

# 水稻直播机气吹辅助勺轮式排种器设计与试验\*

曹成茂 秦 宽 王安民 孙 燕 周 敏 李威亚

(安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

**摘要:** 为满足水稻直播精量排种的需要,在勺轮式排种器基础上,设计了一种气吹异形孔勺轮式水稻穴播排种器。在确定最佳排种转速与最佳清种方式情况下,用4种不同型孔的排种盘,与不同气吹压力和气吹角度相配合,对培两优98与Ⅱ优8006,2种杂交水稻进行穴播排种试验。试验结果表明:2种稻种在4个型孔下的各项排种指标均达穴播要求,坡状型孔的穴粒合格率和穴距合格率两项指标在4种型孔中最优,梯形孔的穴距标准差和穴距变异系数两项指标在4种型孔中最优。气吹压力范围在1~1.05 kPa之间,气吹角度在40°~45°之间,4种型孔穴粒合格率可达93%以上,穴距合格率可达92%以上。通过水稻直播机样机田间试验,验证了排种器和直播机设计参数的准确性和整机传动的可行性,排种性能满足水稻穴直播的农艺要求。

**关键词:** 水稻直播机 排种器 气吹式 勺轮式

**中图分类号:** S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0066-07

## Design and Experiment on Rice Hill Seeder with Air-blowing Special Hole and Scoop-wheel

Cao Chengmao Qin Kuan Wang Anmin Sun Yan Zhou Min Li Weiya

(School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** In order to meet the need of precision rice drilling, the rice hill seeder was designed with the air-blowing special hole and scoop-wheel based on the scoop-wheel seeder. With the optimum metering speed and optimum cleaning way, the seeding plates with four kinds of seeding holes were matched with different air-blowing pressures and air-blowing angles. The seeding tests were conducted on two kinds of hybrid rice, Peiliangyou98 and Ⅱ you8006. The test results indicated that the seeding performance of both two kinds of rice met the hill seeding requirements with the different seeding holes. The successful rate of hill seed number and hill distance of wavy shape hole were better than the others. The standard deviation and variation coefficient of hill distance in trapezoidal hole were better than the others. In addition, the qualified rate of hill seed number achieved above 93% and hill distance achieved above 92% under the condition of the air-blowing pressure of 1~1.05 kPa, and the air-blowing angle of 40°~45°. The whole farmland experiments on prototype verified the accuracy of designed parameters for seed sowing device. The metering performance could meet the agronomic requirements of rice direct seeding.

**Key words:** Rice drilling machine Seed metering device Air-blowing type Scoop-wheel type

### 引言

水稻直播不需人工育秧、移栽,是一种直接将种子播于大田的轻简栽培方式。但由于有些关键技术

农民并未掌握,易造成严重减产,因此在国内推广水稻直播颇受争议。而日本、美国等农业发达国家目前正大力推广水稻直播技术。国内水稻旱直播机可适用机型较少,难以实现精量穴播,无法达到农艺要

求<sup>[1-4]</sup>。为了使机械设备能达到直播的农艺要求，在长江中下游地区更好地推广直播技术，研究一种能够精量穴播，穴粒数、穴距能满足农艺要求的水稻直播机非常必要。直播机的关键部件是排种器，现有的水稻条播机大多是以外槽轮式或窝眼轮式排种器为主。勺轮式排种广泛用在玉米、大豆和绿豆播种机上，用在水稻直播机中未见报道。本文进行气吹辅助勺轮式水稻穴播排种器的设计与试验，确定合适的排种器型孔样式和气吹方式<sup>[5-6]</sup>。

## 1 气吹辅助勺轮式排种器总体结构

气吹辅助勺轮式排种器的总体结构如图 1 所示。种子从料斗进入排种器，落在排种器储种区。排种轴将动力通过旋转盘输入给取种盘，使取种盘旋转，取种盘上的取种勺在旋转到达排种器储种区时完成取种过程，将种子存储在异型孔中，当种子在异型孔中旋转至落种口，种子会在重力和气吹管气吹清种的共同作用下进入落种口。通过落种通道，从出种口排出。

