



江斌,张鸿,陈雄飞,等.双落点供料离心式撒肥机构设计与试验[J].江西农业大学学报,2025,47(2):521–533.  
JIANG B,ZHANG H,CHEN X F,et al.Design and experiment of centrifugal fertilizer spreading mechanism with double drop point feeding[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(2):521–533.

# 双落点供料离心式撒肥机构设计与试验

江斌<sup>1,2</sup>,张鸿<sup>1,2</sup>,陈雄飞<sup>1,2</sup>,刘木华<sup>1,2</sup>,肖丽萍<sup>1,2\*</sup>,余佳佳<sup>1,2</sup>,黄岷期<sup>1,2</sup>

(1.江西农业大学 工学院,江西 南昌 330045;2.江西省现代农业装备重点实验室,江西 南昌 330045)

**摘要:**【目的】针对水稻变量施肥均匀性不高的问题,基于圆盘式撒肥机结构简单、撒肥幅宽大、作业效率高等优点,配套研制了一种双落点供料离心式撒肥机构。【方法】基于 EDEM 离散元仿真模型,对单趟肥料仿真试验进行分析,以落料点半径、落料点夹角、施肥量及离心圆盘转速为影响因素,通过单因素仿真试验,确定单个因素对肥料颗粒分布的影响规律;在筛除落料点夹角因素下采用正交旋转仿真试验,明确上述因素交互作用对肥料分布均匀性变异系数和幅宽距离的影响规律;利用优化后的目标参数开展台架试验验证以及田间试验,并以实际往复作业工况进行对叠加后肥料分布均匀性变异系数进行分析。【结果】单因素及正交旋转试验结果表明,落料点夹角越大越不利于肥料抛撒均匀性,各因素对肥料分布均匀性变异系数影响由大到小分别为施肥量、落料点半径、离心圆盘转速;经参数优化后,当落料点半径 112 mm、施肥量 475.05 kg/hm<sup>2</sup>、离心圆盘转速 540 r/min 时单趟均匀性变异系数最小,为 15.49%,有效幅宽为 8 m;仿真试验结果分别为 15.19%、8 m,与预测结果基本一致,台架试验结果为 15.83%、7.7 m,在实际往复作业工况下,叠加后肥料分布均匀性变异系数为 9.12%。【结论】田间作业试验表明:在试验施肥量范围内,落料点半径为 100 mm 较其他半径更适合田间撒肥作业。

**关键词:**变量施肥;离散元法;双点落料;定量排肥;离心式撒肥;撒肥均匀性

中图分类号:S224.2 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2025)02-0521-13

CSTR:32399.14.aauj.2025045



## Design and experiment of centrifugal fertilizer spreading mechanism with double drop point feeding

JIANG Bin<sup>1,2</sup>,ZHANG Hong<sup>1,2</sup>,CHEN Xiongfei<sup>1,2</sup>,LIU Muhua<sup>1,2</sup>,  
XIAO Liping<sup>1,2\*</sup>,YU Jiajia<sup>1,2</sup>,HUANG Xianqi<sup>1,2</sup>

(1.College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** [Objective] In order to address the problems of low uniformity of variable rate fertilization in rice, a centrifugal fertilizer spreader with double falling points was developed by leveraging the advantages of simple structure, wide spreading range and high operation efficiency of disc fertilizer spreader. [Method] Based

收稿日期:2024-08-06 修回日期:2024-10-13

基金项目:江西省农机装备应用产业技术体系岗位专家项目(JXARS-21-粮食作物生产机械化)

Project supported by Jiangxi Agricultural Machinery and Equipment Application Industry Technology System Post Expert(JXARS-21-Grain Crop Production Mechanization)

作者简介:江斌,硕士生,orcid.org/0009-0002-2479-9139,1664507907@qq.com;\*通信作者:肖丽萍,教授,博士,主要从事农业装备工程研究,orcid.org/0000-0002-2829-3090,xiaolipingyzx@jxau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

