

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.022

# 稻田气力式变量施肥机肥料喷撒器设计与试验

齐兴源<sup>1</sup> 周志艳<sup>2</sup> 林蜀云<sup>1</sup> 徐良<sup>1</sup>

(1. 贵州省山地农业机械研究所, 贵阳 550002; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 目前水稻施肥以离心圆盘式撒肥机为主,虽具有幅宽大、作业效率高的特点,但是变量控制精度差。为了满足水稻变量施肥的作业要求,设计了一种气力式变量施肥机,在满足幅宽要求的基础上,还能够实现在幅宽方向上的变量控制施肥。设计了用于该机的肥料喷撒器,对该喷撒器的肥料运动进行了理论分析,并对不同挡板结构的喷撒器进行气流流场模拟分析,对在不同转速下各排肥口的施肥量和不同挡板类型的施肥喷撒器在各自施肥范围内的施肥均匀性进行了试验。试验结果表明:转速对各排肥口的排肥量没有显著性影响,各排肥口的排肥量误差在均值的5%以内;转速和喷撒器的挡板结构类型对单一喷撒器施肥范围内的施肥均匀性具有显著性影响,以施肥均匀性变异系数为指标,排肥轮转速在30 r/min左右时,整体排肥均匀性变异系数优于其他转速;而圆锥形挡板喷撒器在所有转速下其排肥均匀性变异系数均优于其他挡板结构的喷撒器,且当排肥轮转速大于30 r/min时,该喷撒器的施肥均匀性变异系数小于8%。就挡板结构对喷撒器出口气流场的影响和施肥均匀性进行了比较研究,发现二者具有相似性,初步断定气流场对施肥均匀性具有一定影响。在实际作业过程中为了使单个排肥口的排肥均匀性更好,应当采用圆锥形挡板喷撒器,并且在确定作业区域的施肥量下,尽可能调整车速,使排肥轮转速达到30 r/min以上,以最大程度保证施肥区域的施肥均匀性。

**关键词:** 稻田; 变量施肥机; 气力式喷撒器; 外槽轮排肥; 肥料输送

**中图分类号:** S224.21      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0164-07

## Design of Fertilizer Spraying Device of Pneumatic Variable-rate Fertilizer Applicator for Rice Production

QI Xingyuan<sup>1</sup> ZHOU Zhiyan<sup>2</sup> LIN Shuyun<sup>1</sup> XU Liang<sup>1</sup>

(1. Guizhou Research Institute of Mountain Agricultural Machinery, Guiyang 550002, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Although it is the main machine in rice fertilizer with large width and high efficiency, centrifugal disc type fertilizer spreader is still with the problem of poor uniformity of fertilizer and difficult to realize the control of variable rate fertilization in width direction. In order to adapt to the development of precise agriculture and meet the requirements of rice variable fertilization at the same time, which could make fertilizer reduced and yields for rice increased, a kind of variable pneumatic fertilizer applicator was designed. The machinery not only met the requirements of width, but also achieved the variable rate fertilization in width direction. The fertilizer spraying device which designed for the machine of fertilizer was analyzed theoretically, and a simulation analysis of air flow field was also made for the spraying device with different baffle structures. What's more, relevant tests of fertilization uniformity were made for fertilizing amount of each row of fertilizer and fertilizer spraying device of different baffle types within their respective scope of fertilization at different rotational speeds. The results showed that revolving speed had no significant effect on fertilizing amount of each row of fertilizer, and fertilizing amount error of each row of fertilizer was within 5% of the average. However, revolving speed and baffle types of fertilizer spraying device had significant effect on fertilization uniformity within the scope of single spraying device, taking the fertilization variation coefficient as index, the whole fertilizer ejecting uniformity variation coefficient was superior to the other speed when the wheel speed was around

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 贵州山地小型农机具创新研发平台建设项目(黔科合条中补地【2015】4001)

作者简介: 齐兴源(1991—),男,助理工程师,主要从事农业机械化和精准农业研究,E-mail: 529155434@qq.com

通信作者: 徐良(1973—),男,高级工程师,主要从事农业机械、农业装备及设施研究,E-mail: 18167087@qq.com

30 r/min; on the other hand, the fertilization uniformity variation coefficient of the cone baffle spraying device was superior to the other spraying device whatever the wheel speed was, and when the wheel speed was more than 30 r/min, the fertilization uniformity variation coefficient of this spraying device was less than 8%. In addition, some comparison was made on the influence of different baffle structure on air flow field and fertilization uniformity, some similarities of them were found, but the conclusion whether the air flow field had significant effect on fertilization uniformity cannot be made. Above all, in order to make the single spraying device have the better fertilization uniformity in the process of actual operation, the cone baffle spraying device can be used, on the premise of knowing the weight of target area for fertilization, adjusting the speed of the machine to make the rotated speed of the wheel achieve 30 r/min or more, on this account, good fertilization uniformity can be obtained in this area.

