

# 锥盘式颗粒肥撒施机构抛撒性能分析与试验

董向前, 宋建农<sup>\*</sup>, 张军奎, 康小军, 王继承

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了提高颗粒肥撒施的均匀性和一致性, 该文设计了一种锥盘式撒肥机构, 通过对锥盘式撒肥机构工作性能的分析, 建立了肥料颗粒的受力方程。通过撒肥试验, 研究喂入区大小、甩盘转速、甩肥高度对撒肥区域内肥料分布规律的影响。试验结果表明: 喂入区大小对肥料颗粒的横向幅宽分布影响较大, 对纵向分布影响较小, 施肥作业中合理的喂入角为  $75^\circ$ ; 随着甩盘转速的增加, 有效施肥区域的横向幅宽和纵向距离均逐渐增大, 而且施肥的均匀性和一致性也不断提高, 合理转速为 600 r/min; 施肥高度对施肥幅宽分布和一致性没有显著影响。研究结果可为颗粒肥撒施机的设计提供参考。

**关键词:** 农作物, 肥料, 机构, 旋转锥盘, 肥料撒施

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.004

中图分类号: S224.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0033-08

董向前, 宋建农, 张军奎, 等. 锥盘式颗粒肥撒施机构抛撒性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 33-40.

Dong Xiangqian, Song Jiannong, Zhang Junkui, et al. Working performance and experiment on granular fertilizer spreader with cone disk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 33-40. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

水稻是中国种植面积最大、单产最高、总产量最多的粮食作物, 在粮食安全中占有极其重要地位<sup>[1]</sup>。苗期施肥是水稻生产过程中的重要环节, 对保障水稻高产起到重要作用<sup>[2-3]</sup>。传统的水稻追肥方式为人工撒施, 劳动强度大, 施肥不均, 化肥易过度使用, 造成环境污染。而机械化精量施肥<sup>[4-5]</sup>, 效率成倍提高, 肥料撒施均匀, 减少化肥流失和挥发, 保护自然环境, 实现农业的可持续发展<sup>[6]</sup>。

近年来, 在精量施肥机械化技术方面已经取得了一些成果, 开发出不同的施肥机具, 如东北农业大学研制的液态变量深施肥机, 通过控制节流阀控制调节喷液量<sup>[7-11]</sup>; 吉林大学研制的变量施肥机, 以步进电机驱动排肥器调节排肥量<sup>[12]</sup>。但是液态变量施肥机不适合中国以固态肥料为主的情况<sup>[13-14]</sup>; 现有的变量施肥机都采用圆盘式撒肥机构<sup>[15-17]</sup>, 一般会在圆盘上装有 2~4 个叶片, 叶片形状有直线形

和曲线形, 叶片安装方式有径向式、前倾式和后倾式。相关的理论研究均是在假定撒肥盘是非圆锥的、叶片是径向的基础上的得到的肥料颗粒运动方程<sup>[18-22]</sup>, 这些理论研究对颗粒肥料撒施机的进一步优化起到关键作用。

肥料撒施机具有作业效率高和撒施均匀等特点, 尤其适合大面积区域作业。由于开展撒肥机性能研究的试验量大且较复杂, 因此相关的研究较少, 而撒肥机构作为抛撒机的重要部件其工作性能直接决定着施肥的作业效果。为了提高颗粒肥撒施的均匀性和一致性, 设计一种锥盘式撒肥机构, 本文对肥料颗粒的运动特性以及在施肥区域内的分布规律进行分析与试验, 以为颗粒肥撒肥机的设计提供参考。

## 1 结构与工作原理

本文设计的颗粒肥撒施机构主要由机架、肥箱、排肥器、喂料斗、甩盘、护罩和直流电机等组成, 总体结构如图 1 所示。

撒肥机构的锥形甩盘由盘体、导轨和凸台组成, 甩盘盘体部分近似为旋转抛物面, 由一条水平线段和抛物线组成的母线绕固定轴旋转一周形成的, 如图 2 所示。导轨轨迹线是以  $R_1$  为基圆半径的渐开螺旋线, 断面为三角形, 共 16 条, 与盘体做成一体。喂入区是一个内径  $R_0$ , 外径  $R_1$  的圆环面, 内有径向导轨, 其断面和渐开螺旋线导轨的断面相同, 数量一致。凸台位于甩盘中央, 呈锥形。甩盘外缘半径为  $R_2$ , 高度

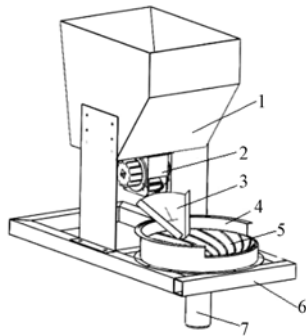
收稿日期: 2013-06-11 修订日期: 2013-08-05

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203059-5)

作者简介: 董向前(1984—), 男, 汉族, 安徽阜阳人, 博士, 农业工程学会会员(E040100099M), 主要从事农业机械设计研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: dxq0558@126.com

<sup>\*</sup>通信作者: 宋建农(1961—), 男, 汉族, 河北藁城人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械与农业装备研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: songjin@cau.edu.cn

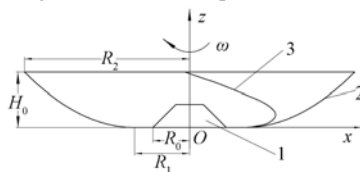
为  $H_0$ , 材料采用 ABS 工程塑料。设计时  $R_0=40$  mm,  $R_1=60$  mm,  $R_2=180$  mm,  $H_0=60$  mm。



