doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.007

杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验

雷小龙[1,2]　杨文浩[1]　刘礼阳[1]　刘洪男[1]　任万军[2]　陈　勇[2]
(1. 四川农业大学机电学院, 雅安 625014; 2. 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 成都 611130)

摘要: 为适应杂交稻气送式集排器的穴播要求,设计了一种集中定量供种的成穴供种装置。阐述了杂交稻气送式集排器成穴供种装置的工作原理,基于杂交稻机械物理参数和穴播农艺要求,提出了一种渐开线状型孔,确定了主要结构参数,构建了种子群充种和投种过程的力学模型。台架试验研究了杂交稻品种、渐开线型排种轮数量和转速对供种和成穴性能的影响。结果表明:渐开线型排种轮数量和转速分别为 3 ~ 8 和 10 ~ 40 r/min 时,供种数量随渐开线型排种轮数量和转速增加而增加,供种数量范围为 2 392 ~ 17 732 粒/min;转速为 20 ~ 40 r/min 时,供种数量变异系数均低于 1.0%。成穴供种装置可适应多种杂交稻品种,供种数量受种子长度和容重的影响。穴供种数量随排种轮数量增加显著增加,随转速增加而降低;较优转速为 20 ~ 30 r/min,穴供种数量为 19 ~ 38 粒,其变异系数均低于 25.0%。穴径随转速和排种轮数量增加而增加,穴距保持稳定。田间试验表明成穴供种装置可实现穴播,平均株数和穴距分别为 3.07 株/穴和 180.2 mm,符合水稻直播技术要求。

关键词: 杂交稻; 气送式集排器; 成穴供种装置; 供种性能
中图分类号: S223.2+3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0058-10

Design and Experiment of Seed Hill Feeding Device in Pneumatic Centralized Metering Device for Hybrid Rice

LEI Xiaolong[1,2]　YANG Wenhao[1]　LIU Liyang[1]　LIU Hongnan[1]　REN Wanjun[2]　CHEN Yong[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an* 625014, *China*
2. *Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu* 611130, *China*)

Abstract: In order to adjust to the requirement of hill seeding for pneumatic centralized metering device for hybrid rice, a seed hill feeding device was designed to supply quantitative seeds. According to the mechanical and physical properties of rice seeds and agronomic requirement of hill seeding, the involute-type model-hole was introduced. The main structural parameters of the seed hill feeding device were determined and the mechanical models of seed filling and throwing processes were established. The effects of varieties of rice seeds, number of involute-type feeding unit and rotational speed on seed feeding and hill-forming performance were carried out in bench test. The results showed that when the number of involute-type feeding unit was 3 ~ 8 and rotational speed was 10 ~ 40 r/min, the seed quantity was increased with the increase of number of involute-type feeding unit and rotational speed. The range of seed quantity was 2 392 ~ 17 732 grains per minute. The variation coefficient of seed quantity was less than 1.0% for the rotational speed of 20 ~ 40 r/min. The seed hill feeding device could be applied in different varieties of rice seeds, but the seed quantity was affected by the length and bulk density of rice seed. The seed quantity per hill was increased with the increase of number of involute-type feeding unit, and decreased with the decrease of rotational speed. The optimum rotational speed which resulted in the variation coefficient of seed quantity per hill less than 25.0% was 20 ~ 30 r/min. The seed quantity per hill was 19 ~ 38 grains. The hill diameter was increased with the increase of number of involute-type feeding unit and rotational speed. The seed spacing was stable for different treatments. The field experiments indicated that the hill seeding could be realized by using the seed hill feeding device. The average seedlings and seed spacing were 3.07 seedlings per hill and 180.2 mm, respectively, which met

收稿日期: 2018-08-06　修回日期: 2018-09-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0301204、2017YFD030171)
作者简介: 雷小龙(1989—),男,讲师,博士,主要从事油稻种植技术与装备研究,E-mail: leixl1989@163.com

the agronomic requirements of rice direct-seeding. The results can provide basis for structural design of pneumatic centralized metering device and hill seeding for hybrid rice.

Key words: hybrid rice; pneumatic centralized metering device; seed hill feeding device; seed feeding performance

0　引言

水稻机械化种植包括机插和机直播 2 种方式，其中机插和机直播分别占 93.99% 和 5.97%[1-2]。机插具有分蘖能力强、农艺技术较完善和产量稳定的特点，是日本、韩国和我国主要的水稻机械化种植方式；机直播省去育秧、运秧和插秧环节，有效降低劳动成本，且机直播稻分蘖发生早和优势蘖位低，成穗率高，通过增加有效穗数可获得较高产量；近年来由于农村劳动力短缺，省工、省力和节本的机直播种植方式得以快速发展，成为水稻机械化种植的重要方式[3]。机直播的播种质量主要取决于排种器的排种性能。

诸多学者对水稻精量排种器进行了研究[4-20]，实现了较好的排种性能，但研究对象大都属于单体式排种器。集中排种具有装卸种方便、精简传动和整机结构及效率较高的优势，已成为排种技术发展的一种趋势。集中排种器可分为滚筒式集排器和气送式集排器，张顺等[21-22]采用窝眼充种、多吸孔吸种、气吹清种、护种带护种及气力清堵等方式，设计了一种气力滚筒式水稻穴直播精量排种器，可实现较优排种质量的多行排种。

气力输送式集中排种器在国内外得到广泛研究和应用，戴亿政等[23]设计了一种适用于气力集排式水稻直播机的分种器以适应水稻高速作业和大播量播种。YATSKUL 等[24]优化了库恩气送式排种器的结构，提升了排种性能。笔者前期开展了油麦兼用型气送式集排器的结构设计与排种过程分析等工作[25-27]，采用交错倾斜锥柱状型孔定量供种装置与碗式枝状分配器相结合的方式实现油菜、小麦定量均匀排种，研究的气送式集排器经生产试验证实可完成高效、精量播种。