## 2 排种器关键参数的确定

### 2.1 排种器基本结构参数

用勺轮式排种器对水稻进行直播，排种器的直径和取种勺的数量对成穴性、落种数量、穴距等指标<sup>[7]</sup>都有关键性的影响。为满足排种轴速度和前进速度需要，设计排种器直径为 220 mm，旋转盘与取种盘直径均为 190 mm，取种勺个数为 9 个，气吹管直径为 10 mm，气吹管垂直中心平面与落种口垂直平面重合。如图 1 所示，气吹平面中心至型孔

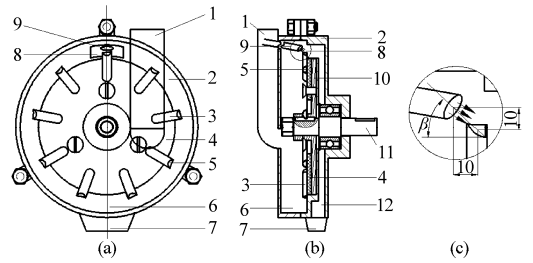


图 1 直播机排种器示意图

Fig. 1 Sketch of seed-metering device of direct-seeder

(a) 正视图 (b) 剖视图 (c) 局部放大图

1. 料斗 2. 壳体 3. 取种勺 4. 取种盘 5. 异型孔 6. 储种区
7. 出种口 8. 落种口 9. 气吹管 10. 旋转盘 11. 排种轴
12. 落种通道

中心垂直距离为 10 mm，气吹平面中心至型孔中心水平距离为 10 mm，气吹平面中心与型孔底端水平面夹角为  $\beta$ 。

### 2.2 型孔设计

型孔是影响排种性能的又一重要因素，为了便于稻种的充填和投种，型孔设计为典型型孔样式之一的面缺体，型孔形状设计为碗状型孔、坡状型孔、梯形型孔、半圆状型孔，如图 2 所示。型孔的直径由种子的长度确定，深度由种子的厚度确定，根据型孔容积对种子体积的宽容性，即囊种间隙，水稻种子一般采用下述经验公式<sup>[8-9]</sup>： $\varphi_1 = (1.30 \sim 1.35) L_{cp}$ ， $\varphi_2 = (1.01 \sim 1.05) L_{cp}$ ， $H = (1.25 \sim 1.30) H_{cp}$ 。 $\varphi_1$  为型孔的上口直径， $\varphi_2$  为型孔的底口直径， $H$  为型孔的深度， $L_{cp}$  为分级段内种子的平均长度， $H_{cp}$  为分级段内种子的平均厚度。II 优 8006 稻种平均粒长 7.8 mm，厚 2.0 mm。培两优 98 平均粒长 8 mm，厚