on the EDEM discrete element simulation model, the single-trip fertilizer simulation test was analyzed. Taking the radius of the blanking point, the angle of the blanking point, the amount of fertilizer and the speed of the centrifugal disc as the influencing factors, the influence of single factor on the distribution of fertilizer particles was determined by single factor simulation test. The orthogonal rotation simulation test was conducted under the condition of screening out the angle factor of the blanking point, and the influence of the interaction of the above factors on the coefficient of variation and the width distance of the fertilizer distribution uniformity was clarified. The optimized target parameters were used to conduct bench test verification and field test, and the coefficient of variation of fertilizer distribution uniformity after superposition was analyzed with actual reciprocating operation conditions. [Result] The results of single factor and orthogonal rotation test show that a larger angle between discharge points negatively impacts fertilizer spreading uniformity. The effects of different factors on the coefficient of variation of fertilizer distribution uniformity, ranked by their impact from greatest to least, are as follows: fertilizer application amount, the radius of dropping point and the rotating speed of centrifugal disc. When the radius of the dropping point is 112 mm, the amount of fertilizer applied is 475.05 kg/hm<sup>2</sup> and the rotating speed of the centrifugal disc is 540 r/min, the coefficient of variation of uniformity is the smallest, which is 15.49%, and the effective width is 8 m, the results of bench test are 15.83% and 7.7 m, and the coefficient of variation of fertilizer distribution is 9.12%. [Conclusion] The field experiment shows that the radius of dropping point of 100 mm is more suitable than other radius in the range of fertilizer application.

**Keywords:** variable rate fertilization; discrete element method; double point blanking; quantitative fertilization; centrifugal fertiliser spreading; uniformity of fertilizer application

【研究意义】水稻作为主要粮食作物之一,合理使用化肥是水稻增产快且有效的措施,变量施肥能够合理分配肥料养分,是精准农业的一个重要环节<sup>[1-3]</sup>。圆盘式撒肥机具有结构简单、撒肥幅宽大、作业效率高等优点被广泛应用,国外以德国阿玛松、法国 AMASAT、美国 John Deere 为代表,但撒肥机价格昂贵,且存在撒肥均匀性不高等问题。【前人研究进展】近年来,国内在离心式撒肥机的研究上取得了一些成果,施印炎等<sup>[4]</sup>结合水稻施肥农艺特点和近地光谱技术设计了一种离心匀肥罩式变量撒肥机,研究了排肥流量、圆盘转速、整机前进速度对肥料颗粒分布变异系数和施肥量相对误差的影响。刘彩玲等<sup>[5]</sup>通过 EDEM 软件对甩盘转速、喂入量、喂入角和喂入位置角 4 个影响因素进行了单因素和多因素回归正交仿真试验,分析了以上因素对撒肥均匀性变异系数的影响,并对仿真试验结果进行了台架验证。杨立伟等<sup>[6]</sup>对撒肥高度、圆盘叶片位置角、肥料下落位置角 3 个关键参数进行了响应面分析试验和单因素试验,分析各因素对分布变异系数的影响,并对参数优化后结果进行试验验证得出肥料分布变异系数平均值为 18.93%。芦新春等<sup>[7]</sup>设计了一种同轴驱动的离心式双圆盘撒肥机,确定了关键结构和参数,试验结果表明施肥均匀性变异系数为 16%。胡东彬等<sup>[8]</sup>以撒肥盘转速、落肥口位置、叶片倾角为试验因素进行三因素三水平回归正交组合试验,建立影响因素与变异系数的回归模型,并对优化结果进行试验验证,验证结果符合撒肥机变异系数≤20% 的要求。

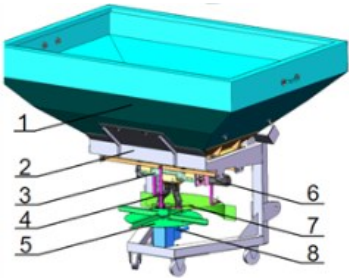
【本研究切入点】目前相关圆盘式撒肥机田间撒肥均匀性实际变异系数为 15%~20%,撒肥均匀性不高。【拟解决的关键问题】针对该问题,本研究提出一种通过增加落料口的方式使肥料在抛洒过程中产生叠加,并结合相关影响因素组合进一步有效提高肥料撒施均匀度的方法。设计一种双落点供料离心式撒肥机构,可以实现肥料在抛撒过程中产生叠加,利用 EDEM 离散元软件进行撒肥仿真试验,探究各参数对肥料撒施均匀性及幅宽距离的影响规律,并根据试验结果进行参数优化并进行台架试验验证,以期离心式撒肥机构的设计及实际田间作业参数提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 撒肥机构的结构与工作原理