油麦兼用型气送式集排器主要采用精量播种的方式，无需成穴播种；而杂交稻为实现高产和抗倒伏农艺要求，杂交稻直播采用穴播方式。气送式集排器采用“机械定量供种 + 气流均匀分配成行”的方式，机械定量供种装置是实现水稻成穴播种的基础，为气流分配集中的种子群提供条件。因此本文基于常用杂交稻的机械物理特性，设计一种适用于杂交稻的成穴供种装置，确定主要结构参数，并开展供种和成穴性能试验。

1　杂交稻气送式集排器成穴供种装置结构与工作原理

1.1　杂交稻气送式精量穴直播机结构与工作原理

杂交稻气送式精量穴直播机包括机架、风泵、水稻气送式穴播集排器、排肥系统、电机变速驱动装置、导种管和开沟器等(图 1)。其中水稻气送式穴播集排器是实现杂交稻精量穴播的重要装置，主要包括成穴供种装置和气流输送分配系统 2 部分。排肥系统采用水平气送排肥方式，风泵由汽油机驱动向水稻气送式穴播集排器和排肥系统提供正压气流。杂交稻气送式精量穴直播机工作时，旋耕系统由拖拉机动力输出轴驱动，电机变速驱动装置驱动成穴供种装置转动及控制转速，定量成穴供种；风泵向气流输送分配系统提供正压，使水稻种子与正压气流混合、输送和分配，均匀分配成 8 行依次进入导种管和开沟器，将水稻种子送入预定深度的土壤中，完成播种过程。本文以幅宽为 2 200 mm 的杂交稻气送式精量穴直播机为研究对象，其主要技术参数如表 1 所示。

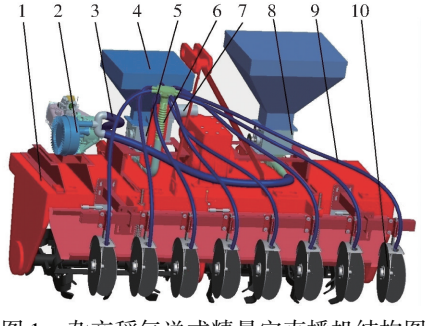


图 1　杂交稻气送式精量穴直播机结构图

Fig. 1　Structure diagram of pneumatic conveying hill precision direct-seeding planter for hybrid rice

1. 播种机机架　2. 风泵　3. 供气管道　4. 种箱　5. 成穴供种装置　6. 气流输送分配系统　7. 电机变速驱动装置　8. 排肥系统　9. 导种管　10. 双圆盘开沟器

表 1　杂交稻气送式精量穴直播机主要技术参数

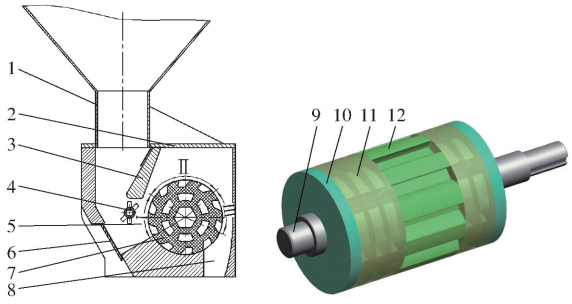
Tab. 1　Main parameters of pneumatic conveying hill precision direct-seeding planter for hybrid rice

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 545×2 190×1 410
风机功率/kW	2.2
作业幅宽/m	2.2
作业速度/(km·h^{-1})	2.0~5.0
播种行数	6~8(可调)
行距/mm	250~300(可调)

1.2 成穴供种装置结构及工作过程

成穴供种装置是杂交稻气送式集排器实现定量控制排种量、成穴的核心部件。成穴供种装置由种箱、壳体、种层调节板、搅种机构和成穴供种机构等组成,如图 2 所示。搅种机构[29]位于供种装置壳体、种层调节板和成穴供种机构形成的充种区内,具有扰动种群和增加充种能力的功能。成穴供种机构是成穴排种和调节供种量的核心,由侧挡板、空白填充轮和渐开线型排种轮组成,侧挡板为渐开线型排种轮提供独立的供种空间;空白填充轮和渐开线型排种轮数量总和为 9,渐开线型排种轮可用空白填充轮替换,从而调节供种量。多个渐开线型排种轮组合形成供种机构,间隔的型孔完成充种、携种和投种过程,在匀速转动时形成规律性的等间距种子群,实现成穴定量供种。渐开线型排种轮是影响充种与成穴供种的关键部件。

杂交稻成穴供种装置工作时,杂交稻种子由种箱进入充种区,搅种机构和成穴供种机构同步转动,搅种机构转动增加种子流动性和侧向压力;在种层调节板[28]、搅种机构[29]和渐开线型排种轮共同作用下,杂交稻种子充入型孔。携有种子的型孔通过携种区进入投种区,在重力与离心力作用下种子群脱离型孔,成穴地进入气流输送分配系统中完成分配成行成穴过程。



(a) 成穴供种装置结构图 (b) 成穴供种机构三维图

图 2 杂交稻成穴供种装置

Fig. 2 Structure diagrams of seed hill feeding device for hybrid rice

1. 种箱 2. 供种装置壳体 3. 种层调节板 4. 搅种机构 5. 充种区 6. 卸种板 7. 成穴供种机构 8. 投种口 9. 排种轴 10. 侧挡板 11. 空白填充轮 12. 渐开线型排种轮 Ⅰ. 充种区 Ⅱ. 携种区 Ⅲ. 投种区

2 成穴供种装置关键参数设计

2.1 型孔结构设计

种子的机械物理特性参数是设计型孔的依据,杂交稻种子呈纺锤体状,表面有稃毛,流动性偏差。选取四川省常用的杂交稻种子,不同水稻种子的三轴尺寸如表 2 所示,并得到杂交稻种子充入型孔的概率[5,25]。