1. 肥箱 2. 排肥器 3. 喂料斗 4. 护罩 5. 甩盘 6. 机架 7. 直流电机  
1. Fertilizer box 2. Fertilizer feed 3. Feeding hopper 4. Distributor housing 5. Cone disk 6. Spreader framing 7. DC motor

图 1 撒肥机构结构简图

Fig.1 Structure of spreader device



1. 凸台 2. 盘体 3. 导轨

1. Circular cone 2. Cone disk 3. Rail

注:  $R_0$  为喂入区内径, mm;  $R_1$  为喂入区外径, mm;  $R_2$  为甩盘半径, mm;  $H_0$  为甩盘高度, mm;  $\omega$  为甩盘角速度, rad/s, 下同。

Note:  $R_0$  is internal diameter of feeding area, mm;  $R_1$  is outer diameter, mm;  $R_2$  is radius of cone disk, mm;  $H_0$  is height of cone disk, mm;  $\omega$  is angular velocity of cone disk, rad/s; The same as below.

图 2 甩盘结构简图

Fig.2 Structure of cone disk

撒肥工作原理: 肥料颗粒在重力作用下沿喂料斗落入喂入区, 在甩盘高速旋转作用下肥料颗粒很快获得初速度并沿渐开螺旋线导轨做加速运动。肥料颗粒运动到甩盘边缘时已获得较高的速度, 以该速度在空中做斜抛运动, 直至肥料颗粒落到地面完成撒肥作业过程。

## 2 颗粒肥运动特性分析

### 2.1 甩盘最低转速确定

影响肥料颗粒运动的因素很多。为了便于理论分析, 假定肥料颗粒为一刚性质点, 质量为  $m$ , 甩盘作匀速转动, 忽略肥料颗粒之间的相互作用和空气阻力影响。

肥料颗粒垂直落入喂入区, 在甩盘高速旋转作用下肥料颗粒开始运动, 此时肥料颗粒进入沿径向导轨运动阶段, 其水平方向的受力状况如图 3 所示。

肥料颗粒能在甩盘上运动的条件是

$$F \geq f \quad (1)$$

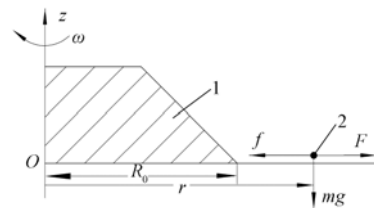
$$F = m\omega^2 r \quad (2)$$

$$f = \mu mg \quad (3)$$

$$\omega = \frac{2\pi\lambda}{60} \quad (4)$$

式中,  $F$  为肥料颗粒所受的离心力, N;  $f$  为肥料颗

粒与甩盘内表面摩擦力沿径向方向分力, N;  $m$  为肥料颗粒的质量, kg;  $\mu$  为甩盘与肥料颗粒之间的摩擦系数;  $r$  为肥料颗粒距旋转中心轴的距离, mm;  $\omega$  为甩盘角速度, rad/s;  $\lambda$  为甩盘转速, r/min。



1. 凸台 2. 肥料颗粒

1. Circular cone 2. Fertilizer particle

注:  $r$  为肥料颗粒到旋转中心距离, mm;  $f$  为摩擦力, N;  $F$  为离心力, N。Note:  $r$  is distance from fertilizer particle to rotation axis, mm;  $f$  is friction force, N;  $F$  is centrifugal force, N.

图 3 肥料颗粒水平受力分析

Fig.3 Horizontal stress analysis of fertilizer particle

可求得

$$\lambda \geq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{\mu g}{r}} \quad (5)$$

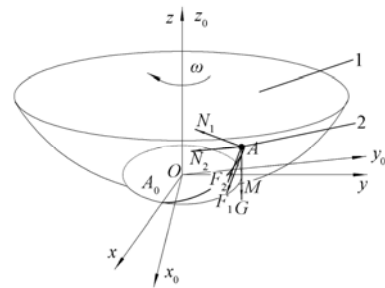
在甩盘喂入区内  $R_0 \leq r \leq R_1$ , 为了确保肥料颗粒能全部顺利地被甩盘抛撒出去, 应有  $r=R_0$ , 则上式变换为

$$\lambda \geq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{\mu g}{R_0}} \quad (6)$$

从式 (6) 可以看出, 甩盘甩出全部肥料的最低转速与摩擦系数  $\mu$  和喂入区圆环的内径  $R_0$  相关。在撒肥甩盘直径一定时,  $R_0$  越小, 肥料颗粒的加速度越大, 越容易获得高的抛出速度。

### 2.2 肥料颗粒在甩盘上受力分析

肥料颗粒在甩盘上沿导轨运动时的受力情况如图 4 所示。



1. 甩盘 2. 肥料颗粒

1. Cone disk 2. Fertilizer particle

注:  $x_0y_0z_0$  为静坐标系;  $xyz$  为动坐标系;  $O$  为坐标原点;  $A$  为肥料颗粒, 质量为  $m$ , kg;  $G$  为肥料颗粒所受重力, N;  $N_1$  为盘体对肥料颗粒的法向作用力, N;  $N_2$  为导轨对肥料颗粒法向作用力, N;  $F_1$  和  $F_2$  分别为肥料颗粒在甩盘内表面和导轨面所受的摩擦力的切向分力, N。

Note:  $Ox_0y_0z_0$  is static coordinate system;  $Oxyz$  is moving coordinate system;  $O$  is coordinate origin;  $A$  is fertilizer particle, it mass is  $m$ , kg;  $G$  is the gravity of the fertilizer granules, N;  $N_1$  is the normal force of rotating disc to fertilizer granules, N;  $N_2$  is the normal force of guide to fertilizer granules, N;  $F_1$  is the tangential force of friction force between rotating disc inner surface and fertilizer granules, N;  $F_2$  is the tangential force of friction force between guide surface and fertilizer granules, N.