双落点供料离心式撒肥机构悬挂于拖拉机后方,主要由肥箱、机架、螺旋排肥电机、螺旋定量排肥装

置、落肥点位置角调节机构、离心式撒肥装置组成(图 1)。肥料由螺旋定量排肥装置从肥箱排出,经落料管下落至离心圆盘,在离心圆盘及叶片的旋转作用下抛撒出去。



1: 肥箱; 2: 机架; 3: 螺旋定量排肥装置; 4: 落料管; 5: 离心圆盘; 6: 螺旋排肥电机; 7: 落肥点位置角调节机构; 8: 减速机。  
1: Fertilizer box; 2: Rack; 3: Spiral quantitative fertilizer device; 4: Blanking tube; 5: Centrifugal disc; 6: Spiral fertilizer motor;  
7: Falling point position angle adjustment mechanism; 8: Reducer.

图 1 撒肥机构结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of fertilizer spreading mechanism

1.2 关键部件设计

1.2.1 螺旋定量排肥装置

为调控施肥量,采用同轴反向双螺旋排肥器定量排肥<sup>[9]</sup>,考虑到南方基肥撒施作业中实际施肥量范围与本机作业目标,可选取作业速度 0.8 m/s、作业幅宽 6 m、施肥量 225~825 kg/hm<sup>2</sup>,结合实际考虑在最低施肥量 225 kg/hm<sup>2</sup>的情况下,得双螺旋排肥器单位排肥率为  $Q_1$  为 108g/s,则单边螺旋排肥量为 54 g/s,根据相关研究选取螺旋转速在 20 r/min 左右,得单边螺旋单圈排肥量  $q$  为 162 g。

$$q = \left[ \frac{\pi(D^2 - d^2)s}{4} - bhL_p \right] \rho \varphi \tag{1}$$

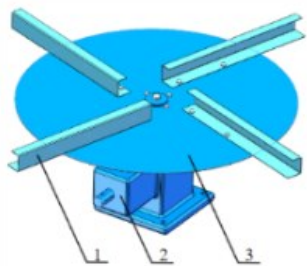
式(1)中: $q$  为单圈排肥量, g;  $D$  为螺旋外径, mm;  $d$  为螺旋内径, mm, 取  $d=0.2D$ ;  $S$  为螺距, mm 取  $S = K_1 D$ , 取  $K_1 = 0.5$ ,  $b$  为螺牙厚度,  $b=3$  mm;  $h$  为螺牙深度, mm;  $L_p$  为螺牙平均长度,  $L_p = \sqrt{[\pi(D + d)/2]^2 + S^2}$  mm;  $\rho$  为肥料容重,  $\rho=8.69 \times 10^{-4}$  g/mm<sup>3</sup>;  $\varphi$  为肥料填充系数,  $\varphi = 1$ 。

将上述参数代入公式(1)计算可得螺旋外径  $D$  取整 82 mm, 内径取 17 mm, 螺距取 41 mm。设定螺旋与筒壁之间的单边间隙为 6 mm, 则供料筒内径为 94 mm。

1.2.2 离心式撒肥装置

离心式撒肥装置是将肥料撒施出去的关键部件,其结构及参数对撒施均匀性具有重要影响,主要由变速箱、离心圆盘及叶片组成(图 2)。

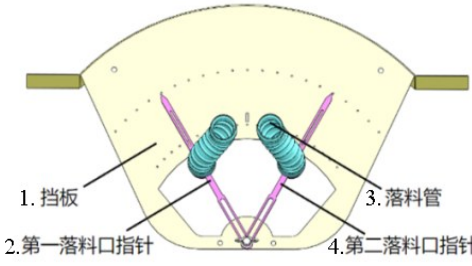
目前相关研究<sup>[10]</sup>中,撒肥盘直径在 250~560 mm,此处离心圆盘直径选择 0.5 m,采用“U”形叶片,并将叶片伸出圆盘 0.1 m 以增加离心圆盘旋转半径。



1: 叶片; 2: 离心圆盘; 3: 变速。  
1: leaves; 2: Centrifugal disc; 3: Variable speed.

图 2 离心式撒肥装置结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of centrifugal fertilizer spreading device



1: 挡板; 2: 第一落料口; 3: 落料管; 4: 第二落料口。  
1: Baffle; 2: The first blanking port; 3: Blanking tube; 4: The second blanking port.