由表 2 可知,杂交稻种子球形度低,整体低于 40%;种子充入型孔以平躺和侧卧为主,二者的充种概率之和约 90%。型孔结构对充种和投种均有重要影响,型孔结构主要包括形状和尺寸两方面。

表 2 不同杂交稻种子三轴尺寸及充种姿态的概率

Tab. 2 Triaxial size and postural probability of different rice seeds

品种	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	球形度/%	千粒质量/g	容重/(kg·m^{-3})	种子平躺姿态概率/%	种子侧卧姿态概率/%	种子竖立姿态概率/%	种子平躺+侧卧姿态概率/%
蜀优 217	9.37	2.44	2.07	38.68	25.47	576.53	48.25	41.05	10.70	89.30
晶两优 534	8.60	2.28	1.88	38.71	21.67	612.67	48.95	40.36	10.69	89.31
川优 8377	9.24	2.26	1.89	36.87	22.87	579.93	48.96	41.01	10.03	89.97
中 9 优 2 号	9.77	2.23	1.85	35.10	22.67	576.53	49.60	41.03	9.37	90.63
宜香优 2115	9.79	2.52	2.02	37.62	26.73	572.00	49.77	39.95	10.28	89.72
F 优 498	9.64	2.48	2.07	38.08	22.91	575.13	48.79	40.74	10.47	89.53
繁优 609	9.68	2.57	1.96	37.81	23.19	565.17	50.27	39.39	10.34	89.66
平均	9.44	2.40	1.96	37.55	23.64	574.60	49.23	40.51	10.27	89.73

为使杂交稻种子易于充入型孔和投种,设计了渐开线状型孔(图 3)。渐开线状型孔是依据渐开线方程成型的,渐开线方程为

$$\begin{cases} x = x_0 + s\sin(\theta t) \\ y = y_0 + s\cos(\theta t) \\ s = 2\pi r_0 t \end{cases} \tag{1}$$

式中 x——渐开线横坐标,mm

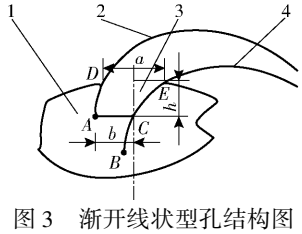


图 3 渐开线状型孔结构图

Fig. 3 Structure diagram of involute-type model-hole

1. 间隔齿 2. 左壁渐开线 3. 型孔 4. 右壁渐开线

y——渐开线纵坐标,mm

x_0——渐开线初始横坐标,mm

y_0——渐开线初始纵坐标,mm

s——调节参数，mm

r_0——基圆半径，mm

t——时间，s

θ——渐开线极角，(°)

图 3 中，A 为左壁渐开线起点；B 为右壁渐开线起点；C 为型孔右壁在渐开线 4 的起点；D 和 E 分别为左壁渐开线 2 和右壁渐开线 4 与排种轮外轮廓的交点。

根据杂交稻种子直播的要求，单穴以 3 ~ 5 粒为宜，设计型孔首先应满足不堵塞型孔，参照经验公式[5]，型孔长度 l、型孔上沿宽度 a、型孔下沿宽度 b 和型孔高度 h 的公式为

$$\begin{cases} l = L_{\max} + k_L \\ a = k_a L_{\max} \\ b = k_b W_{\max} \\ h = 3k_h W_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

式中　l——型孔长度，mm

$L_{\max}$——水稻种子最大长度，mm

k_L——长度增量，为 1.0 ~ 1.5 mm

a——型孔上沿宽度，mm

k_a——上沿宽度系数，为 1.1 ~ 1.3

b——型孔下沿宽度，mm

k_b——下沿宽度系数，为 2.5 ~ 3.0

h——型孔高度，mm

k_h——高度调节系数，为 0.9 ~ 1.1

$W_{\max}$——水稻种子最大宽度，mm

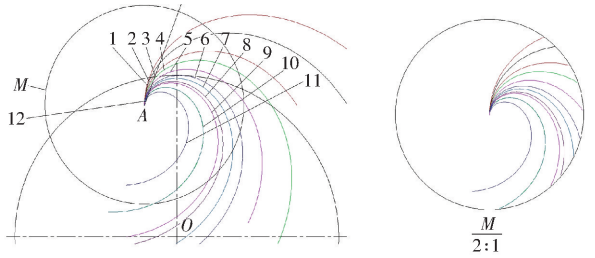
根据表 2 的杂交稻种子三轴尺寸，确定 k_L、k_a、k_b 和 k_h 分别为 1.5 mm、1.3、3.0 和 1.0，则 l 为 11.0 mm、a 为 12.7 mm、b 为 8.0 mm、h 为 7.5 mm。

根据型孔尺寸，设立左壁渐开线初始坐标为 A (−8, 32.5)，右壁渐开线初始坐标为 B(−2, 25)，右壁渐开线经过点 C (0, 32.5)。左壁渐开线和右壁渐开线与直线 $y = 32.5$ mm 的交点为 A 和 C。渐开线型排种轮外轮廓方程为

$$x^2 + y^2 = 40^2 \tag{3}$$

联合式(1)和式(3)，可得到渐开线与排种轮外轮廓存在交点 D 恒成立，但不同的 r_0 和 θ 对交点 D 位置影响较大。为比较不同渐开线与排种轮外轮廓的相对位置，取 r_0 分别为 6、8、10 mm，θ 为 90°、180°、270°和 360°时，得到渐开线与排种轮外轮廓的图形如图 4 所示。图中，渐开线 1 ~ 11 对应的 r_0 分别为 10、8、6、10、8、6、10、8、10、8(6)、6 mm，对应的 θ 分别为 90°、90°、90°、180°、180°、180°、270°、270°、360°、360°(270°)、360°。直线 12 的倾斜角为 70°。