图 4 颗粒肥料受力分析

Fig.4 Stress analysis of fertilizer particle

肥料颗粒在  $A$  点时所受到的合外力为  $F$ , 则

$$F = N_1 + N_2 + F_1 + F_2 + G \quad (7)$$

由牛顿第二运动定律可知

$$F = ma_a \quad (8)$$

设肥料颗粒在  $A$  点时绝对加速度为  $a_a$ ,  $\text{m/s}^2$ ; 科氏加速度为  $a_c$ ,  $\text{m/s}^2$ ; 相对切向加速度为  $a_{rt}$ ,  $\text{m/s}^2$ ; 相对法相加速度为  $a_{rn}$ ,  $\text{m/s}^2$ 。

由加速度合成定理质点的绝对加速度<sup>[24-24]</sup>为

$$a_a = a_e + a_c + a_{rn} + a_{rt} \quad (9)$$

其中

$$a_e = -\omega^2 R_1 e(\theta - \varphi) \quad (10)$$

$$a_c = -\frac{2\omega v_r}{B} g(\theta - \varphi) \quad (11)$$

$$a_{rn} = \frac{C v_r^2}{\theta R_1 B^3} \eta \quad (12)$$

$$a_{rt} = \frac{v_r}{\theta R_1 B} \cdot \frac{dv_r}{d\theta} \xi \quad (13)$$

$$B = \sqrt{1 + \frac{4a^2 R_1^2 (P-1)^2}{P^2}} \quad (14)$$

$$C = \sqrt{\frac{4a^2 R_1^2 (P-1)^2}{P^2} + \frac{4a^2 \theta^2 R_1^2}{P^6} + 1} \quad (15)$$

$$P = \sqrt{1 + \theta^2} \quad (16)$$

$$a = \frac{H_0}{(R_2 - R_1)^2} \quad (17)$$

联立以上方程, 可得肥料颗粒的受力方程

$$N_1 \mathbf{n} - N_2 \boldsymbol{\eta} - \mu(N_1 + N_2) \boldsymbol{\xi} - mg \mathbf{k} = m \left[ \begin{aligned} & -\omega^2 R_1 e(\theta - \varphi) + \omega^2 \theta R_1 g(\theta - \varphi) - \\ & \frac{2\omega v_r}{B} g(\theta - \varphi) + \frac{C v_r^2}{\theta R_1 B^3} \eta + \\ & \frac{v_r}{\theta R_1 B} \cdot \frac{dv_r}{d\theta} \xi \end{aligned} \right]$$

式中,  $v_r$  为肥料颗粒在  $A$  点的相对速度,  $\text{m/s}$ ;  $e$ 、 $g$ 、 $k$  分别为在静坐标中以  $O$  点建立的球坐标的单位向量;  $\boldsymbol{\eta}$ 、 $\boldsymbol{\xi}$  分别为肥料颗粒在  $A$  点的主法线方向以及切线方向的单位向量;  $\mathbf{n}$  为旋转抛物面母线法向方向单位向量;  $\theta$  为肥料颗粒从  $A_0$  点运动到  $A$  点在静坐标中转动的角度,  $(^\circ)$ ;  $\varphi$  为甩盘相对于机架的转动的角度,  $\varphi = \omega t$ ,  $(^\circ)$ 。

### 2.3 抛撒距离分析

肥料脱离甩盘后在空中作斜抛运动运动, 如图 5 所示。

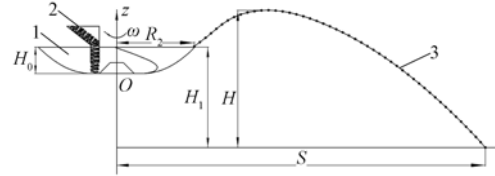
假定肥料颗粒脱离甩盘时在 3 个方向的速度分别为  $v_{x0}$ 、 $v_{y0}$  和  $v_{z0}$ ,  $\text{m/s}$ ; 则

$$H = H_1 + \frac{v_{z0}^2}{2g} \quad (18)$$

$$T = \frac{v_{z0}}{g} + \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (19)$$

$$S = R_2 + T \sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2} \quad (20)$$

式中,  $H$  为甩肥高度,  $\text{mm}$ ;  $T$  为肥料颗粒从脱离甩盘到落地所需时间,  $\text{s}$ ;  $S$  为抛出距离,  $\text{mm}$ 。



1. 甩盘 2. 肥料颗粒 3. 肥料颗粒的运动轨迹

1. Cone disk 2. Fertilizer particle 3. Trajectory of fertilizer particle

注:  $H_0$  为甩盘高度,  $\text{mm}$ ;  $H_1$  为甩盘距地面高度,  $\text{mm}$ ;  $H$  为甩肥高度,  $\text{mm}$ ;  $S$  为甩肥距离,  $\text{mm}$ 。

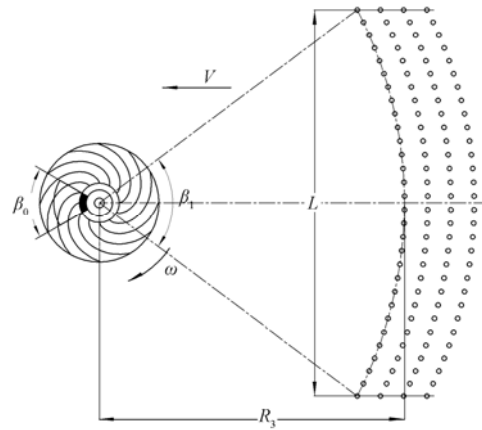
Note:  $H_0$  is height of cone disk,  $\text{mm}$ ;  $H_1$  is height of cone disk above ground,  $\text{mm}$ ;  $H$  is maximum height of fertilizer particle,  $\text{mm}$ ;  $S$  is distance a particle travels from cone disk,  $\text{mm}$ .