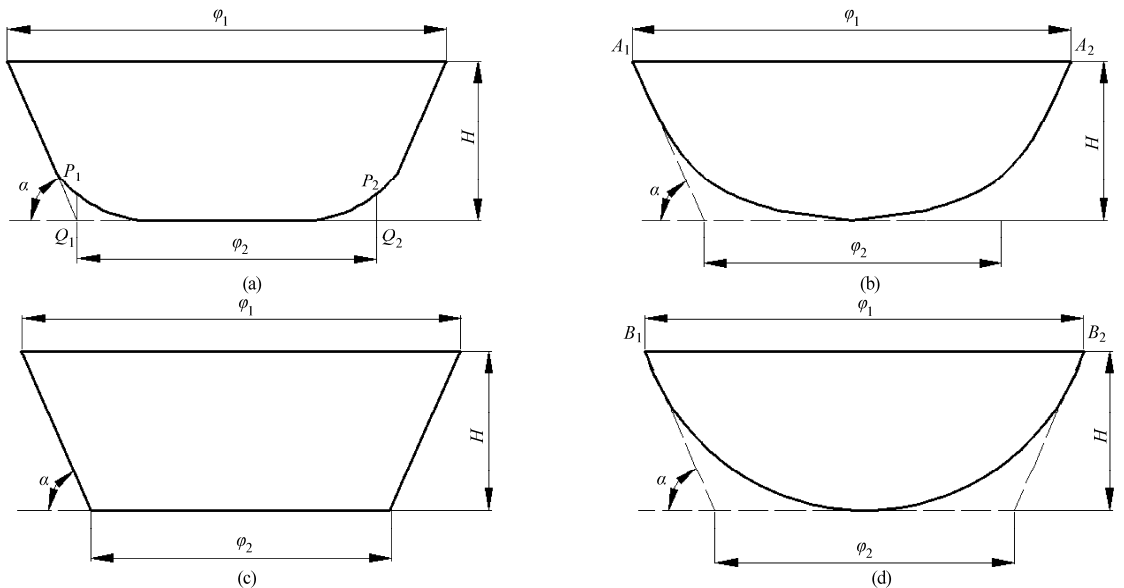


图 2 型孔正视图

Fig. 2 Front view of different shaped orifices

(a) 碗状型孔 (b) 坡状型孔 (c) 梯形型孔 (d) 半圆状型孔

2 mm。Ⅱ 优 8006 水稻,  $\varphi_1 = (10.14 \sim 10.53)$  mm,  $\varphi_2 = (7.88 \sim 8.19)$  mm; 由于水稻精量穴播一次性落种最佳粒数为 2 粒, 因此在计算  $H$  时按 2 倍计算, 得  $H = (5.0 \sim 5.2)$  mm。对于培两优 98 水稻,  $\varphi_1 = (10.4 \sim 10.8)$  mm,  $\varphi_2 = (8.08 \sim 8.40)$  mm,  $H = (5.0 \sim 5.2)$  mm, 因此定型孔  $\varphi_1 = 10.5$  mm,  $\varphi_2 = 8.1$  mm,  $H = 5$  mm。其中, 设计碗状型孔的边界轨迹为倾斜直线过渡到光滑曲线, 倾斜直线延长线与底部水平直线延长线夹角为  $\alpha$ , 两边界倾斜直线延长线与底部水平线延长线交点  $Q_1$ 、 $Q_2$  之间距离为  $\varphi_2$ , 过倾斜直线延长线与底部水平线延长线交点  $Q_1$ 、 $Q_2$  的垂线穿过过渡光滑曲线的中点  $P_1$ 、 $P_2$ ; 坡状型孔边界轨迹设计为“最速降线”<sup>[10]</sup>, 其第 1 点  $A_1$ 、 $A_2$  切线延长线与底部水平线延长线夹角为  $\alpha$ ; 梯形型孔边界轨迹为倾斜直线, 与底边夹角为  $\alpha$ , 半圆状型孔边界轨迹设计为圆弧曲线, 其第 1 点  $B_1$ 、 $B_2$  切线延长线与底部水平直线延长线夹角为  $\alpha$ 。

### 2.3 型孔中 $\alpha$ 角的计算

在型孔的设计中, 为保证各个朝向种子被取种勺挖起后可以顺利滑落到型孔底部, 以便落种, 提高排种性能, 需对  $\alpha$  角进行设计计算。

图 3 为根据种子在型孔中的实际运动情况抽象的下落模型示意图<sup>[11]</sup>, 将种子看为质点, 设种子在型孔顶端初速度为  $v_y$ , 下落高度为  $H$ , 到达型孔底端速度为  $v_x$ , 下落过程中受力如图 3 所示,  $F_N$  为型孔对谷物支持力,  $f$  为摩擦力,  $mg$  为种子自身重力。设种子所走轨迹抛物线为  $y = ax^2$ , 种子下落过程中轨迹微元记作  $ds$ , 种子下落过程中与型孔的摩擦角为  $\varphi$ 。则有  $mg \cos \alpha = F_N$ ,  $f = F_N \tan \varphi$ 。设摩擦力  $f$  在整个下落过程中做功为  $W$ , 则有

$$\tan \alpha = y' \quad \cos \alpha = -\frac{dx}{ds}$$

当  $y = H$  时,  $x = -\sqrt{\frac{H}{a}}$ , 则  $dw = f ds$ 。两边积分得

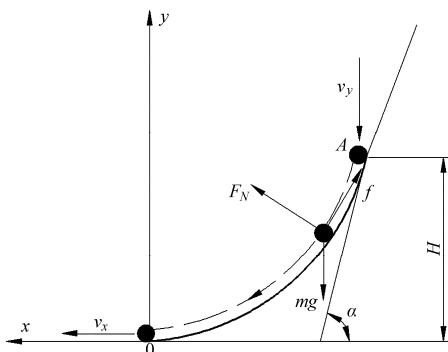


图 3 种子在型孔中的运动示意图

Fig. 3 Sketch of seed motion in different shaped orifices

$$W = \int f ds = \int mg \cos \alpha \tan \varphi ds = - \int_{-\sqrt{\frac{H}{a}}}^0 mg \tan \varphi dx = - mg \tan \varphi \sqrt{\frac{H}{a}} \quad (1)$$