由图 4 可知，当 θ 大于 180°时，渐开线与排种轮外轮廓在 A 点上方无交点。经过前期研究[25]，具有一定倾角的型孔具有较好的充种性能。以 A 点为起点、倾角为 70°的直线 12 与排种轮外轮廓的交点为临界点，当 θ 为 90°和 r_0 为 6 ~ 10 mm 时渐开线均可满足充种性能。本研究取 r_0 和 θ 分别为 8 mm 和 90°，得到交点 D 的坐标为(−6.4, 39.48)。



(a) 渐开线与排种轮外轮廓图　　(b) 渐开线放大图

图 4　渐开线示意图

Fig. 4　Structure diagrams of involute line

根据型孔的尺寸，确定右壁渐开线 4 与排种轮外轮廓的交点 E 的坐标为(6.3, 39.49)，联立点 C(0, 32.5)，通过渐开线方程式(1)，得到右壁在渐开线 4 的起点 B (−2, 25)。从而确定渐开线状型孔截面如图 3 所示。

2.2　渐开线型排种轮结构设计

杂交稻以穴播方式进行种植，直播机田间作业时农艺要求的种植穴距为

$$B = \frac{60v}{nZ} \tag{4}$$

式中　B——穴距，m

v——播种作业速度，m/s

n——渐开线型排种轮转速，r/min

Z——渐开线型排种轮上型孔数量

每穴排种的种子数量为

$$Q = \frac{MN}{k} = \frac{1\,000Q_s}{kZn\rho_{1\,000}} \tag{5}$$

式中　Q——单穴播种种子数量

N——渐开线型排种轮数量

M——单个型孔容纳种子数量

k——排种行数，取 8

Q_s——排种速率，g/min

$\rho_{1\,000}$——杂交稻种子千粒质量，g

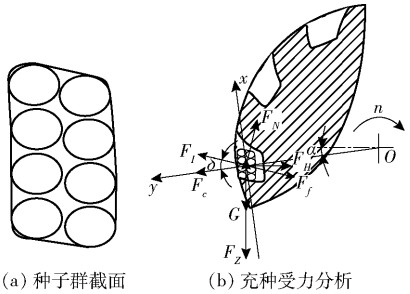
由式(4)和式(5)可知，杂交稻种子在田间的穴距分布与作业速度 v、渐开线型排种轮转速 n、型孔数量 Z 有关。单穴播种种子数量受总排种量控制，总排种量受渐开线型排种轮转速 n、型孔数量 Z 和种子千粒质量的影响。当穴距 B 和作业速度 v 一定时，型孔数量 Z 与转速 n 成反比。而型孔数量 Z 也受排种轮直径的影响，由于水稻排种的成穴要求，适当增加排种轮直径可以提高成穴性能和充种时间。

综合考虑成穴供种装置整体结构尺寸和成穴要求，设计渐开线型排种轮直径 D 为 80 mm。

型孔数量 Z 对成穴性和转速 n 等均有明显作用，为兼顾适应较高速作业和成穴性的要求，在前进速度为 0.5 m/s、穴距为 0.16 m 和转速为 20 r/min 的条件下，型孔数量 Z 取 10 个。杂交稻排种量通过渐开线型排种轮数量和转速共同调节，考虑到单穴 3～5 粒的排种要求，渐开线型排种轮数量在 3～8 之间调节。渐开线型排种轮、侧挡板和空白填充轮均采用 3D 打印技术制造，材料为 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene copolymer)工程塑料。

2.3 水稻种子供种过程力学分析

水稻种子充入型孔是实现精量供种的首要环节，种子在充种区受到搅种机构和渐开线型排种轮型孔的扰动，在重力、种群压力和摩擦力等作用下，种子充入型孔。由于种子以多粒(一般 24～32 粒)种子形成种子群充入型孔，将种子群视为一个整体，种子群在充种区的受力分析如图 5 所示。



(a) 种子群截面 (b) 充种受力分析

图 5 种子群充种过程受力分析

Fig. 5 Mechanics analysis of seeds population in seed filling process

根据水稻群的受力分析和达朗贝尔原理，建立受力平衡方程

$$\begin{cases} F_N\cos\delta - F_f\sin\delta + F_I\sin\delta - (G+F_Z)\cos\alpha - \\ \quad F_H\sin\alpha = 0 \\ F_I\cos\delta - F_f\cos\delta - F_N\sin\delta + F_c - F_H\cos\alpha + \\ \quad (F_Z+G)\sin\alpha = 0 \\ F_f = \mu F_N \\ F_I = ma_I \\ F_c = m\dfrac{\pi^2 n^2}{900} r \end{cases} \tag{6}$$

式中 G——种子群重力，N

m——种子群质量，kg

F_N——型孔侧壁对种子群支持力，N

F_f——型孔与种子群间的摩擦力，N

F_c——种子群的惯性离心力，N

F_I——科氏惯性力，N

F_Z——种子群受到的垂直压力，N

F_H——种子群受到的横向压力，N

a_I——科氏加速度，m/s²

α——种子群初始填充角，(°)

δ——型孔左侧壁切线角，(°)

μ——型孔与种子群间的摩擦因数

r——渐开线型排种轮半径，m

由式(6)得

$$\alpha = \arctan\frac{c\cos\delta + d\sin\delta - (G+F_Z)F_c}{d\cos\delta - c\sin\delta + F_N F_c} \tag{7}$$

