 - 1.18x_1x_2 + 0.75x_2x_3 + 2.73x_1^2 + 0.855x_2^2 + 0.505x_3^2 \quad (14)$$

任意两因素作用下对稳定性变异系数的影响如图 10 所示,当螺旋轴转速为 160 r/min 时,排肥稳定性变异系数随螺距增加而增大,随直径增加先减小再增大;当螺旋轴螺距为 17 mm 时,排肥稳定性变异系数随直径增加而增大,随转速增加先减小再增大;当螺旋轴直径为 22 mm 时,排肥稳定性变异系数随螺距增加而增大,随着转速的增加先减小再增大。

利用 Design-Expert 优化模块,根据仿真试验结果,以排肥稳定性变异系数最小为优化目标,预测螺

表8 稳定性变异系数方差分析

Table 8 Variance analysis of coefficient of stability variation

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value
x_1	3.65	1	3.65	31.12	0.000 5
x_2	5.28	1	5.28	45.09	0.000 2
x_3	2.31	1	2.31	19.73	0.002 2
x_1x_2	5.52	1	5.52	47.15	0.000 1
x_1x_3	0.302 5	1	0.302 5	3.34	0.110 5
x_2x_3	2.25	1	2.25	19.21	0.002 3
x_1^2	31.38	1	31.38	267.92	<0.000 1
x_2^2	3.08	1	3.08	26.28	0.000 9
x_3^2	1.07	1	1.07	9.17	0.016 4
模型 Model	56.70	8	7.09	60.51	<0.000 1
残差 Residuals	0.937 0	8	0.117 1		
失拟差 Misfit	0.805 0	4	0.201 2	6.10	0.053 9
纯误差 Pure error	0.132 0	4	0.033 0		
总和 Total	57.64	16			

注： $P < 0.01$ ，极显著， $P < 0.05$ ，显著。Note： $P < 0.01$ represents highly significant, $P < 0.05$ represents significant.

旋轴参数的最优组合为螺旋轴直径 21.292 mm, 转速为 134.07 r/min, 螺距为 16.437 mm, 此时排肥稳定变异系数为 2.5%。实际取值为螺旋轴直径为 21 mm, 转速为 140 r/min, 螺距为 17 mm。

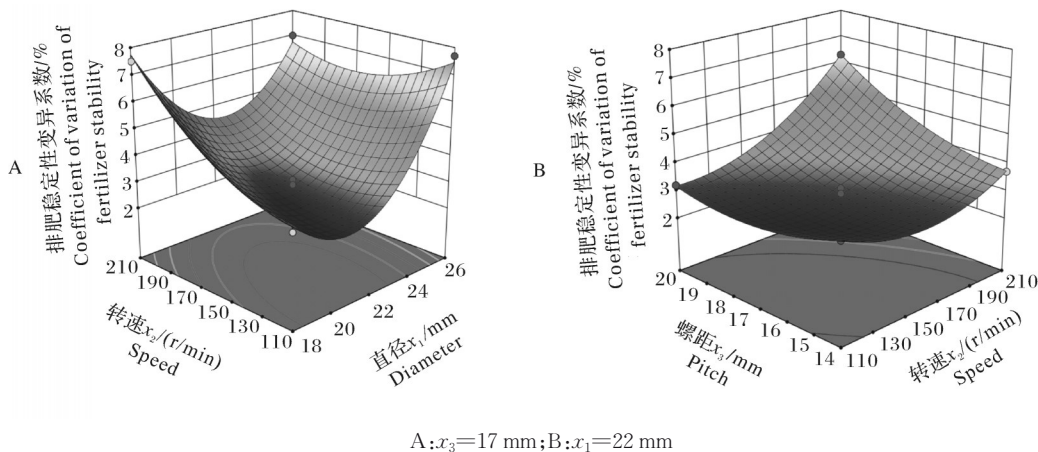


图10 两因素交互作用下对排肥性能的影响

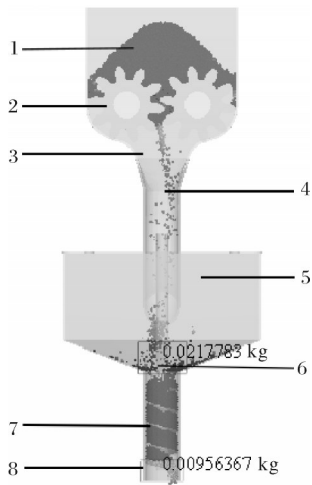
Fig.10 Effect of interaction of two factors on fertilizer discharge performance