图 3 落料点位置调节机构

Fig.3 Position adjustment mechanism of blanking point

### 1.2.3 落料点位置调节机构

肥料颗粒在离心圆盘上的落料点位置是影响撒肥特性的关键因素。双落料点位置调节机构主要由挡板、落料管、第一落料口指针、第二落料口指针等组成(图3)。

两指针绕离心圆盘中心旋转以调整双落料点在圆盘上的相对位置,且通过挡板上指示刻度的圆形孔来显示角度大小,其中落料点半径在70~150 mm范围内选取,挡板可以防止肥料颗粒与离心盘碰撞后向拖拉机尾部飞溅。

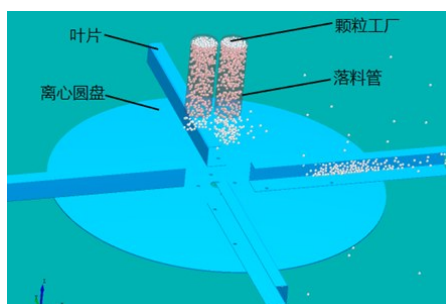
## 2 EDEM离散元建模与仿真分析

为使撒施肥料沿机具前进方向对称均匀分布,采用EDEM软件对双落点供料离心式撒肥机构撒施肥料过程进行单因素和二次回归正交旋转组合试验<sup>[11]</sup>分析,并获取均匀撒施肥料最优参数组合。

### 2.1 仿真模型的建立

#### 2.1.1 三维仿真模型导入

将离心圆盘三维模型导入EDEM软件,圆盘上方双落料管内生成肥料颗粒模型,使其在重力作用下通过落料管落入离心圆盘,最后在圆盘离心力作用下被撒施出去(图4)。



1:叶片;2:离心圆盘;3:颗粒工厂;4:落料管。

1:Leaves;2:Centrifugal disc;3:Particle factory;4: Blanking tube.

图4 仿真模型

Fig.4 Simulation model

#### 2.1.2 物料特性参数确定

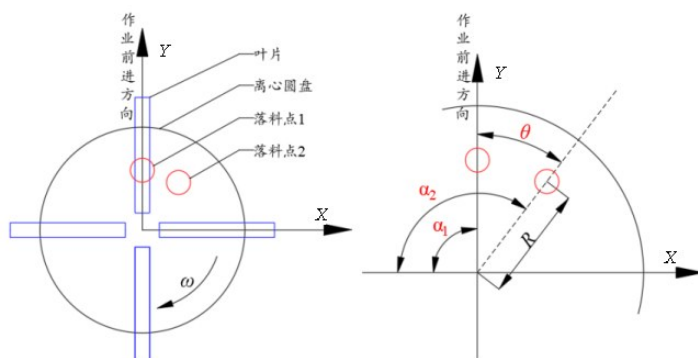
台架试验中所用肥料为史丹利复合肥,设置仿真参数<sup>[12]</sup>为:肥料颗粒直径3.76 mm,密度1 617 kg/m<sup>3</sup>,泊松比0.25,剪切模量10 MPa;肥料颗粒与肥料颗粒间弹性恢复系数0.43,静摩擦系数0.3,滚动摩擦系数0.12;圆盘模型仿真参数为:不锈钢材料密度为8 000 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为0.3,剪切模量为75 GPa;肥料颗粒与不锈钢间恢复系数0.251,静摩擦系数0.231,滚动摩擦系数0.218。

#### 2.1.3 基于网格组旋转的落料点位置角确定

为使田间撒肥均匀性好,肥料抛撒轨迹需与作业前进路线对称分布。根据已有研究基础可知影响肥料颗粒运动轨迹的主要参数有落料点半径、离心圆盘转速、施肥量及落料点位置角4个,其中任意一个因素变化均会改变肥料撒施的分布情况。

为获取不同影响因素下的最优落料点位置,参考文献[13]方法,以离心圆盘中心为原点,作业前进方向为Y轴、垂直方向为X轴,离心圆盘轴向方向为Z轴建立坐标系,设定落料点到离心圆盘中心的距离为落料点半径 $R$ ,2个落料点半径相同;其夹角称为落料点夹角 $\theta$ ,且两半径分别与X轴负方向形成的夹角为落料点位置角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ,规定X轴负方向为0°,Y轴方向为90°(图5)。