图 5 肥料颗粒抛出后的运动轨迹

Fig.5 Trajectory of fertilizer particle

### 2.4 抛撒幅宽分析

单个肥料颗粒从甩盘上甩出后, 将在空中做斜抛运动直至落到地面, 肥料颗粒落到地面的区域大小, 决定着撒肥甩盘的施肥范围。当大量肥料颗粒同时进入喂入区时, 经甩盘抛撒到地面, 形成一定的施肥区域, 即撒肥宽度  $L$  如图 6 所示。



注:  $\beta_0$  为喂入角度,  $(^\circ)$ ;  $\beta_1$  为抛出角度,  $(^\circ)$ ;  $V$  为前进速度,  $\text{m/s}$ ;  $L$  为撒肥宽度,  $\text{mm}$ ;  $R_3$  为撒肥面半径,  $\text{mm}$ 。

Note:  $\beta_0$  is feeding angle,  $(^\circ)$ ;  $\beta_1$  is spread angle,  $(^\circ)$ ;  $V$  is forward speed,  $\text{m/s}$ ;  $L$  is spread width,  $\text{mm}$ ;  $R_3$  is spread radius,  $\text{mm}$ .

图 6 肥料颗粒分布示意图

Fig.6 Schematic of fertilizer distribution

施肥区域的大小与肥料喂入区的大小有关, 从理论上讲, 肥料颗粒的喂入角  $\beta_0$  等于甩盘的抛出角  $\beta_1$ , 在确定喂料斗的喂入扇形角时, 要参考具体的施肥幅宽和施肥距离, 一般取  $45^\circ \leq \beta_0 \leq 90^\circ$ 。即肥料颗粒的抛出区域为一个扇形环面, 环面的内径为  $R_3$ , 则

$$\beta_0 = \beta_1 \quad (21)$$

$$L = 2R_3 \sin \frac{\beta_1}{2} \quad (22)$$

实际工作中,由于碰撞、肥料颗粒特性等原因,会有一部分肥料颗粒偏离理论的扇形环面,从而导致实际施肥区域和理论施肥区域出现一定程度的偏差。

### 3 抛撒性能试验

为了探讨撒肥甩盘的施肥特点以及肥料颗粒在施肥区域内的分布规律,在自行研制的室内抛撒试验装置上,开展颗粒肥抛撒性能试验。

#### 3.1 试验设计

试验中所用颗粒肥料为安徽砀山绿源生态肥料有限公司生产的哥巴德牌氮素(无机态氮质量分数 $\geq 16\%$ ),肥料的千粒质量为 13.6 g,试验地点为中国农业大学工学院地下室。

选定喂入角 $\beta_0$ 、转速 $\lambda$ 、施肥高度 $h$ 为试验因素,探讨各因素对甩盘施肥规律的影响,从中选取最佳参数组合。

试验采用定点收集的方法对抛撒出的肥料颗粒进行收集,收集区域为一个 $x$ 方向长度为 5.22 m, $y$ 方向长度为 4.02 m 的矩形,在收集区内均匀布置收集盒,收集盒尺寸为 16 cm $\times$ 24 cm。 $x$ 方向为横向施肥幅宽方向,该方向上每列收集盒间隔为 30 cm,共摆放 12 列; $y$ 方向为纵向施肥距离,该方向上每行收集盒间隔为 30 cm,共摆放 8 行。甩盘位于横向施肥幅宽的中间,距离第 1 行收集盒 0.5 m,整个收集区域内收集盒的总数为 96 个,每组试验重复 3 次。

#### 3.2 数据处理

抛撒式施肥机和其他形式的施肥机相比,横向工作幅宽较大,因此在横向幅宽上就会产生一定的施肥误差。通常用均匀度变异系数来衡量施肥误差的大小,施肥机的均匀度变异系数越小,横向幅宽上施肥一致性程度越高,反之施肥一致性程度越低。横向施肥均匀度变异系数用 $C_v$ 表示,其计算方法如下

$$C_v = \frac{SD}{\bar{m}} \quad (23)$$

式中, $SD$ 为标准差; $\bar{m}$ 为绝对平均值,g。

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (24)$$

( $i=1,2,\dots,n$ )