2.2 两级排肥器的最佳传动比

风送式水稻侧深施肥机采用两级排肥器, 双齿轮排肥器和螺旋排肥器的排肥量由各自的转速控制, 为避免在第二级排肥器处出现肥料堆积、断条、以及螺旋槽填充不满等现象, 需要设定两级排肥器转速为一定比例, 使双齿轮排肥器和螺旋排肥器的排肥量相等, 确保施肥机能够正常工作。在 EDEM 建立其仿真模型如图 11 所示, 参数设定同前文。通过对双齿轮排肥器和螺旋排肥器进行理论计算和仿真分析, 可得双齿轮排肥器的转速范围为 23.42~44.8 r/min, 螺旋排肥器的转速范围为 Box-Behnken

试验最优转速 140 r/min。仿真试验时, 取齿轮转速范围中 25、30、35、40、45 r/min 共 5 个转速节点, 螺旋轴转速为 140 r/min, 因此组成双齿轮排肥器与螺旋排肥器的传动比共有 5 组, 分别为 1:5.6、1:4.7、1:4、1:3.5、1:3.1, 设定其他参数后分别进行离散元仿真试验, 利用 EDEM 软件中的流量检测器记录排出的肥料质量, 仿真试验结束后对不同传动比下的瞬时排肥效果、排肥质量进行分析, 以此确定最佳传动比。

图 12 为不同传动比下的排肥效果, 如图 12A 所示, 当传动比较小时, 双齿轮排肥器排出的下一段肥

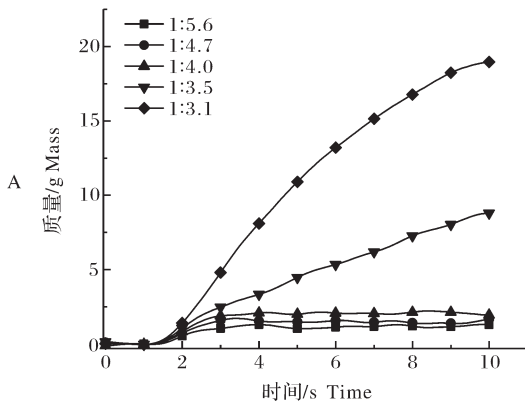


1. 颗粒肥料 Fertilizer; 2. 双齿轮排肥器 Double gear-fertilizer apparatus; 3. 齿轮器肥箱 Gear ware fertilizer box; 4. 输肥管 Fertilizer delivery pipe; 5. 螺旋肥箱 Spiral fertilizer box; 6. 流量监测 1 Flow detector; 7. 螺旋排肥器 Spiral fertilizer apparatus; 8. 流量监测器 2 Flow monitor 2.

图 11 传动比仿真试验模型

Fig.11 Simulation model used for optimization of transmission ratio

料还未到达螺旋肥料箱中,螺旋排肥器已经将上一段肥料完全排出,因此在螺旋排肥器处会出现断条,螺旋槽填充不满等现象,此时传动比为 1:5.6;如图 12B 所示,当传动比适中时,排肥稳定且均匀,此时传动比为 1:4;当传动比较大时,螺旋排肥器的排肥速



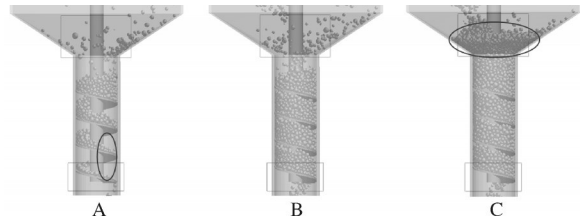
A: 肥料堆积情况 Fertilizer accumulation situation; B: 总排肥质量 Total fertilizer discharge mass.

图 13 不同传动比肥料堆积量及总排肥质量

Fig.13 Fertilizer accumulation situation and total fertilizer discharge mass at different transmission ratios

根据螺旋排肥器流量监测器 2 处监测数据,绘制出不同传动比各时刻总排肥质量如图 13B 所示,当传动比为 1:5.6 时,肥料质量明显小于其他传动比排出的肥量,说明传动比较小,出现了肥料断条、螺旋槽填充不满等现象;当传动比为 1:3.5 和 1:3.1 时,排

率相对双齿轮排肥器较慢,不能及时排出由双齿轮排肥器排出的肥料,在螺旋排肥器的肥料箱中会出现肥料堆积现象,影响施肥效率,如图 12C 所示,此时传动比为 1:3.1。