**Key words:** rice field; variable rate fertilizer applicator; pneumatic sprayer; out-fluted of fertilizer apparatus; fertilizer transport

## 0 引言

施肥作业是农业生产中的关键环节,土壤养分的平衡是作物良好生长以及高产的关键<sup>[1-2]</sup>。随着精准农业的发展,对施肥作业的要求也越来越高<sup>[3-5]</sup>,精准变量施肥作业是精准农业发展的重要方向<sup>[6-7]</sup>。我国目前应用比较多的外槽轮式<sup>[8-9]</sup>和绞龙式施肥机<sup>[10]</sup>在同步施肥播种机上应用比较广泛,其排量精准,但幅宽小,通常用于施种肥<sup>[11]</sup>。离心圆盘式施肥机既可用于施底肥,也可用于施追肥,幅宽大,作业效率高,但存在均匀性差的问题<sup>[12-14]</sup>,且在作业过程中难以实现高精度实时变量施肥控制<sup>[15]</sup>,因而难以满足精准施肥的作业要求<sup>[16]</sup>。

精准施肥作业,尤其是施追肥,需要依据作物的生长情况和营养状况进行变量施肥<sup>[17-18]</sup>,要求在施肥作业过程中,施肥量能根据作物长势情况进行实时调整<sup>[19]</sup>,不仅要随着车速的变化<sup>[20-21]</sup>保证目标区域的施肥量精准<sup>[22-23]</sup>,还要在幅宽方向上保证目标区域的施肥量精准。为了解决同一时刻幅宽方向上需要不同施肥量的矛盾和幅宽与精准排肥的矛盾,设计了一种气力式变量施肥机,该施肥机以高速气流作为肥料输送动力,可以达到肥料远程定点输送的效果,具有在幅宽方向上实现不同目标点施肥量单独精准控制的特点,但是在实际使用过程中,虽然各个排肥口之间的肥料差异量很小,但是每个肥料出口的肥料喷撒器所喷撒的范围内,存在施肥均匀性较差的问题。

为了解决单个肥料喷撒器喷撒肥料均匀性的问题,本文在该机器的基础上,重点研究喷撒器的结构对施肥精准性与均匀性的影响,为后续精准变量施肥机整体结构优化提供依据。拟设计的气力式变量施肥机,借助流体动力实现在幅宽方向上肥料的远距离输送,且每个排肥口的排肥量误差较小,相对于离心圆盘式撒肥机,在保证幅宽的同时,能够通过改

变排肥轮转速更精准地调节排肥量,又能保证在每个单一喷撒器的小喷撒范围内,具有较好的施肥均匀性,具有良好的发展应用前景。

## 1 工作原理

### 1.1 整机工作原理

气力式变量施肥机整机结构示意图如图1所示,由分组排肥系统、肥料输送系统以及肥料喷撒系统、肥料喷撒器等构成。外槽轮排肥器将肥料排入肥料输送系统,在高速气流作用下,肥料沿管道进行定点输送,最终到达目标点由肥料喷撒系统喷出<sup>[24]</sup>。分组排肥系统中的外槽轮分为4组,每组排肥轮可单独控制,实现幅宽方向上的变量施肥作业。

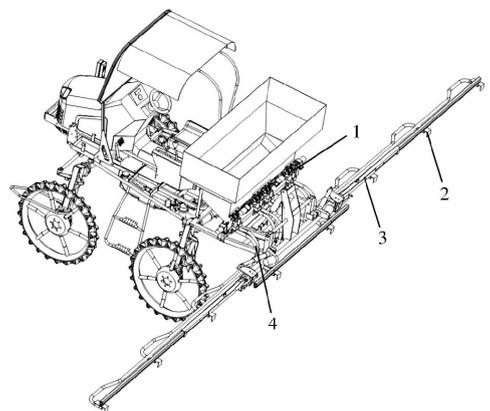


图1 稻田气力式变量施肥机结构示意图

Fig. 1 Schematic of fertilizer applicator

1. 分组排肥系统 2. 肥料喷撒器 3. 肥料喷撒系统 4. 肥料输送系统

如图1所示,当肥料从肥料喷撒器喷出时,形成一定幅宽,施肥的均匀性受到组间施肥量差异和单一喷撒器喷施宽度内差异两者的交叉影响,而肥料从喷撒器中喷撒出的运动轨迹,对单一喷撒器喷施宽度内的均匀性将产生重要影响。

### 1.2 肥料喷撒分析

气力式变量施肥机的最大特点是以高速气流作为动力,将肥料从排肥管中水平远距离输送<sup>[25]</sup>,实

现远距离的定点精量施肥。如图2所示,肥料在排肥管中加速,在出口处达到一定的速度被吹出<sup>[26]</sup>,在出口处设计一个具有挡板的喷撒器,高速的肥料碰撞在挡板上,由于肥料的形状不规则、出口的速度方向也不相同,并且排肥管出口不断有气流吹出碰到挡板后会在附近形成一个气流场,对肥料继续产生作用力。肥料在撞击挡板后以不同的运动轨迹散开后落入田面,并形成一定幅宽<sup>[27]</sup>。