$$\bar{m} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j m_i \quad (25)$$

式中, $j$ 为收集盒的数量; $m_i$ 为第 $i$ 个收集盒中收集的肥料质量,g。

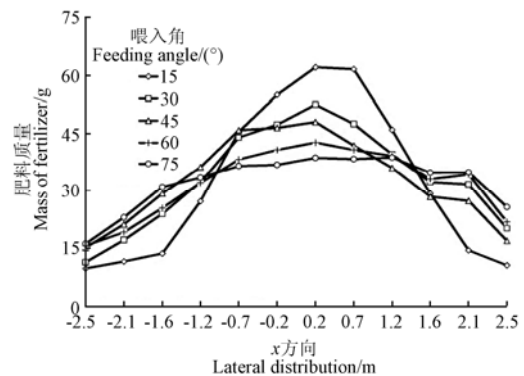
## 4 试验结果与分析

### 4.1 喂入角对施肥分布的影响

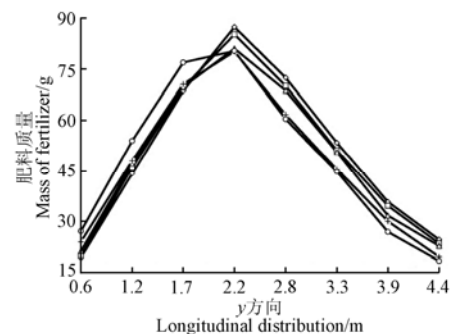
试验中保持施肥高度 $h=75$  cm,甩盘转速 $\lambda=600$  r/min,施肥总量 $Q=1.0$  kg 不变,喂入角 $\beta_0$ 从 $15^\circ \sim 75^\circ$ 变化,增量为 $15^\circ$ 。

在横向幅宽方向( $x$ 方向)各列肥料累加曲线的,肥料颗粒主要落在 $-2.5 \sim 2.5$  m 区域内,如图 7a 所示。当喂入角 $\beta_0=15^\circ$ 时,收集到的肥料质量有 84.5%集中在 $-1.1 \sim 1.6$  m 区域内,在整个施肥区域内肥料颗粒的分布差异较大,均匀度变异系数为 54.3%,施肥的一致性较差。随着喂入区的增大,施肥横向施肥幅宽逐渐增大,变异系数逐渐变小,施肥一致性逐渐提高。当 $\varphi=75^\circ$ 时,施肥幅宽为 5.0 m 左右,变异系数为 12.2%,施肥一致性较好。

$y$ 方向各列肥料累加和曲线如图 7b,随着喂入区的增大,肥料颗粒纵向分布变化比较缓慢,肥料颗粒的抛撒距离主要集中在 $1.1 \sim 3.5$  m 范围内,施肥类型近似为三角型。



a. 喂入角对施肥横向分布的影响  
a. Effect of feeding angle on fertilization lateral distribution



b. 喂入角对施肥纵向分布的影响  
b. Effect of feeding angle on fertilization longitudinal distribution  
注: 施肥高度 $H_1=75$  cm, 转速 $\lambda=600$  r/min, 施肥总量 $Q=1.0$  kg 不变。  
Note: Height of cone disk is 75 cm; Speed of cone disk is 600 r/min; Quantity of fertilizer is 1.0 kg.

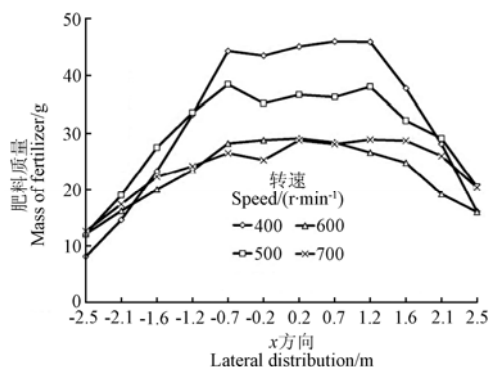
图 7 喂入角对施肥分布的影响  
Fig.7 Effect of feeding angle on fertilization distribution

## 4.2 施肥转速对施肥分布的影响

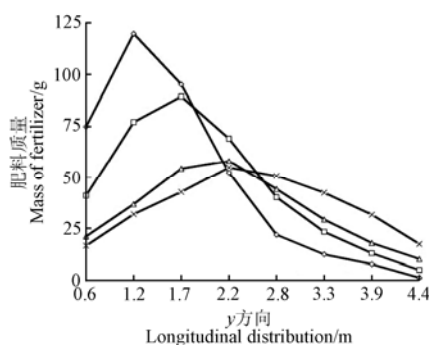
试验中保持施肥高度  $H_1=75\text{ cm}$ , 喂入角  $\beta_0=75^\circ$ , 施肥总量  $Q=1.0\text{ kg}$  不变, 甩盘转速  $\lambda$  从  $400\sim 700\text{ r/min}$  变化, 增量为  $100\text{ r/min}$ 。

$x$  方向各列肥料累加和曲线如图 8a, 肥料颗粒从甩盘中抛出后主要落在  $-2.5\sim 2.5\text{ m}$  区域内。当甩盘转速  $n=400\text{ r/min}$  时, 收集的肥料质量的  $86.7\%$  集中在  $-1.6\sim 1.8\text{ m}$  区域, 变异系数为  $32.9\%$ , 在整个施肥区域内施肥的一致性较差。随着甩盘转速的提高, 有效施肥幅宽不断增大, 均匀度变异系数逐渐变小, 施肥一致性不断提高。当甩盘转速  $\lambda$  为  $600$  和  $700\text{ r/min}$  时, 收集的肥料颗粒集中区域在  $-2.5\sim 2.5\text{ m}$ , 均匀度变异系数分别为  $11.2\%$  和  $13.8\%$ , 在整个施肥区域内施肥的一致性良好。