假设初始位置落料点1在Y轴上,落料点2在与其同半径相切位置,夹角为 $\delta$ , $\delta$ 随半径变化而变化,落料点半径为70,76,80,90,100,110,120,130,140,145,150 cm;对应的夹角( $\delta$ )分别为34°、31°、29°、26°、24°、21°、20°、18°、17°、16°和16°;在Z轴负方向0.7 m处设置一接料板,收集离心圆盘撒出的肥料颗粒。以(0,0,-0.7)m为中心,设置1行 $2i+1$ 列的网格组,对接料板上的肥料进行统计,以中间经过离心圆盘中心列为第0列,左右各分布 $i(i \geq 1)$ 列。抛撒初始状态时机具中心线与第0列网格重合(图6a),落料点1位置角 $\alpha_1=90^\circ$ 、落料点2位置角 $\alpha_2=90^\circ+\delta$ ;选取离心圆盘顺时针角速度 $\omega$ 进行静态仿真,结果显示抛撒后落料区域分布在离心圆盘左后方位置。



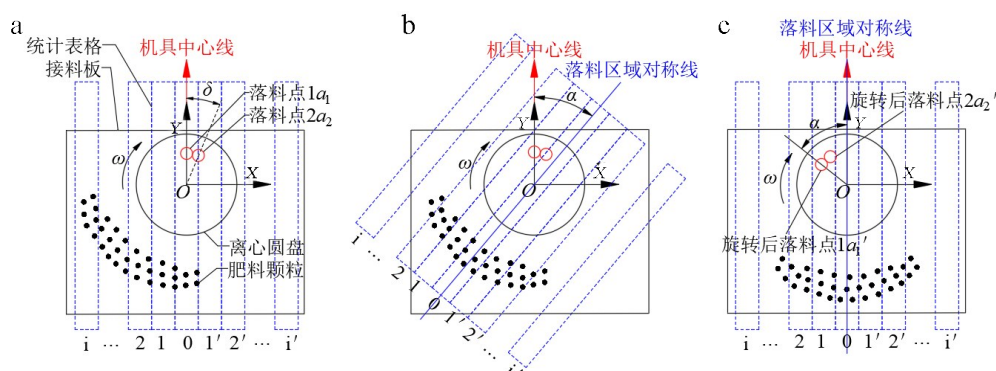
1:叶片;2:离心圆盘;3:落料点1;4:落料点2。

1:Leaves;2:Centrifugal disc;3:Blanking point 1;4:Blanking point 2.

图5 离心圆盘落料点位置说明

Fig.5 Description of centrifugal disc drop point locations

规定网格组顺时针旋转 $\alpha$ 角度为负值,逆时针旋转为正值。设置网格组绕Z轴顺时针旋转 $|\alpha|$ 角,可使肥料关于落料区域对称线对称分布(图6b),即在仿真试验中若使抛撒肥料分布关于机具中心线对称,则只需要将双落料点向反方向旋转 $|\alpha|$ 角度(图6c)。旋转后所得落料点1位置角 $\alpha_1' = 90^\circ + \alpha$ 、旋转后的落料点2位置角 $\alpha_2' = 90^\circ + \delta + \alpha$ ,即认为旋转后的落料点位置角为最佳落料点位置角。



a:初始状态;b:网格旋转状态;c:最终处理状态。

a: Static fertilization test; b: Static fertilization test; c: Static fertilization test.

图6 基于网格组旋转的肥料对称分布获取方法

Fig.6 A method for obtaining symmetrical distribution of fertilizer based on grid rotation

为验证旋转过后两侧肥料关于机具前进路线的对称性,引入3个评价指标量化描述肥料抛撒分布整体对称性:对称位置肥料质量之差的绝对值总和( $S_1$ )、对称位置肥料质量之差的绝对值平方和( $S_2$ )以及两侧肥料质量总重之差的绝对值( $S_3$ )。3个指标趋于较小值时,表示两侧肥料分布较为均匀。评价指标计算公式如下:

$$S_1 = \sum_{i=1}^k |m_i - m_i'| \quad (2)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^k |m_i - m_i'|^2 \quad (3)$$

$$S_3 = \left| \sum_{i=1}^k m_i - \sum_{i=1}^k m_i' \right| \quad (4)$$

式(2)~式(4)中: $m_i$ 为作业前进路线左侧第*i*列网格内肥料颗粒质量; $m_i'$ 为作业前进路线右侧第*i'*列网格的肥料颗粒质量; $k$ 为关于作业前进路线对称的单侧统计网格总列数。