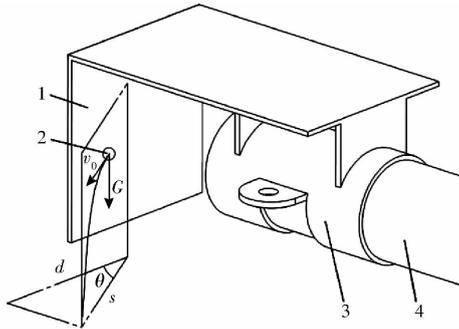


图2 肥料颗粒碰撞运动示意图

Fig.2 Schematic of fertilizer granular collision

1. 挡板板 2. 肥料颗粒 3. 夹紧装置 4. 排肥管

如图2所示,肥料在碰到挡板之后获得一个初速度 $v_0$ ,由于肥料形状不规则,碰撞入射角随机,因而在反弹后获得的速度方向也随机。受重力作用,肥料离开挡板后,若忽略风场的作用,肥料颗粒做平抛运动,则肥料落地点与喷撒器中心点的水平距离 $d$ 可以表示为

$$d = s \cos \theta \quad (1)$$

其中  $s = v_0 t$   $t = (2H/g)^{\frac{1}{2}}$   
式中  $s$ ——肥料颗粒的地面总位移, m

$t$ ——肥料下落时间, s

$\theta$ ——肥料落地轨迹平面与水平方向的夹角

$H$ ——肥料碰撞点距离地面的垂直高度, m

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$

从式(1)可看出,肥料在水平方向上的均匀性分布与水平距离 $d$ 有关,而影响水平距离 $d$ 的主要因素为肥料碰撞后的初速度 $v_0$ 的方向角。因此,如何优化设计挡板结构以获得最佳初速度 $v_0$ 是肥料喷撒器设计的关键。本文设计了4种不同挡板结构的喷撒器来改变肥料碰撞后的初速度 $v_0$ 的方向角,以从中找出较佳的肥料喷撒器设计方案。

## 2 影响肥料喷撒均匀性的因素分析

### 2.1 喷撒器挡板结构

从肥料碰撞挡板后的角度以及对气流场的影响考虑,设计了如图3所示4组不同挡板结构的喷撒器。

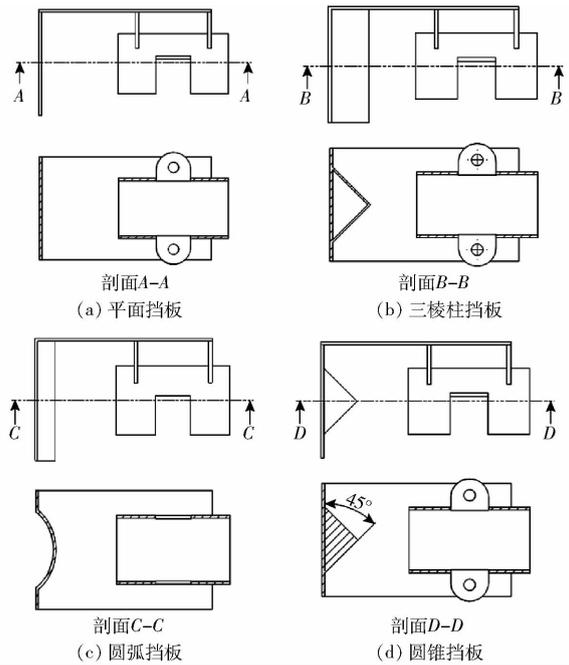


图3 不同挡板结构喷撒器

Fig.3 Different structures baffle spraying device

图3a所示为平面挡板喷撒器,即对挡板结构不做任何处理,肥料颗粒碰撞后的初速度角只受肥料颗粒自身形状与形成的气流场影响。为了使肥料碰撞挡板后向两侧散开更显著,设计了另外3种不同喷撒器。图3b所示为三棱柱挡板喷撒器,主要使肥料碰撞挡板之后能够更好地向两端散开,三棱柱两侧面形成的夹角为 $90^\circ$ ;图3c为圆弧挡板喷撒器,使肥料碰撞后不仅可以向两端散开,同时保证中间有足够的肥料,圆弧半径为25 mm;图3d为圆锥挡板喷撒器,使肥料碰撞后可向圆周方向散开,圆锥的锥角为 $90^\circ$ 。

### 2.2 喷撒器出口气流场

不同结构的喷撒器挡板,会对出口处的气流产生影响,形成不同的风场,排肥出口处排肥管内径为25 mm,通过卡箍紧固在喷撒器上,为了验证风场对于肥料喷撒的均匀性的影响,对上述4种喷撒器进行仿真分析,得到如图4所示结果,图中入口气流的边界条件定义为速度12 m/s,其余边界条件与环境压力相同。

分析图4中各喷撒器气流速度流迹线,其中图4a的平面挡板喷撒器气流在碰到挡板后向圆周方向散开,但有少部分气流被回弹,造成整体气流流向边界时,速度减小程度大于其他类型喷撒器,气流经阻挡分流后平均速度降为5~6 m/s;图4b三棱柱挡板喷撒器的气流经过三棱柱挡板被明显地分成两股向两侧流动,挡板正下方只有极少气流,气流经碰撞分流后平均速度为7~9 m/s;图4c中气流经过圆弧挡板后一部分气流被分为两侧流动,剩余部分向