$y$  方向各列肥料累加和曲线如图 8b, 肥料集中区域发生移动的情况比较明显, 随着转速不断提高, 集中区域从距离从  $1.06\text{ m}$  逐步移动到  $2.24\text{ m}$ , 集中区域的施肥量逐渐减少, 集中区域的纵向宽度逐步增大, 施肥的纵向一致性也逐步提高。



a. 转速对施肥横向分布的影响  
a. Effect of speed on fertilization lateral distribution



b. 转速对施肥纵向分布的影响  
b. Effect of speed on fertilization longitudinal distribution

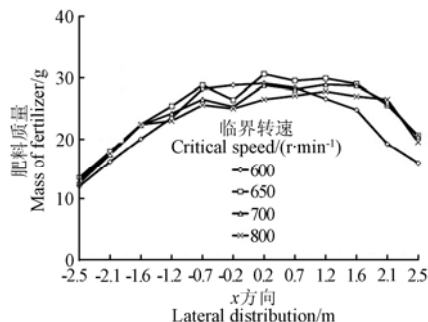
注: 施肥高度  $H_1=75\text{ cm}$ , 喂入角  $\beta_0=75^\circ$ , 施肥总量  $Q=1.0\text{ kg}$  不变。  
Note: Height of cone disk is  $75\text{ cm}$ ; Feeding angle is  $75^\circ$ ; Quantity of fertilizer is  $1.0\text{ kg}$ .

图 8 转速对施肥分布的影响

Fig.8 Effect of speed on fertilization distribution

如图 9 所示, 当甩盘转速从  $600\text{ r/min}$  变化到  $800\text{ r/min}$  时, 肥料颗粒在各转速下的横向幅宽分布

规律十分相近, 各转速下的分布曲线几乎重合, 横向施肥的均匀度变异系数都小于  $15\%$ , 施肥的一致性较好, 因此从横向施肥幅宽的角度看, 肥料分布曲线的变化程度是以转速  $\lambda=600\text{ r/min}$  为分界线, 即为极限转速。当甩盘转速大于  $600\text{ r/min}$  时, 各曲线的变化程度非常小, 几乎处于稳定状态; 当甩盘转速小于  $600\text{ r/min}$  时, 各曲线的变化程度很明显, 曲线的差异性较大。



注: 施肥高度  $H_1=75\text{ cm}$ , 喂入角  $\beta_0=75^\circ$ , 施肥总量  $Q=1.0\text{ kg}$  不变。  
Note: Height of cone disk is  $75\text{ cm}$ ; Feeding angle is  $75^\circ$ ; Quantity of fertilizer is  $1.0\text{ kg}$ .

图 9 临界速度对施肥分布的影响

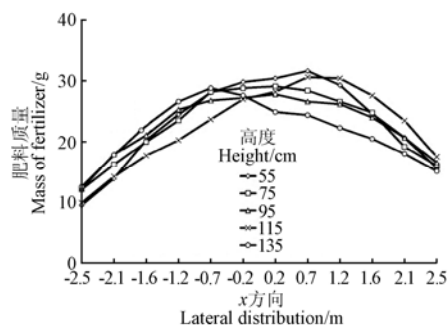
Fig.9 Effect of critical speed on fertilization distribution

## 4.3 施肥高度对施肥分布的影响

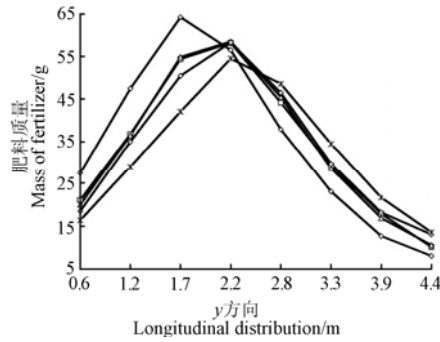
试验中保持甩盘转速  $\lambda=600\text{ r/min}$ , 喂入角  $\beta_0=75^\circ$ , 施肥总量  $Q=1.0\text{ kg}$  不变, 施肥高度  $h$  从  $55\sim 135\text{ cm}$  变化, 增量为  $20\text{ cm}$ 。

$x$  方向各列肥料累加和曲线图如图 10a, 肥料在  $-2.5\sim 2.5\text{ m}$  区域内, 随着施肥高度  $h$  的不断提高, 抛撒的有效幅宽变化不明显, 不同高度的施肥一致性相差不大。

$y$  方向各列肥料累加和曲线图如图 10b, 随着施肥高度  $h$  不断增大, 肥料集中区域从距  $1.7\text{ m}$  逐步增大到  $2.24\text{ m}$ , 集中区域的施肥量逐渐减少, 纵向宽度逐步增大, 施肥的纵向一致性也逐步提高。当  $h$  达到一定高度后, 随着  $h$  的增加, 集中区域距离变化趋于稳定, 主要原因是空气阻力的影响。随着肥料颗粒斜抛运动时间的增加, 肥料颗粒的水平速度逐渐减小, 竖直方向的速度逐渐增大, 肥料颗粒在水平方向运动距离的增加也逐渐减少。



a. 施肥高度对横向施肥分布的影响  
a. Effect of height on fertilization lateral distribution



b. 施肥高度对施肥纵向分布的影响

b. Effect of height on fertilization longitudinal distribution

注: 转速  $\lambda=600$  r/min, 喂入角  $\beta_0=75^\circ$ , 施肥总量  $Q=1.0$  kg 不变。Note: Speed of cone disk is 600 r/min; Feeding angle is  $75^\circ$ ; Quantity of fertilizer is 1.0 kg.