#### 2.1.4 仿真试验设计与试验指标

参照标准 GB/T 20346.1—2021 施肥机械试验方法<sup>[14]</sup>开展试验。离心盘中心设为(0,0,0),在与离心

圆盘高度差为0.7 m处设置长28.5 m、宽18 m的仿真接料板,进行静态仿真试验,仿真时长2 s。后处理中以(0,0,-0.7 m)为中心,设置沿X轴长23.5 m、Y轴30 m的网格组,沿X轴方向分为1行47列0.5 m宽的纵列(图7a)。

动态撒肥仿真过程中,离心圆盘中心设为(0,0,0),在离心圆盘高度差为0.7 m处设置长23.5 m、宽3.2 m的仿真接料板,在距离离心圆盘中心18.4 m处设置6行47列的网格组,网格尺寸0.5 m×0.5 m,待仿真撒肥1 s达到稳定状态后,接料板以0.8 m/s的速度穿过撒肥装置,仿真时长26.95 s,仿真结束后将每列网格内的肥料叠加,形成1行47列的统计数据(图7b)。

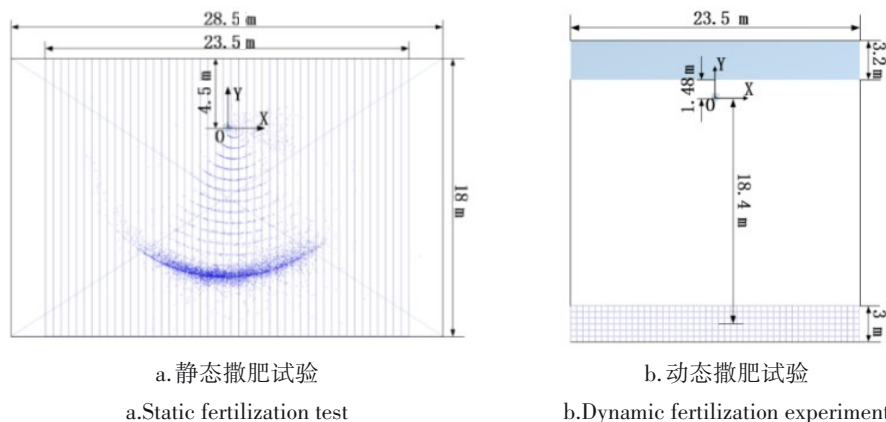


图7 撒肥仿真布置

Fig.7 Simulation layout of fertilizer spreading

横向均匀性变异系数 $C_v$ 计算方法如下:

$$C_v = \frac{S}{\bar{m}} \times 100\% \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (6)$$

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \quad (7)$$

式(5)~式(7)中: $S$ 为标准差; $\bar{m}$ 为有效幅宽内各列网格内肥料颗粒的平均质量,g; $m_i$ 为第*i*列网格内肥料颗粒的质量,g; $n$ 为有效幅宽内的网格列数。

参照ASAES341.2的定义,将肥料分布质量最高的单列统计区域作为峰值,撒肥质量为峰值1/2的单列统计区域与撒肥盘的距离作为有效作业幅宽距离。

## 2.2 单因素仿真试验

肥料颗粒的运动状态受诸多因素影响,利用EDEM仿真软件对落料点半径、施肥量、落料点夹角和离心圆盘转速进行单因素仿真试验,研究单个因素对肥料颗粒分布的影响规律。

### 2.2.1 落料点半径对肥料分布的影响

设定施肥量525 kg/hm<sup>2</sup>、落料点夹角 $\delta+10^\circ$ 、离心圆盘转速540 r/min,落料点半径为70~150 mm,以20 mm为增量取5个水平进行静态试验。各水平肥料颗粒在接料板上的分布情况见图8a。

结果显示随着落料点半径增大,峰值逐渐增加,有效幅宽距离逐渐减小且变异系数逐渐增大,肥料分布范围减小产生堆积。究其原因为:落料半径越小,肥料在离心圆盘上的运动时间越长,离开离心圆盘时的速度更大,肥料分布更广,峰值便更低;落料半径越大,肥料离开离心圆盘时的速度越小,肥料产生堆积从而峰值变大。

### 2.2.2 施肥量对肥料分布的影响

设定落料点半径110 mm、落料点夹角 $\delta+10^\circ$ 、离心圆盘转速540 r/min,并根据文献及南方经验施肥量<sup>[15-18]</sup>,选取施肥量225~825 kg/hm<sup>2</sup>、增量为150 kg/hm<sup>2</sup>,即计算得出仿真布置单孔喂入量为1 200~4 400粒颗粒肥料、增量为800粒。