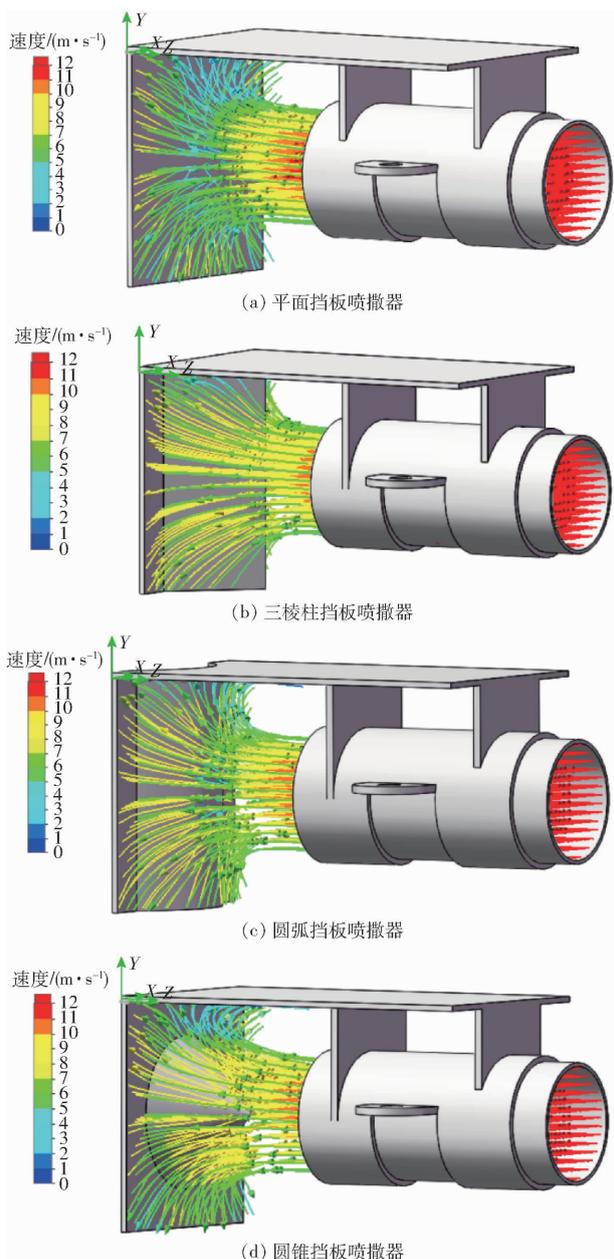


图4 不同挡板结构喷撒器气流速度流迹线

Fig. 4 Air velocity flow trace of different structures battle spraying device

挡板正下方或正上方流动,流场分布较均匀,气流经碰撞后平均速度为7~8 m/s;图4d中气流经过圆弧挡板后气流向四周散开,喷撒器上方气流受挡板影响速度减小明显,其余方向大小和密度分布比较均匀,气流经碰撞后平均速度为6~8 m/s。

通过流迹线看出,三棱柱挡板喷撒器对肥料向两边散开的效果最好,圆弧形挡板喷撒器次之,但存在中间量过少的问题。而平面挡板喷撒器和圆锥挡板喷撒器向四周散开得比较均匀,但平面挡板由于肥料的入射方向与挡板形成的入射角接近90°,因而有一部分会直接回弹,圆锥挡板的锥面与肥料入射方向形成的入射角接近45°,更有利于肥料向四周分散。

## 2.3 排肥量

在图4所有喷撒器的流场分析中,喷撒器出口处气流的速度均为12 m/s,由于在排肥过程中,管道流动的空气对肥料提供动力 $f$ ,相反地,肥料颗粒对气流有阻力作用,由伯努利方程得出管道中气流的动压方程<sup>[28]</sup>

$$\begin{cases} P = 0.5\rho v^2 \\ \rho = r/g \\ f = PA \end{cases} \quad (2)$$

式中  $P$ ——管道中气流动压,Pa

$\rho$ ——空气密度,g/L

$v$ ——风速,m/s

$r$ ——空气容重, $N/m^3$

$f$ ——肥料颗粒所受风力,N

$A$ ——肥料颗粒迎风面积, $m^2$

由式(2)得出,当排肥量增加时,同一时间内存在管道中的肥料密度增大,肥料颗粒的迎风总面积 $A$ 增大,相应增大了肥料对气流的阻力 $f$ ,从而使得管道中气流下降。喷撒器出口处气流的速度以及肥料碰撞挡板的速度相应减小,在挡板周围形成的气流场和肥料碰撞后的情况也随之改变,所以排肥量也是影响肥料喷撒均匀性的一个重要因素。

## 3 施肥均匀性试验测试

### 3.1 试验材料及方法

试验所用肥料为颗粒复合肥(氮磷钾质量比为15:6:15,总养分大于等于36%,深圳市芭田生态工程股份有限公司),容重为10 023  $N/m^3$ ,粒径2~4 mm颗粒大于90%。试验在华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室施肥试验平台进行。试验装置由四口气力式施肥试验样机、漩涡风机、排肥管、排肥喷撒器、喷撒器支架、排肥盒等组成。