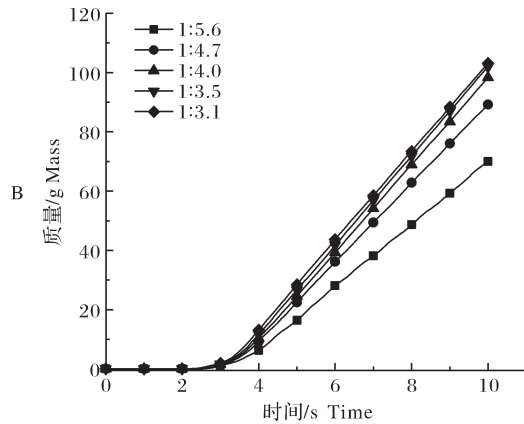


A: 断条 Fertilizer break strips; B: 正常 Normal fertilizer discharging; C: 堆积 Fertilizer composting.

图 12 不同传动比下的排肥效果

Fig.12 Fertilizer discharge situation at different transmission ratios

根据螺旋排肥器流量监测器 1 处监测数据,绘制肥料堆积质量曲线,如图 13A 所示,当传动比较小时,螺旋排肥器处的肥料质量在 0~2 g 波动,说明螺旋轴转速过快,双齿轮排肥器排出的肥料被及时排出,此时双齿轮排肥器还未排出下一段肥料,容易出现肥料断条现象;当传动比较大时,肥料质量曲线呈现渐增趋势,是因为双齿轮排肥器排出的质量大于螺旋排肥器排出的质量,在检测处的质量是累加的,说明在二级排肥器处出现了肥料堆积现象。当传动比合适时,螺旋排肥器处的肥料在 1~3 g 波动,说明两级排肥器正常工作,排肥连续且均匀。



肥质量相近,说明此时在螺旋排肥器处产生了肥料堆积现象。不同传动比的排肥质量与时间近似于线性关系,为方便分析不同传动比的排肥效果,采用 Origin 根据各传动比下排肥量随时间变化规律进行线性拟合分析,拟合函数如表 9 所示。

表 9 不同传动比线性拟合结果
Table 9 Linear fitting results at different transmission ratios

传动比 Drive ratio	函数 Function	相关系数 R^2 Correlation coefficient
1:5.6	$y = -28.668 + 9.633x$	0.985
1:4.7	$y = -35.930 + 12.267x$	0.988
1:4.0	$y = -39.486 + 13.476x$	0.987
1:3.5	$y = -40.322 + 13.963x$	0.989
1:3.1	$y = -39.785 + 14.1x$	0.992

由表 9 可知,随着传动比增大,拟合函数的 R^2 增大,说明传动比越大排肥效果越好。由前文分析可知,当传动比大于 1:4 时,在螺旋肥料箱处有堆积现象,因此为避免在螺旋排肥器处出现肥料堆积现象,施肥机的传动比应小于 1:4;传动比小于 1:4 时,流量检测器 2 检测到在螺旋排肥器排肥口有肥料断条和肥料填充不足的现象。因此,为提高施肥机的排肥性能,两级排肥器的传动比为 1:4,此时 $R^2=0.987$,说明拟合程度较好,排肥性能好。

2.3 样机试验结果

样机试验结果如图 14 所示,从图 14A 可以看出,施肥装置中的螺旋排肥器、两级排肥器的排肥一致性、稳定性变异系数都是随转速的增加先减少再增加,相比于螺旋排肥器,两级排肥器的排肥一致性变异系数、稳定性变异系数分别提高 2.79、1.53 百分点。由排肥均匀性试验结果图 14B 可知,螺旋排肥器每段排肥量的平均值变化范围为 216.18~429.66 g,两级排肥器每段排肥量的平均值变化范围为 232.66~462.66 g,其中两级排肥器的排肥量略高于螺旋排肥器,其原因可能是由于加工和安装误差,导致双齿轮排肥器的实际排肥量大于理论排肥量,第 3 行的排肥量与平均值相差最大,可能是因为同步带传动不稳,导致排肥量发生变化。当螺旋轴转速为 100 r/min 时,螺旋排肥器排肥均匀性变异系数最大为 28.00%;两级排肥器排肥均匀性变异系数最大为 23.54%,相比螺旋排肥器提高了 4.46 百分点。在所设置的目标转速内,两级排肥器的各项指标均比螺旋排肥器好,说明两级排肥器的排肥性能优于螺旋排肥器,并且以上评价指标均满足 NY/T1003—2006 要求。