根据能量守恒, 得

$$\frac{1}{2} m v_y^2 + mgH = \int f ds + \frac{1}{2} m v_x^2 \quad (2)$$

式(1)代入式(2)得

$$v_y^2 + 2gH = -2g \tan \varphi \sqrt{\frac{H}{a}} + v_x^2 \quad (3)$$

化简得

$$\frac{v_y^2 + 2gH - v_x^2}{2g \tan \varphi} = -\sqrt{\frac{H}{a}}$$

$$a = H \left( \frac{2g \tan \varphi}{v_y^2 - v_x^2 + 2gH} \right)^2$$

将  $a$  代入  $y = ax^2$  可得抛物线方程

$$y = H \left( \frac{2g \tan \varphi}{v_y^2 - v_x^2 + 2gH} \right)^2 x^2 \quad (4)$$

代入  $\tan \alpha = y'$  得

$$\tan \alpha = 2H \left( \frac{2g \tan \varphi}{v_y^2 - v_x^2 + 2gH} \right)^2 x$$

则  $\alpha = \arctan \left( 2H \left( \frac{2g \tan \varphi}{v_y^2 - v_x^2 + 2gH} \right)^2 x \right) \quad (5)$

通过对参数  $H$ 、 $v_y$ 、 $v_x$ 、 $x$  的设定和计算, 即可确定  $\alpha$  角。

以下对  $\alpha$  范围进行计算。假设理想状态种子滑落至型孔底端速度为零,  $v_x = 0$  m/s, 当取摩擦角最小值  $\varphi = 35^\circ$ , 试验中排种轴实际转速为 18 r/min, 转化为图 3 中型孔 A 点线速度为  $1.32\pi$  m/s。最大初速度为线速度的 1/4,  $v_y = 0.33\pi$  m/s。取落种轨迹  $x$  坐标最小值  $x = 3$  mm,  $H = 5$  mm,  $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup>, 代入式(5), 得  $\alpha_{\min} = 25.55^\circ$ 。当取摩擦角最大值  $\varphi = 45^\circ$ , 取最小初速度为零,  $v_y = 0$  m/s。取落种轨迹  $x$  坐标最大值为  $x = 5$  mm, 代入式(5)得  $\alpha_{\max} = 63.44^\circ$ 。所以  $\alpha$  的设计范围在  $25.55^\circ \sim 63.44^\circ$  之间。

### 2.4 气吹对落种的影响

在排种器中, 由于型孔形状较为特殊, 水稻种子粒小且形状较不规则, 需要的落种粒数更加精确, 因此落种口处用气吹取代传统的毛刷, 辅助清种, 以达到更好的落种效果。

由于型孔底部有两粒种子时, 播种效果最好, 因此对型孔中种子做受力分析时选取两粒种子。如图 4 所示,  $F$  为气吹对种子的作用力,  $F = pS$ ,  $p$  为气吹压力,  $S$  为种子受风力作用表面积,  $f_1$  为种子与型孔底面摩擦力,  $f_2$  为种子之间摩擦阻力,  $\mu$  为种子与

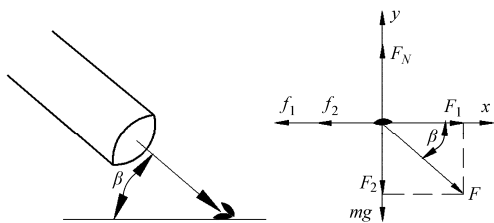


图 4 气吹种子受力示意图

Fig. 4 Sketch of force analysis

型孔摩擦因数。假设种子被吹落所需最小作用力为  $F_{\min}$ ，在  $x$  方向做受力分析，得

$$F_{\min} \cos\beta - f_1 - f_2 = 0 \quad (6)$$

$$f_1 = (mg + F \sin\beta) \mu \quad (7)$$

式(6)代入式(7)得

$$F \cos\beta - (mg + F \sin\beta) \mu - f_2 = 0 \quad (8)$$

化简得  $F(\cos\beta - \mu \sin\beta) = mg\mu + f_2$

根据实际落种情况

$$F(\cos\beta - \mu \sin\beta) > mg\mu + f_2 \quad (9)$$

通过测量水稻质量  $m_1 = 2.5 \times 10^{-5}$  kg, 两粒质量  $m = 5 \times 10^{-5}$  kg,  $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup>,  $\mu = 0.5$ ,  $f_2 = 6 \times 10^{-3}$  N。种子受气力作用表面积  $S = 1.4 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>, 当  $\beta = 40^\circ$ , 代入式(9), 得气吹压力合适范围内最小值为  $p = 0.942$  kPa。