试验分为2部分,首先在不同转速下测量4个排肥口在不同转速下的排肥量,分析排肥口之间的排肥量差异;其次,用规格为20 cm×27 cm排肥盒水平摆放如图5所示,通过测量不同转速下每个喷撒器下5个排肥盒中肥料的质量来考察喷撒器的施肥均匀性。

### 3.2 试验结果及分析

#### 3.2.1 不同排肥口的施肥均匀性

排肥口之间的排肥量均一性是气力式变量施肥机整体施肥均匀性的保证,是实现施肥变量控制的基础。为了考察排肥口和排肥轮转速对排肥均匀性的影响,以每个排肥口的排肥量为试验指标,测试不同转速下60 s内每个排肥口的排肥量,测试所用风

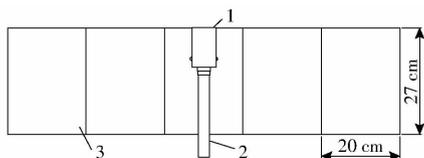


图5 排肥盒摆放示意图

Fig.5 Putting schematic of fertilizer box

1. 排肥喷撒器 2. 排肥管 3. 排肥盒

机为750 W 漩涡风机,恒流输出量 $110 \text{ m}^3/\text{h}$ ,排肥口出口风速 $12 \text{ m/s}$ ,每组数据取3次重复的平均值,试验结果如表1所示。

表1 不同转速下排肥口对应排肥量

Tab.1 Fertilizer sowing amount at different

rotational speeds g

排肥口 序号	排肥轮转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$			
	10	20	30	40
1	262.22	573.82	869.23	1 216.26
2	250.12	561.06	843.62	1 181.54
3	258.60	559.05	835.18	1 192.39
4	252.64	564.82	858.38	1 186.89

以对应转速下的4个出口排肥量的均值作为检验值,分别对不同转速下的排肥量进行单个样本 $t$ 检验,检验结果如表2所示。

表2 各排肥口排肥量 $t$ 检验结果Tab.2  $t$ -test result of each outlet's fertilizer sowing amount

转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	检验值	$t$	显著性	差分的95%置信区间	
				下限	上限
10	255.90	-0.002	0.999	247.12	264.67
20	564.69	0	0.999	554.28	575.10
30	851.60	0	1.000	827.47	875.74
40	1 194.27	0	1.000	1 169.90	1 218.64

检验结果显示,在不同转速下,不同排肥口之间的排肥量差异 $\text{sig.}$ 大于0.05,表明转速对不同排肥口之间的排肥量没有显著性差异。所测各出口的排肥量都在均值差分的95%置信区间内,对照实验室标准 NJ/T 2013—0608《气力式肥料变量播撒系统技术及评价方法》<sup>[29]</sup>,各排肥口的排肥量均匀性能满足设计要求。

### 3.2.2 不同挡板结构的喷撒器施肥均匀性

喷撒器喷施均匀性是喷撒器幅宽内肥料均匀性的保证,是实现精准施肥的最小单元,为了探究合适的喷撒器挡板设计,以排肥口下方的不同位置排肥盒中的肥料质量为试验指标,测试不同挡板结构喷撒器在不同转速下施完对应固定施肥总量后每个排肥盒中的肥料质量,测试所用风机为750 W 漩涡风机,恒流输出量 $110 \text{ m}^3/\text{h}$ ,排肥管出口风速 $12 \text{ m/s}$ ,每组数据取3次重复的平均值,试验结果如表3所示。

表3 不同转速下各喷撒器排肥盒肥料分布

Tab.3 Fertilizer sowing amount in different spraying device fertilizer box at different rotation speeds

转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	喷撒器 编号	排肥盒中肥料质量/g					变异系 数/%
		1号	2号	3号	4号	5号	
10	1	83.87	71.48	41.19	55.48	74.83	25.96
10	2	28.63	8.90	1.51	11.36	39.99	87.26
10	3	95.51	51.46	27.42	30.66	72.25	51.82
10	4	65.89	64.51	40.60	54.13	51.66	18.68
20	1	111.28	95.50	64.62	81.03	97.91	19.79
20	2	48.92	15.88	5.94	15.76	58.14	79.68
20	3	77.05	52.70	30.53	53.04	96.92	41.11
20	4	82.87	89.00	66.01	87.41	76.84	11.61
30	1	156.53	130.80	94.94	118.66	138.87	17.99
30	2	78.81	24.83	10.16	24.66	86.96	77.93
30	3	127.24	102.78	60.89	89.84	115.96	25.84
30	4	143.41	142.99	118.39	133.97	128.52	7.87
40	1	117.76	98.85	71.18	80.77	104.83	19.75
40	2	66.78	17.05	4.78	18.30	66.94	85.61
40	3	160.63	122.11	71.99	112.35	137.47	27.18
40	4	190.60	193.71	173.23	188.34	182.38	4.36