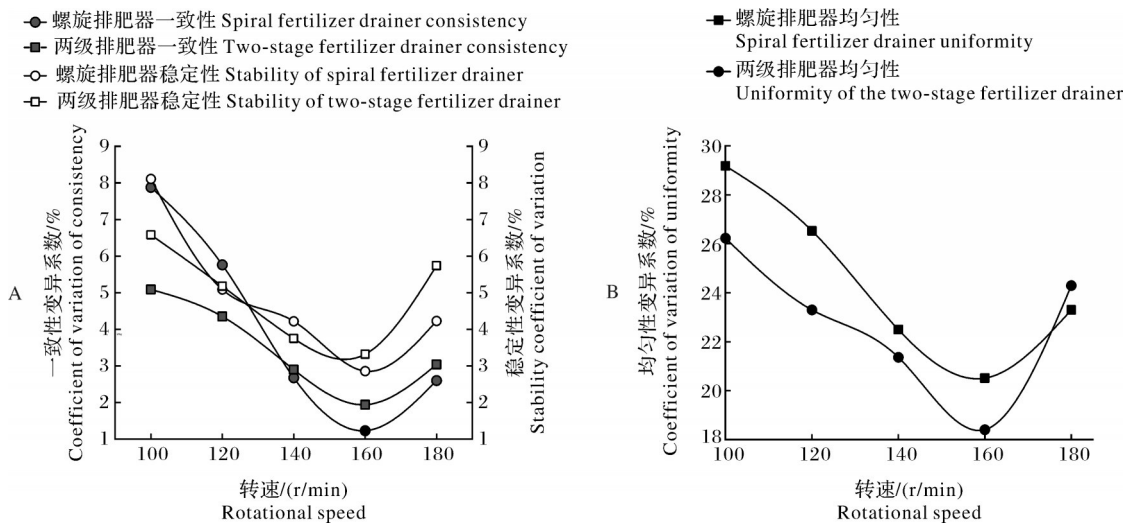


图 14 样机静态(A)及动态(B)试验结果

Fig.14 Static(A) and dynamic(B) test results of the prototype

3 讨论

针对水稻侧深施肥机械化需求,以提高施肥机排肥均匀性、连续性以及降低肥料堵塞现象为目的,采用理论计算、仿真分析、样机试验相结合的方法,研制了一种可与插秧机配合使用的风送式水稻侧深施肥装置,并分析研究施肥机结构参数对排肥性能的影响规律。根据螺旋排肥器排肥理论分析,发现

螺旋排肥器的直径、螺距和转速对排肥器的排肥性能有重要影响,并通过理论计算得到螺旋轴的直径范围为 17~26 mm、螺距范围为 14~20 mm、转速范围为 110~210 r/min。离散元排肥性能仿真试验表明:排肥稳定性变异系数随螺距和直径逐渐增加而增大,随转速逐渐增加而先减小再增大;螺旋轴最佳参数组合为螺旋轴直径为 21 mm,转速为 140 r/min,螺距为 17 mm,此时排肥稳定系数为 2.5%,满足稳定

性设计要求。当传动比大于1:4时,在螺旋肥料箱处有堆积现象;传动比小于1:4时,存在肥料断条和肥料填充不足的现象。双齿轮排肥器和螺旋排肥器的传动比为1:4时,排肥连续且均匀。

样机试验表明:螺旋排肥器排肥一致性变异系数、排肥稳定性变异系数、排肥均匀性变异系数范围分别为7.88%~1.23%、8.11%~2.86%、28.00%~17.42%;两级排肥器变异系数范围分别为5.09%~1.94%、6.58%~3.32%、23.54%~15.81%。两级排肥器的排肥均匀性、排肥一致性、排肥稳定性变异系数的最大值均小于螺旋排肥器,且都小于《施肥机械质量评价技术规范》中的规定值,由两级排肥器组成的风送式水稻侧深施肥装置性能更好。