其中 $c = F_H F_N - (G+F_Z)(F_I - \mu F_N)$

$d = F_H(F_I - \mu F_N) + (G+F_Z)F_N$

由式(7)可以看出，种子群初始填充角度 α 与型孔左侧壁切线角 δ、渐开线型排种轮转速 n、横向压力 F_H 等参数相关。当转速和受力相同时，种子群初始填充角 α 与型孔左侧壁切线角 δ 呈正相关，但 δ 太高会导致不满足型孔成形条件和降低充种能力。当型孔结构确定时，转速 n 增加会降低种子群初始填充角 α。适当增加种子群初始填充角 α 有利于增加充种时间保证充种质量，结合渐开线型孔设计参数，型孔左侧壁从入口至底部的切线角 δ 由大变小，为 18.5°～6.5°。

当种子群进入投种区后，由于种子之间仍是以散粒体的方式存在，取种子群投种的临界状态为研究对象，种子群的受力分析如图 6 所示。

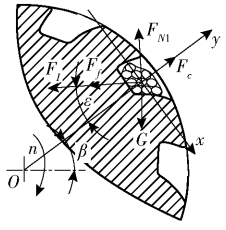


图 6 种子群投种过程受力分析

Fig. 6 Mechanics analysis of seeds population in seed throwing process

投种过程受力平衡方程为

$$\begin{cases} G\cos\beta - F_{N1}\cos\varepsilon - (F_I+F_f)\sin\varepsilon = 0 \\ F_c + F_{N1}\sin\varepsilon - G\sin\beta - (F_I+F_f)\cos\varepsilon = 0 \\ F_f = \mu F_{N1} \end{cases} \tag{8}$$

式中 F_{N1}——投种时型孔对种子群支持力，N

β——种子群初始投种角，(°)

ε——型孔右侧壁切线角，(°)

由式(8)得

$$n = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{(\sin(\beta-\varepsilon) + \mu\cos(\beta+\varepsilon))g + a_I(1-\mu\sin(2\varepsilon))}{r(\cos\varepsilon - \mu\sin\varepsilon)}} \tag{9}$$

式(9)表明，在相同投种位置(β 一定)时，型孔

右侧壁切线角 ε 与转速 n 呈正相关，说明适当增加型孔右侧壁切线角 ε 有利于提高转速。在转速一定时，增加型孔右侧壁切线角 ε 可使投种位置提前，增加投种时间，避免型孔堵塞。因此，采用渐开线状型孔的右侧壁从型孔底部至外沿切线角呈增加趋势，为 32°～52°，有利于完成投种过程。

3　成穴供种装置供种性能试验

3.1　试验材料与方法

试验以常用的杂交稻品种蜀优 217、晶两优 534、川优 8377、中 9 优 2 号、宜香优 2115、繁优 609 和 F 优 498 为试验材料，其主要物料参数见表 2。供种试验在自制试验台和 JPS－12 型计算机视觉排种器试验台（图 7）上进行。

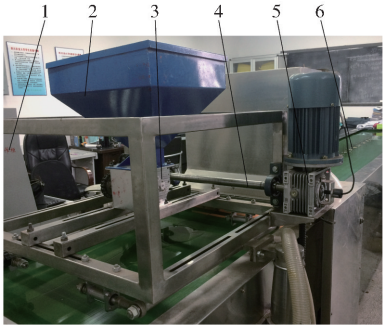


图 7　杂交稻成穴供种装置台架试验

Fig. 7　Platform experiment of seed hill feeding device for hybrid rice

1. 控制台　2. 种箱　3. 成穴供种装置　4. 传动轴　5. 减速电机　6. 种子带

为分析成穴供种装置对不同杂交稻品种的适应性，设立了 6 个杂交稻品种（蜀优 217、晶两优 534、川优 8377、中 9 优 2 号、宜香优 2115 和 F 优 498）和转速的两因素试验，转速设 10～40 r/min，增量为 10 r/min。为获得不同的供种量适应不同播种量要求、作业速度和幅宽，开展了渐开线型排种轮数量和转速的两因素试验，渐开线型排种轮数量的范围为 3～8 个，共 6 个水平；转速为 10～40 r/min。试验中测定 1 min 各处理的供种量，用供种速率及其变异系数评价供种稳定性[25]，供种数量通过供种速率和千粒质量求得，各处理重复 3 次。

为观察杂交稻的分布均匀性和成穴性能，在 JPS－12 型计算机视觉排种器试验台上开展了种子成穴性能试验，分析不同渐开线型排种轮数量、转速和杂交稻品种的供种数量和成穴性能，评价指标为穴供种数量、穴径和穴距[5]。应用 Matlab 软件进行方差分析。

3.2　试验结果与分析

3.2.1　成穴供种装置对杂交稻品种的适应性分析

杂交稻品种和转速对供种性能影响的结果表明（表 3），在 4 个渐开线型排种轮条件下，不同杂交稻的供种速率和供种数量差异明显，晶两优 534 最高，中 9 优 2 号品种最低；供种数量则以晶两优 534 最高，宜香优 2115 最低。供种速率和供种数量均随转速增加而增加，变异系数随转速增加而降低，整体低于 1.1%。说明成穴供种装置对杂交稻品种的适应性与机械物理参数有关，相关性分析表明供种速率和供种数量均与种子长度呈极显著负相关（相关系数分别为 －0.863 和 －0.978），供种数量与种子容重呈极显著正相关（相关系数为 0.938）。种子的三轴尺寸对进入型孔具有明显影响，种子三轴尺寸和千粒质量大，则容重减小，相同容积能够充入相对较多的种子，因此选用不同杂交稻品种时，应根据穴播种量参照三轴尺寸和容重等参数确定适宜的工作参数。

表 3　杂交稻品种和转速对供种性能的影响

Tab. 3　Effects of hybrid rice varieties and rotational speed on seed feeding performance