其中,编号1喷撒器为平面挡板喷撒器,2为三棱柱挡板喷撒器,3为圆弧挡板喷撒器,4为圆锥挡板喷撒器,排肥盒编号如图5所示,由左向右依次为1号至5号,变异系数计算公式为<sup>[30]</sup>(喷撒器距离地面垂直高度为80 cm)

$$C_v = (S_D / \bar{X}) \times 100\% \quad (3)$$

其中

$$\bar{X} = \sum X_i / N$$

$$S_D = \left[ \sum (X_i - \bar{X})^2 / (N - 1) \right]^{1/2}$$

式中  $\bar{X}$ ——同一喷撒器1号至5号排肥盒中肥料质量的平均值,g

$N$ ——排肥盒个数

$S_D$ ——样本标准差,g

$C_v$ ——变异系数,%

$X_i$ ——排肥盒中肥料质量

以每个喷撒器在不同转速下以排肥盒编号为横坐标,以排肥盒肥料质量为纵坐标,得到图6。

喷撒器所处的位置为3号排肥盒的正上方,图6可以反映出喷撒器在水平方向上施肥量的分布曲线。图6a所示平面挡板喷撒器在喷撒器正下方肥料量最少,向水平两端依次增多;图6b所示三棱柱挡板喷撒器在喷撒器正下方肥料几乎趋近于零,向水平两侧肥料量明显增加;图6c所示圆弧挡板喷撒器与平面挡板喷撒器施肥类型较为相似;图6d所示圆锥挡板喷撒器虽然在喷撒器正下方肥料量最少,但向水平两端变化较为平缓,整体变化范围较小。

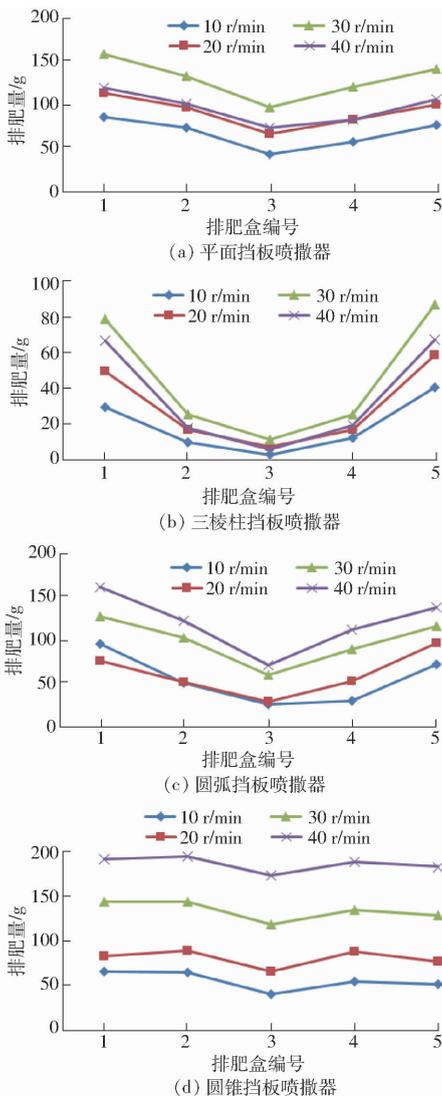


图6 不同挡板喷撒器排肥盒肥料分布  
Fig. 6 Fertilizer sowing amount in different spraying device fertilizer box

为了进一步比较各喷撒器施肥均匀性程度,确定最佳排肥轮转速,以喷撒器类型和排肥轮转速为影响因素,以施肥变异系数为指标进行双因素方差分析,分析结果如表4所示。

表4 转速和喷撒器类型方差分析

Tab. 4 Variance analysis of rotate speed and different spraying devices

参数	转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )				喷撒器编号			
	10	20	30	40	1	2	3	4
变异系数 均值/%	45.93	38.05	32.41	34.23	20.87	82.62	36.49	10.63
F	5.51				154.89			
Sig.	0.020				0			

由表4可看出,转速对施肥均匀性变异系数产生显著影响,喷撒器类型对施肥均匀性变异系数产生极显著影响。为了进一步分析不同转速和不同类型喷撒器对施肥均匀性影响效果,分别对转速-变异

系数和喷撒器类型-变异系数做图表分析,结果如图7所示。

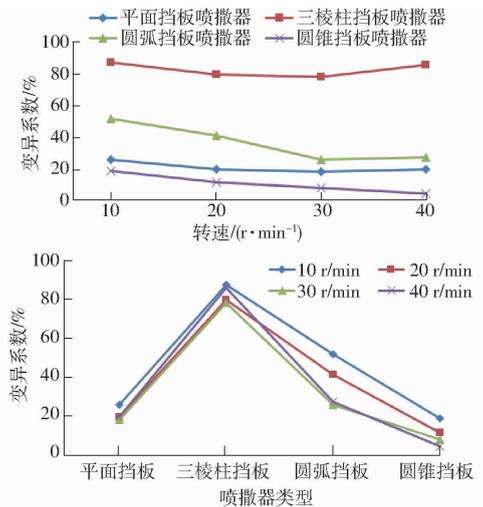


图7 转速和喷撒器类型与变异性系数关系

Fig. 7 Relationship of variable coefficient with rotate speed and different spraying devices