### 3 室内试验

#### 3.1 试验材料与设备

试验所用杂交稻为江淮地区常用的培两优 98 与 II 优 8006。其参数如表 1 所示。

试验设备包括：黑龙江省农业机械工程科学研究院研制的 JPS-12 型计算机视觉排种器试验台，

表 1 供试验的杂交水稻参数

Tab. 1 Parameters of experimental hybrid rice

| 品种        | 平均粒  | 长宽  | 平均粒  | 含水   | 休止角   | 滑动摩    |
|-----------|------|-----|------|------|-------|--------|
|           | 长/mm | 比   | 厚/mm | 率/%  | / (°) | 擦角/(°) |
| 培两优 98    | 8.0  | 3:2 | 2    | 11.5 | 36    | 38     |
| II 优 8006 | 7.8  | 2:6 | 2    | 10.8 | 35    | 38     |

气吹异形孔匀轮式水稻穴播排种器。JPS-12 型排种器试验台能精确地检测种子粒距、穴距、合格指数、合格率和变异系数等指数，并能输出国家标准的试验数据和图表<sup>[12-13]</sup>。

#### 3.2 不同型孔对排种性能的影响

由 2.2 节可知，4 种型孔的边界轨迹各不相同，因此取种效果及排种性能也存在差异。为此，通过试验研究 4 种型孔的排种性能，设定种床带速度为 1.5 km/h，排种轴转速为 18 r/min，气吹角度选取 45°，气吹压力选取 1 kPa。分别更换 4 种型孔排种轮，对 2 种不同水稻品种做排种试验，每次试验总穴数为 50 穴，对每个型孔排种轮做 5 次试验取其平均值。试验后分析两种水稻在 4 种型孔排种状态下的穴距平均值<sup>[14-15]</sup>、穴距标准差、穴距变异系数、穴粒数合格率、穴距合格率、空穴率。

实际观察试验排种效果，其穴粒、穴距、穴径均可满足水稻穴播要求。每穴在 2~4 粒，穴距 140 mm 左右。如表 2 所示，2 种稻种在 4 个型孔下排种的各项指标均达穴播要求，对于穴距平均值指标，坡状型孔更加接近最优值。穴距标准差和穴距变异系数两项指标梯形型孔较好。穴粒合格率和穴距合格率两项指标坡状型孔较好。空穴率指标 4 个型孔均达到要求。

表 2 不同型孔对排种性能的影响

Tab. 2 Influences of different shaped on seeding-metering performance

| 稻种参数     | 碗状型孔      |        | 坡状型孔      |        | 梯形型孔      |        | 半圆状型孔     |        |
|----------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
|          | II 优 8006 | 培两优 98 | II 优 8006 | 培两优 98 | II 优 8006 | 培两优 98 | II 优 8006 | 培两优 98 |
| 穴距平均值/mm | 145.6     | 143.3  | 150.1     | 149.6  | 157.2     | 157.4  | 154.9     | 155.6  |
| 穴距标准差    | 34.0      | 32.5   | 43.7      | 43.1   | 32.2      | 33.4   | 41.5      | 42.2   |
| 穴距变异系数   | 21.9      | 22.7   | 29.1      | 28.8   | 20.5      | 21.2   | 26.8      | 27.1   |
| 穴粒合格率/%  | 94.0      | 93.6   | 94.5      | 94.2   | 94.1      | 93.9   | 92.5      | 92.2   |
| 穴距合格率/%  | 92.4      | 93.1   | 93.6      | 93.8   | 92.1      | 92.6   | 92.3      | 92.9   |
| 空穴率/%    | 0         | 0      | 0         | 0      | 0.6       | 0.6    | 0         | 0.6    |