品种	转速 10 r/min			转速 20 r/min			转速 30 r/min			转速 40 r/min		
	供种速率/（g·min^{-1}）	供种数量/（粒·min^{-1}）	变异系数/%	供种速率/（g·min^{-1}）	供种数量/（粒·min^{-1}）	变异系数/%	供种速率/（g·min^{-1}）	供种数量/（粒·min^{-1}）	变异系数/%	供种速率/（g·min^{-1}）	供种数量/（粒·min^{-1}）	变异系数/%
蜀优 217	75.67	2 970.82	1.08	147.18	5 778.64	0.65	212.38	8 338.30	0.29	273.70	10 745.81	0.39
晶两优 534	81.66	3 768.48	0.91	155.78	7 188.89	0.82	214.38	9 892.82	0.53	269.06	12 416.40	0.64
中 9 优 2 号	64.42	2 841.57	0.58	133.25	5 877.74	0.33	183.63	8 100.03	0.14	229.88	10 140.16	0.69
宜香优 2115	72.57	2 714.76	1.01	132.92	4 972.51	0.62	190.67	7 133.12	0.79	250.07	9 355.44	0.51
川优 8377	74.79	3 270.30	0.47	143.56	6 277.41	0.61	207.80	9 086.14	0.36	269.90	11 801.61	0.88
F 优 498	67.43	2 943.05	0.99	143.97	6 284.08	0.60	210.05	9 168.54	0.63	281.29	12 278.18	0.73

3.2.2　排种轮数量与转速对供种性能的影响

以 F 优 498 为试验材料，得到排种轮数量和转速对供种数量及其变异系数的影响（图 8）。在渐开线型排种轮数量为 3～8 个和转速为 10～40 r/min 时，供种数量随渐开线型排种轮数量和转速增加而增加，1 min 的供种数量范围为 2 392～17 732 粒，供种数量范围较大，能够适应不同幅宽、作业速度和农艺技术等对变量播种的要求。供种数量变异系数随

渐开线型排种轮数量和转速增加而降低,在转速为 20 ~ 40 r/min 时,不同渐开线型排种轮数量的供种变异系数均低于 1.0%。为指导不同播种量要求下的渐开线型排种轮数量和转速,应用 Matlab 软件对供种数量进行二次多元回归拟合,得到渐开线型排种轮数量和转速与供种数量的回归方程

$$q = -3\,039.05 + 1\,225.761x_1 + 98.766\,63x_2 + 44.151\,5x_1^2 - 97.821\,8x_1x_2 - 0.087\,11x_2^2 \quad (10)$$

式中 q——供种数量,粒/min

x_1——渐开线型排种轮数量,取 3 ~ 8

x_2——渐开线型排种轮转速,为 10 ~ 40 r/min

经显著性检验分析,该模型决定系数为 0.964 8($P < 0.001$),表明该回归模型显著且回归方程失拟性不显著,能够较好地拟合试验结果,说明式(10)可用于预测给定供种数量的渐开线型排种轮数量和转速。

3.2.3 成穴供种装置的分布均匀性与成穴性能

成穴供种装置的成穴性能试验结果表明(表 4),渐开线型排种轮数量和转速对穴供种数量

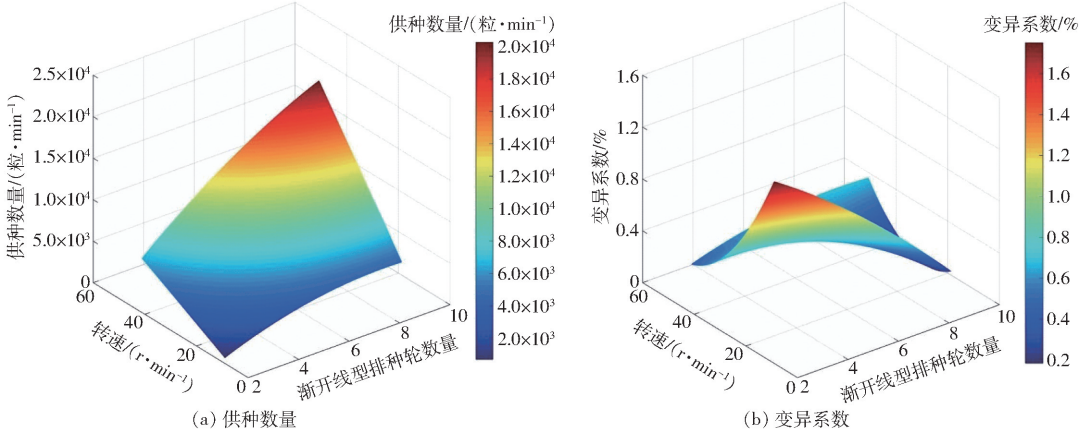


图 8 渐开线型排种轮数量与转速对杂交稻供种性能的影响

Fig. 8 Effects of number of involute-type feeding unit and rotational speed on seed feeding performance for hybrid rice

表 4 不同渐开线型排种轮数量与转速的穴供种数量与成穴性能

Tab. 4 Seed quantity for each hill and hill-forming performance at different numbers of involute-type feeding unit and rotational speed