如图8b所示,在上述施肥量范围内,峰值大小及幅宽距离与施肥量成正比,而有效幅宽距离变化较小;随着施肥量的增加,在有效幅宽距离内,肥料分布均匀性变异系数先减小后增加,但影响不显著。分析原因为:施肥量增加时,肥料颗粒不断叠加,导致图像中“M”型越明显。

### 2.2.3 落料点夹角对肥料分布的影响

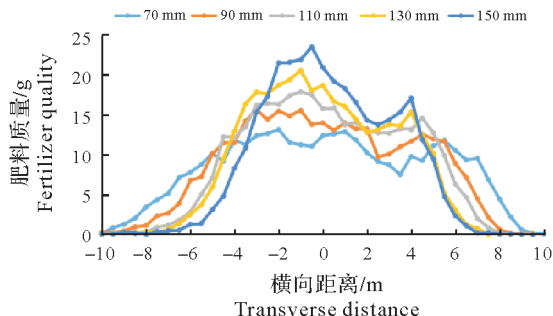
设定落料点半径110 mm、施肥量525 kg/hm<sup>2</sup>、离心圆盘转速540 r/min的试验条件下,2个落料管相切为最小角度,预试验表明角度过大可以增加有效幅宽距离但不利于撒肥均匀性,故使其在0°~20°内变化、梯度为5°。

由图8c可知,在上述范围内,随着落料点夹角增大,峰值减小,峰值与落料点夹角成反比;落料点夹角增加,有效幅宽距离变大,幅宽距离与落料点夹角成正比,但增幅不大;肥料分布均匀性变异系数随着落料点夹角的增加逐渐增大、且图像呈现“M”型趋势越明显。当落料点夹角为 $\delta+0^\circ$ 时,叠加后的肥料分布均匀性变异系数达到最小。

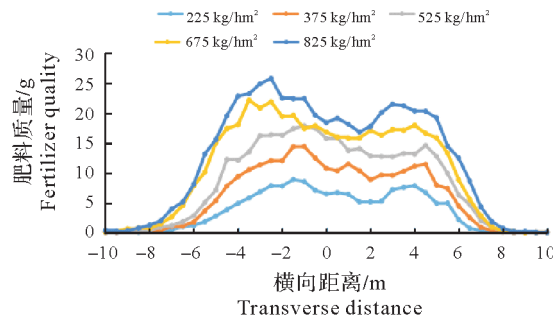
### 2.2.4 离心圆盘转速对肥料分布的影响

设定落料点半径110 mm、施肥量525 kg/hm<sup>2</sup>、落料点夹角 $\delta+10^\circ$ 的试验条件下,选取转速变化区间为340~740 r/min,增量为100 r/min<sup>[19]</sup>。

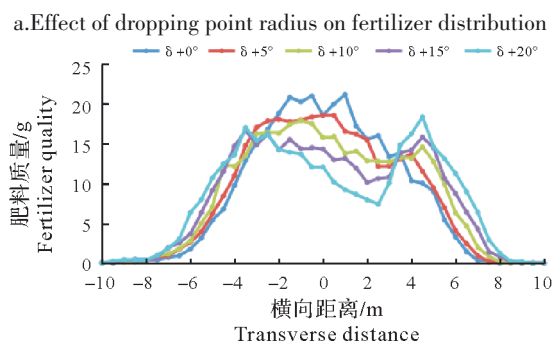
由图8d可知:随着转速增加,有效幅宽距离逐渐增加,峰值降低、肥料分布范围增大、肥料变异系数先减小后增大。当离心圆盘转速为540 r/min时,肥料分布均匀性变异系数最小为13.17%;当离心圆盘转速超过540 r/min时,肥料在接料板上的分布规律变化不明显,且变异系数变化较小,基本稳定,即选取540 r/min作为临界转速,肥料分布曲线变化程度小,肥料分布均匀性好。分析原因:离心圆盘转速越低,肥料所受离心力越小,离开圆盘时的速度越小,肥料分布比较集中,峰值增大,有效幅宽距离变小,即分布不均导致肥料分布均匀性变异系数增大;后随着转速不断增大到某一值达到最佳撒肥均匀状态,随着转速的不断增大,使肥料离开离心圆盘的速度差值变大,最终导致肥料分布均匀性降低,变异系数变大,即出现变异系数先减小后增大的情况。