从表4施肥均匀性变异系数均值和图7来看,其分析结果具有一致性,转速对均匀性影响效果从好到差依次为:30、40、20、10 r/min,喷撒器类型对均匀性影响效果从好到差依次为:圆锥挡板喷撒器、平面挡板喷撒器、圆弧挡板喷撒器、三棱柱挡板喷撒器。

由分析结果可知,选用圆锥挡板喷撒器可以使单个喷撒器喷施范围内的施肥均匀性程度变得更好,而当排肥轮转速在30 r/min以上时,圆锥挡板喷撒器的施肥均匀性变异系数小于8%。在实际进行变量施肥的控制过程中,为了尽可能保证施肥的均匀性,在得知目标施地区施肥量的情况下,可以将机具前进速度调整至合适值,使排肥轮转速尽量增大,从而使施肥均匀性提高。

将结果与图4中气流在喷撒器出口形成的流场对比,发现喷撒器出口形成的流场分布规律与施肥均匀性分布具有相似性,流场的形成与挡板的结构有关,而肥料颗粒的均匀性分布也与挡板结构有关,但二者的分布相似性无法确定气流场是否会对肥料颗粒的均匀性分布产生显著性影响,有待进一步研究。

## 4 结论

(1)排肥轮转速和不同挡板结构的喷撒器对施肥均匀性都具有显著性影响,以施肥均匀性变异系数为指标,排肥轮转速在30 r/min左右时,整体排肥均匀性变异系数优于其他转速;而圆锥挡板喷撒器在所有转速下的排肥均匀性变异系数均优于其他挡板结构的喷撒器;且当排肥轮转速大于30 r/min时,

该喷撒器的施肥均匀性变异系数小于8%。在田间试验过程中,应当选择合适的车速使排肥轮转速尽量达到30 r/min以上,以保证良好的施肥均匀性。

(2)排肥轮转速对各排肥口之间的排肥量差异没有显著性影响,各排肥口的排肥量误差均在均值的5%误差范围之内,对照实验室标准 NJ/T 2013—

0608《气力式肥料变量播撒系统技术及评价方法》<sup>[31]</sup>,各排肥口的排肥量均匀性能满足设计要求。

(3)挡板结构对喷撒器出口气流场和肥料颗粒的均匀性分布具有相似性,但目前尚无法确定气流场是否会对肥料颗粒的均匀性分布产生显著性影响,有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 王吉亮,王序俭,曹肆林,等.中耕施肥机械技术研究现状及发展趋势[J].安徽农业科学,2013,41(4):1814-1816.  
WANG Jiliang, WANG Xujian, CAO Silin, et al. The status and development trend of cultivator and fertilizer mechanization technique[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(4): 1814-1816. (in Chinese)
- 2 王伟妮,鲁剑巍,何予卿,等.氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J].中国水稻科学,2011,26(6):645-653.  
WANG Weini, LU Jianwei, HE Yuqing, et al. Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 26(6): 645-653. (in Chinese)
- 3 杨志杰.精准变量施肥技术研究与应用[J].河北农机,2013,39(5):60-62.
- 4 张涛,赵洁.变量施肥技术体系的研究进展[J].农机化研究,2010,32(7):233-236.  
ZHANG Tao, ZHAO Jie. Research progress of technology system of variable-rate fertilization [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(7): 233-236. (in Chinese)
- 5 孙国祥,陈满,汪小岳,等.变量施肥机关键技术研究现状分析[J].江苏农业科学,2014,42(2):333-339.
- 6 孟志军,赵春江,刘卉,等.基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J].江苏大学学报(自然科学版),2009,30(4):338-342.  
MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, LIU Hui, et al. Development and performance assessment of map-based variable rate granule application system[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2009, 30(4): 338-342. (in Chinese)
- 7 段洁利,李君,卢玉华.变量施肥机械研究现状与发展对策[J].农机化研究,2011,33(5):245-248.  
DUAN Jieli, LI Jun, LU Yuhua. Research status and development countermeasure of variable rate fertilization machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5): 245-248. (in Chinese)
- 8 田耘,赵亚祥.变量施肥机外槽轮排肥器的试验研究[J].农业与技术,2014,34(5):52-53.
- 9 吕昊.外槽轮排肥器优化设计新方法研究[D].长春:吉林大学,2014.  
LÜ Hao. A new kind of method for the optimized design of outer groove-wheel fertilizer apparatuses[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- 10 张睿,王秀,赵春江,等.链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(6):20-25.  
ZHANG Rui, WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer spreader with conveyor chain [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 20-25. (in Chinese)
- 11 谢宇峰,许剑平,梁玉成.高速宽幅气送式集排精量播种施肥机的研制[J].农业科技与装备,2013(5):19-21.  
XIE Yufeng, XU Jianping, LIANG Yucheng. Design of high-speed broad width pneumatic conveying concentration feeding precision seeding and fertilizing machine[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2013(5): 19-21. (in Chinese)
- 12 吴辉,王秀,张晋国,等.圆盘式施肥机抛撒模型中圆盘转速的试验研究[J].农机化研究,2007,29(7):136-139.  
WU Hui, WANG Xiu, ZHANG Jinguo, et al. Study on speed of spinning disc in model of spinning disc spreader[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(7): 136-139. (in Chinese)
- 13 杨志杰.圆盘式变量施肥机的发展及其关键技术介绍[J].农业机械,2007(5B):67.
- 14 任素芬.2SF-18型离心式液压撒肥机[J].新疆农机化,2005,21(3):33-34.
- 15 芦新春,陈书法,杨进,等.宽幅高效离心式双圆盘撒肥机设计与试验[J].农机化研究,2015,37(8):100-103.  
LU Xinchun, CHEN Shufa, YANG Jin, et al. Design and experiment on double-disc spreader with wide breadth and highly efficiency[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 100-103. (in Chinese)
- 16 施继红,孟宪章,冯伟志,等.水平双圆盘式有机肥撒肥器的试验研究[J].甘肃农业科技,2015(6):16-19.  
SHI Jihong, MENG Xianzhang, FENG Weizhi, et al. Research and test on horizontal double disc manure spreader[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2015(6): 16-19. (in Chinese)
- 17 牛晓颖,钱东平,王秀,等.基于归一化植被指数的变量施肥控制系统研究[J].河北农业大学学报,2005,28(2):94-98.  
NIU Xiaoying, QIAN Dongping, WANG Xiu, et al. Research on control system of variable rate fertilizer applicator in precision agriculture based on NDVI[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2005, 28(2): 94-98. (in Chinese)
- 18 吴才聪,马成林,张书慧,等.基于GIS的精确农业合理采样与施肥间距研究[J].农业机械学报,2004,35(2):80-83.  
WU Caicong, MA Chenglin, ZHANG Shuhui, et al. Research on reasonable distances of soil sampling and fertilizing based on GIS in precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 80-83. (in Chinese)

- ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment of wind driven rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 14-21. (in Chinese)
- 17 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57-68. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170307&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170307&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007.
- LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation analysis and experiment of gas solid two phase flow in gas transmission pipeline with rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57-68. (in Chinese)
- 18 AKHSHIK S, BEHZAD M, RAJABI M. CFD-DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 127: 229-244.
- 19 周祖锴. 农业物科学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.
- 20 吕昊. 基于离散元法的排肥器数字化设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- LÜ Hao. Study on digital design method of fertilizer distributor based on discrete element method[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 21 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 22 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- 23 MISHRA B K. A review of computer simulation of tumbling mill by the discrete element method; part-contact mechanics[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 71: 73-93.
- 24 MORRISON R D, SHI F, WHYTE R. Modelling of incremental rock breakage by impact—for use in DEM models[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(3): 303-309.
- 25 JJAYASUNDARA C T, YANG R Y, YU A B, et al. Effects of disc rotation speed and media loading on particle flow and grinding performances in a horizontal stirred mill[J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 96(1): 27-35.

(上接第 170 页)

- 19 陈广大, 夏凯, 陈思睿, 等. 基于单片机的电动变量施肥装置控制系统设计[J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 106-109.
- CHEN Guangda, XIA Kai, CHEN Sirui, et al. The design of controlling system for variable rate fertilizer applicator based on microcontroller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 106-109. (in Chinese)
- 20 王秀, 赵春江, 孟志军, 等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 114-117.
- WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 114-117. (in Chinese)
- 21 杨仁全, 王纲, 周增产, 等. 精密施肥机的研究与应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊2): 197-199.
- YANG Renquan, WANG Gang, ZHOU Zengchan, et al. Research and application of precise fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp.2): 197-199. (in Chinese)
- 22 陈书法, 张石平, 孙星钊, 等. 水田高地隙自走式变量撒肥机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 16-21.
- CHEN Shufa, ZHANG Shiping, SUN Xingzhao, et al. Design and experiment of self-propelled high-ground-clearance spreader for paddy variable-rate fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 16-21. (in Chinese)
- 23 耿向宇, 李彦明, 苗玉彬, 等. 基于 GPRS 的变量施肥机系统研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 164-167.
- GENG Xiangyu, LI Yanming, MIAO Yubin, et al. Development of variable rate fertilizer applicator based on GPRS[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 164-167. (in Chinese)
- 24 齐兴源, 周志艳, 杨程, 等. 稻田气力式变量施肥机关键零部件的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 20-26.
- QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key components of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 20-26. (in Chinese)
- 25 KIM Y J, KIM H J, RYU K H, et al. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(4): 498-510.
- 26 ISHOLA T A, YAHYA A, SHARIFF A R M, et al. A novel variable rate pneumatic fertilizer applicator[J]. Instrumentation Science & Technology, 2014, 42(4): 369-384.
- 27 SKRODZKA E, BOLESŁAW Bogumił. Comparison of single and dual-phase lock-in amplifiers for photoacoustic spectroscopy[J]. Instrumentation Science & Technology, 2014, 42(4): 469-474.
- 28 林建忠. 流体力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- 29 NJ/T 2013—0608 气力式肥料变量播撒系统技术及评价方法[S]. 2013.
- 30 吴辉. 圆盘式施肥机抛撒试验系统开发与撒肥规律研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2007.
- WU Hui. Development and distribution study on the spreading test system for a spinner spreader[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2007. (in Chinese)