渐开线型排种轮数量	转速/(r·min⁻¹)	穴供种数量/粒	穴供种数量变异系数/%	穴径/cm	穴径变异系数/%	穴距/cm	穴距变异系数/%
4	10	19.86	18.15	6.38	38.32	22.56	10.10
	20	19.68	21.54	8.29	22.92	22.54	10.42
	30	19.76	24.21	8.17	27.67	22.56	10.34
	40	17.09	24.23	8.91	24.59	22.13	11.76
5	10	25.31	22.60	8.80	21.88	22.16	9.81
	20	24.56	18.32	8.27	22.82	22.63	9.49
	30	24.45	22.53	9.17	23.06	23.02	7.71
	40	22.39	21.16	8.88	20.16	23.04	10.89
6	10	30.57	14.20	8.39	30.67	22.22	8.19
	20	29.28	13.22	8.65	25.21	22.25	12.61
	30	27.06	20.47	8.87	25.11	22.03	11.86
	40	26.72	19.23	10.18	14.70	23.38	7.21
7	10	34.18	16.71	8.86	23.22	21.91	10.04
	20	33.89	17.57	8.61	24.02	22.03	8.53
	30	31.73	15.93	8.39	25.35	22.01	9.58
	40	27.29	15.68	9.17	23.02	22.44	8.80
8	10	38.03	13.57	8.74	24.70	23.00	6.58
	20	36.71	20.15	8.82	27.81	22.12	7.97
	30	34.62	10.80	9.52	17.95	23.07	10.17
	40	29.41	15.74	9.35	21.56	23.10	8.49
F	排种轮数量	112.85**	4.11*	5.11**	1.32	2.60	1.10
	转速	20.05**	0.48	5.62**	2.25	2.55	0.35
	排种轮数量×转速	1.73		1.68		1.01	

注:* 和 ** 分别表示方差分析在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

影响均达极显著水平，穴供种数量随排种轮数量增加显著增加；转速为 10 ~ 40 r/min 时穴供种数量随转速增加而降低，转速达到 40 r/min 时降低较快，这是由充种时间减少所致，则较优转速为 20 ~ 30 r/min，穴供种数量为 19 ~ 38 粒，其变异系数均低于 25.0%。渐开线型排种轮数量显著影响穴供种数量变异系数，穴供种数量变异系数随排种轮数量增加呈下降趋势。不同处理的穴距差异较小，说明在不同的作业速度下能够保持稳定的穴距。排种轮数量和转速对穴径影响极显著，穴径随转速和排种轮数量增加均呈增加的趋势，由于穴供种数量和转速带来的离心力增加会增加穴径，从而使种子群相对分散。

在渐开线型排种轮数量和转速分别为 5 和 20 r/min时，不同杂交稻品种的穴供种数量差异较大(图 9)，与供种速率的趋势一致。不同品种的穴径差异较小，通过观察种子群在排种器试验台上的分布情况(图 10)，发现种子群整体处于较集中状态，但仍有少数种子较分散，从而增加了穴径，这是由种子与供种装置壳体碰撞或种子群投种时间不一致造成的。

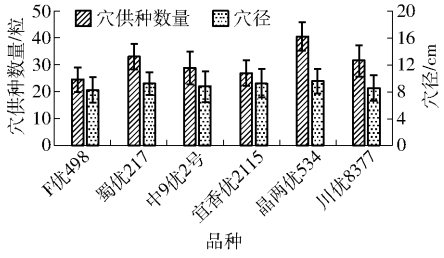


图 9　不同杂交稻品种的穴供种数量与穴径

Fig. 9　Seed quantity for each hill and hill-forming performance for different rice varieties



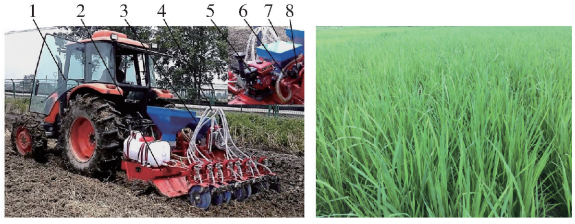
(a) F优498　　(b) 晶两优534

图 10　杂交稻种子群在排种器试验台上的分布

Fig. 10　Distributions of rice seed population on platform

4　田间试验

为检验杂交稻气送式集排器成穴供种装置的供种效果，于 2018 年 5 月 14 日在四川省崇州市四川农业大学现代农业研发基地开展了水稻旱直播试验，如图 11a 所示，前茬为小麦。品种为繁优 609，渐开线型排种轮数量和转速分别为 5 和 23 r/min，目标播种量 30 kg/hm^2。试验以久保田 M954KQ 型拖拉机为牵引动力，作业速度为 2.48 km/h，工作幅宽 2.2 m，同时播种 8 行，行距为 250 mm。于 3 叶一心期取 3 个点测定 1 m 内 8 行的穴苗数和株距，苗期长势如图 11b 所示。单穴苗数在 2 ~ 6 株范围内，平均苗数为 3.07 株/穴，穴距为 180.2 mm，满足水稻直播的技术要求。



(a) 田间试验　　(b) 苗期长势

图 11　水稻直播田间试验与苗期长势

Fig. 11　Field experiment and growth for rice

1. 拖拉机　2. 旋耕系统　3. 种箱　4. 分配装置　5. 风泵系统　6. 成穴供种装置　7. 导种管　8. 直流电机驱动装置

5　结论

(1)基于杂交稻的机械物理参数和穴播农艺要求，提出了一种渐开线状型孔，设计了杂交稻气送式集排器成穴供种装置，确定了型孔形状与关键参数，明确通过渐开线型排种轮数量和转速共同调节供种量，建立了种子群在充种和投种过程的力学模型。

(2)台架试验结果表明：成穴供种装置能够适应多个杂交稻品种，供种数量与种子长度呈极显著负相关，与容重呈极显著正相关。渐开线型排种轮数量和转速分别为 3 ~ 8 和 10 ~ 40 r/min 时，供种数量随渐开线型排种轮数量和转速增加而增加，供种数量范围为 2 392 ~ 17 732 粒/min。供种数量变异系数随渐开线型排种轮数量和转速增加而降低，转速为 20 ~ 40 r/min 时，供种数量变异系数均低于 1.0%。

(3)成穴性能试验结果表明：穴供种数量随排种轮数量增加显著增加；穴供种数量随转速增加而降低，转速达到 40 r/min 时降低较快；较优转速为 20 ~ 30 r/min，穴供种数量为 19 ~ 38 粒，其变异系数均低于 25.0%。穴径随转速和排种轮数量增加而增加，穴距保持稳定。田间试验验证成穴供种装置可实现穴播，平均苗数和穴距分别为 3.07 株/穴和 180.2 mm，符合水稻直播技术要求。

参　考　文　献

1　李泽华，马旭，李秀昊，等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(5)：1 - 20. http://www.j-

csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20180501&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 05. 001.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):1 - 20. (in Chinese)

2 农业部南京农业机械化研究所. 2017 中国农业机械化年鉴[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2017.