图 10 施肥高度对施肥分布的影响

Fig.10 Effect of height on fertilization distribution

#### 4.4 优化参数试验

通过上述试验结果分析, 确定了较优的试验参数, 试验中喂入角  $\beta_0=75^\circ$ , 甩盘转速  $\lambda=600$  r/min, 施肥高度  $h=95$  cm, 施肥总量  $Q=1.0$  kg。为了检验该参数是否符合实际作业要求, 需要进行验证试验。

撒肥甩盘作业时, 大部分肥料颗粒在甩盘高速旋转作用下沿导轨连续运动, 最后被抛撒到空中作斜抛运动落入预定的区域范围内。但是, 也会有一些肥料颗粒由于碰撞或其它一些原因运动轨迹会发生一定偏移, 落入区域也相应地会偏离预定区域, 由于这部分肥料所占的比例较小, 因此在试验时可以忽略。从图 11 可以看出, 撒肥甩盘的有效施肥幅宽为 4.5 m 左右。

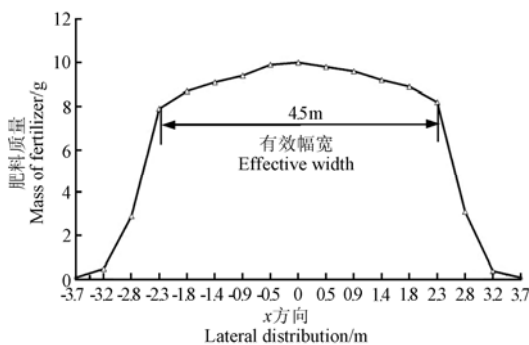
注: 转速  $\lambda=600$  r/min, 喂入角  $\beta_0=75^\circ$ , 施肥高度  $h=95$  cm, 施肥总量  $Q=1.0$  kg 不变。Note: Speed of cone disk is 600 r/min; Feeding angle is  $75^\circ$ ; Height of cone disk is 95 cm; Quantity of fertilizer is 1.0 kg.

图 11 横向施肥分布

Fig.11 Lateral distribution

横向施肥均匀度变异系数是衡量施肥机施肥效果的重要指标, 常用的抛撒式施肥机要求横向施肥均匀度变异系数  $C_v \leq 20\%$ , 圆盘式撒肥机进行田间作业时横向施肥均匀度变异系数  $C_v$  为  $10\% \sim 15\%$ 。按照横向施肥均匀度变异系数的计算方法,

得出室内试验时的横向施肥均匀度变异系数  $C_v=7.5\%$ , 不仅能够满足使用要求, 而且施肥一致性要比圆盘式施肥机好。

## 5 结 论

1) 喂入区大小对肥料颗粒的横向幅宽分布影响较大, 对肥料颗粒的纵向分布影响较小, 施肥作业中的合理的喂入角为  $75^\circ$ 。

2) 随着转速的增加, 有效施肥区域的横向幅宽和纵向距离施肥距离均不断增大, 施肥均匀性和一致性也不断提高, 合理转速为 600 r/min。

3) 施肥高度对肥料的幅宽分布和施肥一致性没有显著影响。

4) 试验中确定的最优参数: 喂入角为  $75^\circ$ , 甩盘转速为 600 r/min, 施肥高度为 95 cm。试验结果表明, 锥盘式施肥机构的施肥一致性比圆盘式要好。

### [参 考 文 献]

- [1] 牛盾. 我国农业机械化的新形势和水稻生产机械化问题[J]. 农业工程学报, 2000, 16(7): 7—10.  
Niu Dun. New situation of agricultural mechanization and the development of paddy production mechanization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(7): 7—10. (in Chinese with English abstract)
- [2] 倪四良. 当前水稻施肥中存在的问题及解决对策[J]. 作物研究, 2008(2): 124—126.
- [3] 刘武, 邹应斌, 程兆伟. 水稻施肥方法研究进展[J]. 作物研究, 2006(5): 509—513.
- [4] 林昌华, 唐群峰, 唐树梅. 自动变量施肥技术的研究与应用现状[J]. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(2): 76—79.  
Lin Changhua, Tang Qunfeng, Tang Shumei. The research and application prospect of precise fertilization techniques[J]. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 2006, 12(2): 76—79. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李世成, 秦来寿. 精准农业变量施肥技术及其研究进展[J]. 世界农业, 2007(3): 57—59.
- [6] 谷洁, 高华. 提高化肥利用率技术创新展望[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2): 17—20.  
Gu Jie, Gao Hua. Prospect on the technical innovation to increase fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(2): 17—20. (in Chinese with English abstract)
- [7] 段洁力, 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(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(5): 245—248. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王金武, 纪文义, 冯金龙, 等. 液态施肥机的设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 157—159. Wang Jinwu, Ji Wenyi, Fen Jinlong, et al. Design and experimental investigation of the liquid fertilizer application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 157—159. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 114—117. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张书慧, 马成林, 吴才聪, 等. 一种精确农业自动变量施肥技术及其实施[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 129—131. Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Wu Caicong, et al. Development and application of a variable rate fertilizer applicator for precise agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 129—131. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 16—21. (in Chinese with English abstract)
- [12] 宋卫堂, 封俊, 刘亚佳. 地轮驱动离心式化肥撒布机的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 39—42. Song Weitang, Feng Jun, Liu Yajia. Design and performance test of a centerifugal type of fertilizer broadcaster with land-wheel driven[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 39—42. (in Chinese with English abstract)
- [13] 姬长英, 吕正洋, 汤拯东, 等. 1GH-6 型水田化肥深施机应用效果分析[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 34—37. Ji Changying, Lü zhengpan, Tang Zhengdong, et al. Effect of application of fertilizer deep distributor model 1GH-6 on rice growing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 34—37. (in Chinese with English abstract)
- [14] 马旭, 马成林, 桑国旗, 等. 变量施肥机具的设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 50—53. Ma Xu, Ma Chenglin, Sang Guoqi, et al. Design of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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(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(7): 136—139. (in Chinese with English abstract)
- [16] Olieslagers R, Ramon H, De Baerdemaeker J. Calculation of fertilizer distribution patterns from a spinning disc spreader by means of simulation model[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(2): 137—152.
- [17] Pitt R E, Farmer G S, Walker L P. Approximating equations for rotary distributor spread patterns[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(6): 1544—1552.
- [18] Grif fis C L, Ritter D W, Matthews E J. Simulation of rotary spreader distribution patterns[J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(1): 33—37.
- [19] Hofstee J W, Huisman W. Handling and spreading of fertilizers part 1: Physical properties of fertilizer in relation to particle motion[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, 47: 213—234.
- [20] 秦朝民, 王序俭, 刘君辉. 2SF-10 离心式撒肥机[J]. 新疆农机化, 2004(2): 25—26.
- [21] 汤爱民. QYSF2-1 前置式施肥机[J]. 新疆农机化, 2008(3): 24.
- [22] 张李娴, 吕新民. 摆管式撒肥机的研究设计[J]. 西北农业学报, 2009, 18(4): 372—374. Zhang Lixian, Lü Xinmin. Research and design on fertilizer spreading machines of swing tube type[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(4): 372—374. (in Chinese with English abstract)
- [23] 魏文军, 宋建农, 王立臣. 水稻抛秧机秧苗运动分析及参数确定[J]. 农业机械学报, 1998, 29(4): 46—50. Wei Wenjun, Song Jiannong, Wang Lichen. Analysis of motion and parameters for the rice cast transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(4): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [24] 魏文军, 张绍英, 宋建农. 旋转锥盘式水稻抛秧机工作参数优化设计[J]. 农业工程学报, 1998(12): 108—112. Wei Wenjun, Song Jiannong, Wang Lichen. Optimization design of operational parameters for the rice seedling thrower with cone-pan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1998(12): 108—112. (in Chinese with English abstract)