#### 3.3 气吹压力对排种性能的影响

设定种床带速度为 1.5 km/h，排种轴转速为 18 r/min，型孔选取坡状型孔，气吹角度 45°，调节气吹压力 0.7~1.3 kPa，每次调节区间为 0.05 kPa，对 2 种杂交水稻做排种试验，每个气吹压力水平下试验 5 次。每次试验总穴数为 50 穴。从表 2 可得出 2 种水稻在 4 种型孔水平试验下穴距平均值、穴距

标准差、穴距变异系数、空穴率。这 4 项指标基本合格。因此，试验后只分析穴粒合格率和穴距合格率两项指标<sup>[16-19]</sup>。

由图 5 可知，2 种稻种排种的穴粒合格率和穴距合格率都随着气吹压力的增大而相应提高，在 1、1.05 kPa 时两项指标最好，随着气吹压力继续增大，两项指标平稳下降。其中气吹压力对穴距合格率影

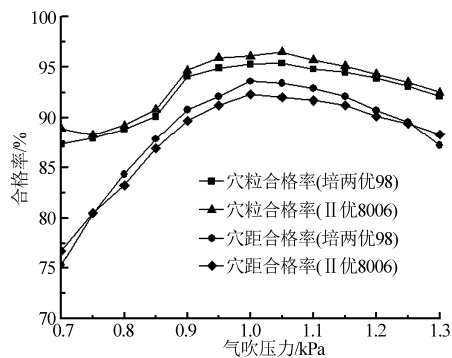


图5 气吹压力与播种性能曲线

Fig.5 Effect of air-blowing pressure on seeding performance

响相对较大<sup>[20]</sup>。2种稻种相比,II优8006的穴粒合格率好于培两优98,培两优98的穴距合格率在合适气压段好于II优8006。

### 3.4 气吹角度对排种器性能的影响

设定种床带速度为1.5 km/h,排种轴转速为18 r/min,型孔选取坡状型孔,调节气吹压力为1 kPa。如图6所示, $\beta$ 从 $20^\circ \sim 70^\circ$ 每次调节区间为 $5^\circ$ 。对2种杂交水稻做排种试验,每个水平下试验5次,每次试验总穴数为50穴。试验后分析穴粒合格率和穴距合格率两项指标。

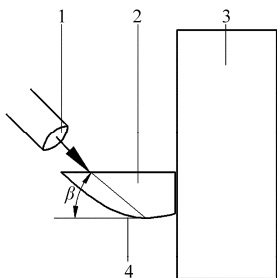
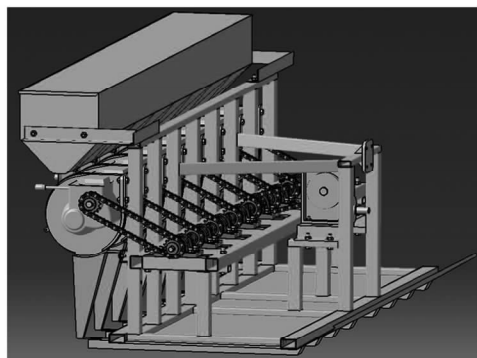


图6 气吹角度示意图

Fig.6 Sketch of air-blowing angle

1 气吹管 2. 型孔 3. 上落种口 4. 型孔底部水平切线

由图7可知,2种稻种排种的穴粒合格率和穴距合格率都随着气吹角度的增大而相应地提高,在 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 时两项指标最好,随着气吹压力继续增大,



(a)

两项指标下降。其中气吹角度对穴粒合格率影响相对较大。2种稻种相比,II优8006的穴粒合格率好于培两优98,培两优98的穴距合格率在合适气压段好于II优8006<sup>[21-22]</sup>。

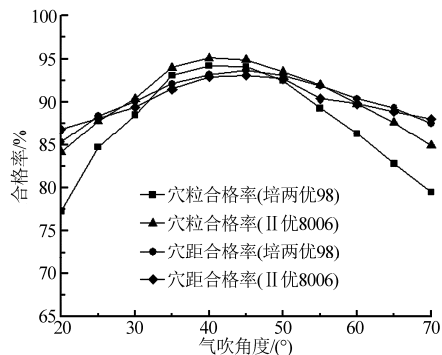


图7 气吹角度与播种性能曲线

Fig.7 Effect of air-blowing angle on

seed-metering performance

## 4 田间试验

该样机主要由直播机机身和原动机构成。原动机采用久保田乘坐式四轮驱动高速插秧机(型号NSPU-68C),能够适应水田作业,性能可靠,田间作业稳定性好,作业效率良好。机身包括浮板、支架、排种器、减速器、传动装置、输种管、链轮、链条、固定螺栓螺母等,水稻直播机三维结构和样机整机如图8所示。该直播机的原动机与直播机之间的动力衔接是通过久保田乘坐式四轮驱动高速插秧机后端的动力输出万向传动轴与直播机动力输入端(减速器的动力输入轴)之间的联轴器实现的,其结构如图8所示。