本研究分析了排肥器结构参数对排肥效果的影响,但未开展实时施肥调控装置设计,为更好地满足精准施肥作业的要求,后续将进一步研究施肥量实时监测调控系统。

参考文献 References

- [1] 李忠芳,张水清,李慧,等.长期施肥下我国水稻土基础地力变化趋势[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1394-1402. LI Z F, ZHANG S Q, LI H, et al. Trends of basic soil productivity in paddy soil under long-term fertilization in China [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2015, 21(6): 1394-1402 (in Chinese with English abstract).
- [2] 刘钦普.中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J].农业工程学报,2017,33(6):214-221. LIU Q P. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 214-221 (in Chinese with English abstract).
- [3] 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 C H, XU C L, BI C H, 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 with English abstract).
- [4] 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 X Y, ZHOU Z Y, YANG C, 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 with English abstract).
- [5] 翟建波,夏俊芳,周俊华,等.气力式水稻芽种精量旱直播机的设计与试验[J].华中农业大学学报,2017,36(1):110-116. ZHAI J B, XIA J F, ZHOU J H, et al. Design and field trials of pneumatic precision drilling planter of rice budded seed in dry land [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(1): 110-116 (in Chinese with English abstract).
- [6] 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].农业机械学报,2018,49(6):92-104. WANG J F, GAO G B, WENG W X, et al. Design and experiment of key components of side deep fertilization device for paddy field [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(6): 92-104 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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 X L, LI M L, ZHANG L H, 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 with English abstract).
- [8] 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 G J, JIAN S C, CUI R J, 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 with English abstract).
- [9] 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].农业机械学报,2020,51(S1):165-174. LIU C L, ZHANG F Y, DU X, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(S1): 165-174 (in Chinese with English abstract).
- [10] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等.双齿轮式排肥器设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(3):87-96. DUN G Q, YU C L, GUO Y L, et al. Design and experiment of double-gear type fertilizer apparatus [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(3): 87-96 (in Chinese with English abstract).
- [11] 顿国强,李鑫,纪欣鑫,等.同向双螺旋排肥器优化设计与试验[J].华中农业大学学报,2024,43(5):278-287. DUN G Q, LI X, JI X X, et al. Optimization and experiment of co-rotating and double-spiral fertilizer feeder [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(5): 278-287 (in Chinese with English abstract).
- [12] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等.倾斜梯形孔式穴施肥排肥器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):43-53. DU X, LIU C L, JIANG M, et al. Design and experiment of inclined trapezoidal hole fertilizer point-applied discharging device [J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(9): 43-53 (in Chinese with English abstract).
- [13] 宋灿灿,周志艳,王国宾,等.施肥无人机槽轮式排肥器槽轮结构参数优选[J].农业工程学报,2021,37(22):1-10. SONG C C, ZHOU Z Y, WANG G B, et al. Optimization of the groove wheel structural parameters of UAV-based fertilizer apparatus [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(22): 1-10

- (in Chinese with English abstract).
- [14] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007. China Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Handbook of agricultural machinery design[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007(in Chinese).
- [15] 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]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 154-164. WEI G J, QI B, JIAO W, et al. Design and experiment of mechanical forced fertilizing device for paddy field [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(S1): 154-164 (in Chinese with English abstract).
- [16] 朱卿创. 螺旋槽轮式排肥器的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017. ZHU Q C. Study on spiral grooved wheel fertilizer distributor[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017(in Chinese with English abstract).
- [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 W W, FANG L Y, LUO X W, 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 with English abstract).

Design and experiment of wind-delivered rice side-deep fertilization device

XU Hongmei, ZHAO Yabing, LI Zhongxin, MENG Junshi, ZHANG Yinpei, ZHANG Guozhong

College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

Abstract A wind-delivered rice side-deep fertilization device was designed by integrating the advantages of a double-gear fertilizer feeder and a spiral fertilizer feeder to solve the problems of poor performance of fertilizer discharge caused by the clogging of fertilizer outlets at the end of fertilizer feeder in paddy field environments. The fertilization device for rice was overall designed and the parameters of the fertilization device were determined through theoretical calculations. Discrete element simulation analyses of key components were conducted with EDEM software based on the experimental results of material characteristic parameters. Experiments of single factor and Box Behnken response surface were performed to determine the optimal parameters using the coefficient of variation of fertilizer stability as the evaluation index, the diameter, pitch, and speed of the spiral axis as experimental factors. The optimal transmission ratio of the two-stage fertilizer feeder was determined by comparing its impact on the quality of fertilizer discharge. The effectiveness of the design was validated through comparative analysis of prototype tests between the two-stage fertilizer feeder and the single-stage spiral fertilizer feeder. The results showed that the optimal combination of parameter for the spiral axis was a diameter of 21 mm, a rotation speed of 140 r/min, and a pitch of 17 mm, with the coefficient of variation for discharge stability of fertilizer of 2.5%. The fertilizer was discharged continuously and evenly when the transmission ratio of the double-gear fertilizer feeder and the spiral fertilizer feeder was 1:4. The results of testing the prototype showed that the coefficient of variation of the consistency, stability, and uniformity of the two-stage fertilizer feeder was improved compared to that of the spiral fertilizer feeder. It will provide a theoretical foundation and reference for the technology and equipment of rice side-deep fertilization, and valuable insights for the future studies in this field.

Keywords rice; fertilization device; side-deep fertilization; two-stage fertilizer feeder; discrete element

(责任编辑:陆文昌)