## Working performance and experiment on granular fertilizer spreader with cone disk

Dong Xiangqian, Song Jiannong<sup>\*</sup>, Zhang Junkui, Kang Xiaojun, Wang Jicheng  
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The fertilization in seedling stage is an important link in paddy production, which plays an important role in ensuring the high yield of rice. The traditional way of fertilizing is manual fertilization of high labor intensity. Granular fertilizers are the most common type of agricultural fertilizer, since they are easily produced, transported, and applied. In order to be effective, however, granular fertilizers must be properly handled and distributed. However, manual fertilization has several disadvantages, such as heavy labor intensity, poor uniformity, and so on. The poor uniformity will easily lead to the uneven growth of rice in the same region, thus impacting the rice yield. Therefore, in the process of rice production, mechanization of fertilization is badly in need of solving these problems. A centrifugal distributor is a kind of fertilizer applicator used generally at present. The principle is spreading out the fertilizer using centrifugal force by the output shaft driving the rotary distributor disk. The distributor's mechanism adopts a disc type. The configuration is divided into single disc and opposed-double disc. The relative theoretical research is conducted on the assumption that the distributor plate is not conical and the blade is particle. The theoretical research plays a key role in further optimizing the granular fertilizer spreader. The traditional centrifugal fertilizing machine is used in order to make sure that the fertilizer can be spread out smoothly from the disc. Usually 2 ~ 4 vanes are arranged on the disc. The shape of the blade could be straight or curved. The blade installations should be radial type, forward type, and backward type. A centrifugal spreader is currently widely used, and one of the most common granular fertilizer application devices is the spinner spreader. The spinner spreader consists of a rotating disc with vanes bolted to the disc surface. Fertilizer poured onto the spinner is thrown onto the ground after colliding with the rotating vanes. The chief advantages of the spinner spreader are that it has a large spread width, combined with small size. The performance of spinner spreaders has been widely investigated. These investigations have greatly increased our understanding of how to model the dynamics of particles distributed by a spinner spreader. This paper analyzes the mechanism performance of the cone disc spreader, and explores the motion and distribution characteristics of fertilizer in the process of fertilization, to provide a theoretical basis for the design of a rice seedlings and fertilizer machine. This study designed a cylindrical disk for the fertilization mechanism, composed by a disk body, guide rail, and the boss. The swing plate body is like a rotating parabolic. The rail track is an involute spiral, with triangular sections. The spreading process includes: fertilizer particles fall into the feed area under the impact of gravity; under the rotating force, the fertilizer particles then quickly gain the initial velocity and do accelerated motion along the involute spiral guide. The fertilizer particle has higher speed moving to the left edge of the disk and does a projectile motion in the air until the fertilizer particle falls to the ground to complete the spreading process. For the convenience of theoretical analysis, a single fertilizer particle is simplified into a rigid particle. The fertilizer granules were analyzed during the movement. The rotating disk's minimum speed can be determined. We analyzed the movement after the rejection, such as the motion time, throwing distance, and width. Theoretically, the fertilizer particles' feeding angle is equal to the throw angle on the swing disc spreader. The experiment is adopted to discuss the feeding area angle, the speed, and the impact of throwing disc height change on the rotating fertilizer law. The main factors affecting the left disc spreader's width are size and speed. The main factors influencing the left disc spreader's distance are the speed and height. The reasonable feeding angle is 75°, and the reasonable speed is 600 r/min.

**Key words:** crops, fertilizer, mechanisms, rotary cone disk, spreader

(责任编辑: 鲍洪杰)