3 臧英,罗锡文,周志艳. 南方水稻种植和收获机械化的发展策略[J]. 农业机械学报,2008,39(1):60 - 63.
ZANG Ying, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan. Development strategy on rice planting and harvesting mechanization in south China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 60 - 63. (in Chinese)

4 罗锡文,蒋恩臣,王在满,等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报,2008,24(12):52 - 56.
LUO Xiwen, JIANG Enchen, WANG Zaiman, et al. Precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12):52 - 56. (in Chinese)

5 罗锡文,刘涛,蒋恩臣,等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报,2007,23(3):108 - 112.
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3):108 - 112. (in Chinese)

6 罗锡文,王在满,蒋恩臣,等. 型孔轮式排种器弹性随动护种带装置设计[J]. 农业机械学报,2008,39(12):60 - 63.
LUO Xiwen, WANG Zaiman, JIANG Enchen, et al. Design of disassemble rubber guard device for cell wheel feed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12):60 - 63. (in Chinese)

7 张明华,王在满,罗锡文,等. 水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):10 - 15.
ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of furrowing device of precision hill-drop drilling machine for rice [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 10 - 15. (in Chinese)

8 王在满,罗锡文,黄世醒,等. 型孔式水稻排种轮充种过程的高速摄像分析[J]. 农业机械学报,2009,40(12):56 - 61.
WANG Zaiman, LUO Xiwen, HUANG Shixing, et al. Rice seeds feeding process in cell wheel based on high-speed photography technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12):56 - 61. (in Chinese)

9 张明华,罗锡文,王在满,等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):30 - 36. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20160905&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 09. 005.
ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):30 - 36. (in Chinese)

10 张明华,罗锡文,王在满,等. 水稻精量穴直播机仿形与滑板机构的优化设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(6):18 - 26.
ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Optimization design and experiment of profiling and slide board mechanism of precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 18 - 26. (in Chinese)

11 张国忠,罗锡文,臧英,等. 水稻气力式排种器群布吸孔吸种盘吸种精度试验[J]. 农业工程学报,2013,29(6):13 - 20.
ZHANG Guozhong, LUO Xiwen, ZANG Ying, et al. Experiment of sucking precision of sucking plate with group holes on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 13 - 20. (in Chinese)

12 张国忠,臧英,罗锡文,等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(12):1 - 8.
ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of oriented seed churning device on pneumatic seed metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 1 - 8. (in Chinese)

13 张国忠,臧英,罗锡文,等. 粳稻穴播排种器直线型搅种装置设计及排种精度试验[J]. 农业工程学报,2014,30(17):1 - 9.
ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Line-churning tooth design and metering accuracy experiment of rice pneumatic precision hill-drop seed metering device on pregnant Japonica rice seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 1 - 9. (in Chinese)

14 臧英,邢赫,王在满,等. 水稻气力式排种器挡种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):33 - 38. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20150506&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 05. 006.
ZANG Ying, XING He, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of shield device on rice pneumatic metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):33 - 38. (in Chinese)

15 邢赫,臧英,王在满,等. 水稻气力式排种器分层充种室设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(4):42 - 48.
XING He, ZANG Ying, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of stratified seed-filling room on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 42 - 48. (in Chinese)

16 邢赫,王在满,罗锡文,等. 气力式水稻穴播机播种精度与田间成苗率关系的试验研究[J]. 农业工程学报,2018,34(9):42 - 48.
XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Experimental study on relationship of seeding precision and germination rate in field of pneumatic rice hill-drop drilling planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 42 - 48. (in Chinese)

17 XING H, WANG Z M, LUO X W, et al. General structure design and field experiment of pneumatic rice direct-seeder[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 31 - 42.

18 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.

http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160507&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.007.
TIAN Liquan, 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. (in Chinese)

19 张国忠,张沙沙,杨文平,等. 双腔侧充种式水稻精量穴播排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(8):9 - 17.
ZHANG Guozhong, ZHANG Shasha, YANG Wenping, et al. Design and experiment of double cavity side-filled precision hole seed metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 9 - 17. (in Chinese)

20 曹成茂,秦宽,王安民,等. 水稻直播机气吹辅助勺轮式排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):66 - 72.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.010.
CAO Chengmao, QIN Kuan, WANG Anmin, et al. Design and experiment on rice hill seeder with air-blowing special hole and scoop-wheel[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 66 - 72. (in Chinese)

21 张顺,夏俊芳,周勇,等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(1):11 - 19.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 11 - 19. (in Chinese)

22 张顺,夏俊芳,周勇,等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器排种性能分析与田间试验[J]. 农业工程学报,2017,33(3):14 - 23.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Field experiment and seeding performance analysis of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 14 - 23. (in Chinese)

23 戴亿政,罗锡文,王在满,等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(24):36 - 42.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36 - 42. (in Chinese)

24 YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161: 120 - 134.

25 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(20):10 - 18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feed device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10 - 18. (in Chinese)

26 LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150:98 - 109.

27 雷小龙,廖宜涛,丛锦玲,等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(12):16 - 26.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 16 - 26. (in Chinese)

28 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(6):11 - 19.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 11 - 19. (in Chinese)

29 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油菜小麦兼用气送式集排器搅种装置设计及充种性能试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18):26 - 34.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design of seed churning device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat and experiment on seed filling performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 26 - 34. (in Chinese)