该排种器已经在试验台架上进行试验,试验的结果满足水稻穴播的农艺要求。田间试验所用材料为杂交稻培两优98(皖稻129)。稻种平均长8 mm,长宽比3.2。根据水稻种植的农艺要求,对水稻种子进行浸种露白处理,播种前晾干。试验时间是



(b)

图8 水稻直播机样机

Fig.8 Rice prototype planter

(a) 直播机三维结构图 (b) 水稻直播机样机

2014年5月初,试验地点在安徽农业大学农萃园的试验田。

试验时排种器调速手柄调整为穴距 160 mm,为了验证样机排播的穴距情况是否与设计值 160 mm 之间存在差异,测量了样机所排播的水稻种子每 6 穴之间的总距离,然后计算出每相邻两穴水稻种子之间平均穴距,进而计算出试验穴距与理论穴距之间的偏差。田间试验结果如表 3 所示。

表 3 样机试验粒距一致性结果

Tab.3 Prototype test seed spacing uniformity

| 测量组数 | 6 穴之间的总距离/mm | 平均穴距/mm | 偏差/%  |
|------|--------------|---------|-------|
| 1    | 817          | 163.4   | 2.125 |
| 2    | 809          | 161.8   | 1.125 |
| 3    | 794          | 158.8   | 0.750 |
| 4    | 815          | 163.0   | 1.875 |
| 5    | 796          | 159.2   | 0.500 |

从表 3 的分析结果可以看出,排种器的手柄调整为穴距 160 mm,样机排播的穴距情况与设计值 160 mm 之间存在很小的偏差(含测量误差和种子的飞窜误差),平均穴距在 160 mm 左右,与设计值相

吻合。试验中,排种器排种每穴 2~4 粒,2~3 粒占 85% 左右。该试验结果表明,试验样机传动可靠,设计参数基本准确。验证了试验样机设计参数的准确性、可靠性及整机传动的可行性。

## 5 结论

(1) 气吹异形孔勺轮式水稻穴播排种器可以很好的适应水稻种子精量穴播。设计的异型孔起到精量充种与储种的作用。气吹清种可以显著提高平均穴粒数水平,提高排种性能。

(2) 单因素试验结果表明,异形孔勺轮式排种器各排种指标均达到水稻穴播要求。穴粒合格率与穴距合格率均在 90% 以上。梯形型孔穴距标准差和穴距变异系数 2 项指标最好,坡状型孔穴粒合格率和穴距合格率两项指标最好。对于气吹压力与气吹角度两项指标,气吹压力范围在 1~1.05 kPa 之间,气吹角度在 40°~45°之间,排种效果最好。

(3) 通过样机田间试验,验证了排种器和直播机设计参数的准确性和整机传动的可行性,排种性能满足水稻穴直播的农艺要求。

## 参 考 文 献

- 曾山,汤海涛,罗锡文,等. 同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(20):12-19. Zeng Shan, Tang Haitao, Luo Xiwen, et al. Design and experiment of precision rice hill-drop drilling machine for dry land with synchronous fertilizing[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 12-19. (in Chinese)
- 吴文斌,杨鹏,周清波,等. 2005—2035 年全球农作物播种面积变化情景模拟研究[J]. 农业工程学报,2007,23(10):93-97. Wu Wenbin, Yang Peng, Zhou Qingbo, et al. Modeling sown area change for major crops during 2005—2035 at a global scale [J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(10): 93-97. (in Chinese)
- 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)
- 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)
- 罗锡文,杨洲,蒋恩臣,等. 抛掷成穴式水稻精量直播排种器实验[J]. 农业机械学报,2005,36(9):36-40. Luo Xiwen, Yang Zhou, Jiang Enchen, et al. Experimental research on precision rice direct-seeder with hill sowing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(9): 36-40. (in Chinese)
- 韩豹,申建英. 气吸式纸夹定位水稻精密育秧设备的研制[J]. 农业工程学报,2009,25(10):92-95. Han Bao, Shen Jianying. Design of air-suction rice precision nursing equipment with seed fixed by paper band[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 92-95. (in Chinese)
- 罗锡文,刘涛,蒋恩臣,等. 水稻精量穴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)
- 张波屏. 现代种植机械[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- 马成林. 现代农业工程理论与技术[M]. 长春:吉林科技出版社,1999.
- 老大中. 变分法基础[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):8-15. Qi Bing, Zhang Dongxing, Cui Tao. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 8-15. (in Chinese)
- 李成华,高玉芝,张本华. 气吹式倾斜圆盘排种器排种性能试验[J]. 农业机械学报,2008,39(10):90-94.

- Li Chenghua, Gao Yuzhi, Zhang Benhua. Experiment on dispensing performance of air-sweeping inclined plate seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 90-94. (in Chinese)
- 14 Gaikwad B B, Sirohi N P S. Evaluation of seed distribution uniformity of a multi-flight auger as a grain drill metering device[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(4): 535-543.
- 15 廖庆喜, 李继波, 覃国良. 气力式油菜精量排种器试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 40-47.  
Liao Qingxi, Li Jibo, Qin Guoliang. Experiment of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 40-47. (in Chinese)
- 16 Anantacher M, Prasanna G, V Kumar T Guruswamy. Neural network prediction of performance parameters of an inclined plate seed metering device and its reverse mapping for the determination of optimum design and operational parameters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 72(2): 87-98.
- 17 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 18 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 气吹式精密排种器工作压力试验研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 18-22.  
Liu Jia, Cui Tao, Zhang Dongxing, et al. Experimental study on pressure of air-blowing precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 18-22. (in Chinese)
- 19 王延耀, 李建东, 王东伟, 等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 54-58.  
Wang Yanyao, Li Jiandong, Wang Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 54-58. (in Chinese)
- 20 陶桂香, 衣淑娟, 汪春, 等. 水稻钵盘精量播种机充种性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 44-50.  
Tao Guixiang, Yi Shujuan, Wang Chun, et al. Performance experiments of bowl dish precision seeder for rice in filling processing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 44-50. (in Chinese)
- 21 杨明金, 邱兵, 杨玲, 等. 振动气吸式精密穴播机的排种性能[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 139-143.  
Yang Mingjin, Qiu Bing, Yang Ling, et al. Metering performance of the vibrational vacuum precision tray seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 139-143. (in Chinese)
- 22 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8-15.  
Chen Xuegeng, Zhong Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8-15. (in Chinese)

(上接第 65 页)

- 12 夏连明, 王相友, 耿端阳. 倾斜圆台型玉米精密排种器种子破损试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 67-71.  
Xia Lianming, Wang Xiangyou, Geng Duanyang. Corn seed damaging experiment in truncated cone precision metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 67-71. (in Chinese)
- 13 Jia Honglei, Ma Chenglin, Li Guangyu, et al. Combine drotilling-stubble-breaking-planting machine[J]. Soil & Tillage Research, 2007(96): 73-82.
- 14 Jia Honglei, Ma Chenglin, Tong Jin. Study on universal blade rotor for rototilling and stubble-breaking machine[J]. Soil & Tillage Research, 2007(94): 201-208.
- 15 Karayel D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(1): 121-125.
- 16 Gaikwad B B, Sirohi N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 322-329.
- 17 Yazgi A, Degirmencioglu A. Optimization of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347-356.
- 18 廖庆喜, 高焕文, 臧英. 玉米水平圆盘精密排种器型孔的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 109-113.  
Liao Qingxi, Gao Huanwen, Zang Ying. Experimental study on the cell of the horizontal plate precision meter for cornseed[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 109-113. (in Chinese)
- 19 廖庆喜, 高焕文. 玉米水平圆盘精密排种器排种性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 99-103.  
Liao Qingxi, Gao Huanwen. Experimental study on performance of horizontal disc precision meter for cornseed[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 99-103. (in Chinese)
- 20 于建群, 申燕芳, 牛序堂. 组合内窝孔精密排种器清种过程的离散元法仿真分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 105-109.  
Yu Jianqun, Shen Yanfang, Niu Xutang, et al. DEM simulation and analysis of the clearing process in precision metering device with combination inner-cell[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 105-109. (in Chinese)