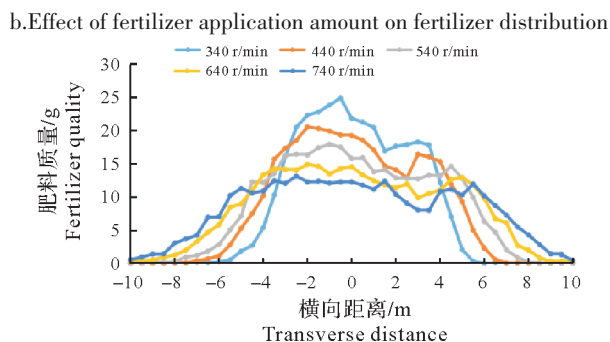
a. 落料点半径对肥料分布的影响



b. 施肥量对肥料分布的影响



c. 落料点夹角对肥料分布的影响  
c. Effect of angle between dropping point  
on fertilizer distribution



d. 离心圆盘转速对肥料分布的影响  
d. Effect of rotating speed of centrifugal disc  
on fertilizer distribution

图8 落料点半径、施肥量、落料点夹角和离心圆盘转速对肥料分布的影响

Fig.8 The effect of the radius of the dropping point, the amount of fertilizer, the angle of the dropping point and the rotating speed of the centrifugal disc on the distribution of fertilizer

2.3 正交旋转组合仿真试验

通过单因素试验可知:当夹角为 $\delta$ 时,图像显示为高斯型,当落料点夹角增大,肥料分布“M”型越明显,不利于撒肥;峰值的位置和大小可反映肥料分布的主要区域和分散程度。单因素试验仅能反应一定条件下单一因素对试验指标的影响,接下来研究上述各因素交互作用对肥料分布均匀性变异系数 $C_v$ 和幅宽距离 $L$ 的影响规律,由于单因素结果显示落料点夹角增大导致肥料分布不均,因此剔除落料点夹角因素,并开展三因素五水平二次旋转正交仿真试验<sup>[20-22]</sup>。

2.3.1 二次旋转正交组合试验设计

依据单因素试验结果,选取施肥量、落料点半径、离心圆盘转速为试验因素,并确定各因素水平,采用三因素五水平二次旋转正交组合试验,各水平编码见表1,因子中心处试验重复6次。

表 1 因素水平编码表  
Tab.1 Factor level coding table

| 水平编码<br>Level code | 落料点半径 $A/\text{mm}$<br>Radius of blanking point | 离心圆盘转速 $B/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$<br>Centrifugal disc speed | 施肥量 $C/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$<br>Application rate |
|--------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| -2                 | 70                                              | 340                                                                 | 225                                                        |
| -1                 | 90                                              | 440                                                                 | 375                                                        |
| 0                  | 110                                             | 540                                                                 | 525                                                        |
| 1                  | 130                                             | 640                                                                 | 675                                                        |
| 2                  | 150                                             | 740                                                                 | 825                                                        |

通过静态仿真结果可知动态仿真落料点位置使肥料关于机具中心线对称分布<sup>[23]</sup>。静态仿真中落料点角度布置及旋转后所得动态落料点角度如表2所示,其中静态仿真落料点1、落料点2在圆盘上角度为 $a_1$ 、 $a_2$ ,旋转后所得动态仿真落料点1、落料点2在圆盘上角度为 $a_1'$ 、 $a_2'$ 。试验结果显示,A对肥料偏移影响最大,即A越小,肥料在离心圆盘上的位移距离增加,转速相同情况下,肥料对机具中心线对称分布时间也增加,则旋转后落料点角度更小(表2)。

表 2 试验方案及试验结果  
Tab.2 Test scheme and test results

| 编号 Code | $A/\text{mm}$ | $B/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | $C/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ | $a_1/^\circ$ | $a_2/^\circ$ | $a_1'/^\circ$ | $a_2'/^\circ$ | $L/\text{m}$ | $C_v/\%$ |
|---------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|----------|
| 1       | 90            | 440                                | 375                                | 90           | 116          | 74            | 100           | 8            | 19.19    |
| 2       | 130           | 440                                | 375                                | 90           | 108          | 104           | 122           | 6            | 19.28    |
| 3       | 90            | 640                                | 375                                | 90           | 116          | 77            | 103           | 11           | 17.84    |
| 4       | 130           | 640                                | 375                                | 90           | 108          | 106           | 124           | 8            | 19.37    |
| 5       | 90            | 440                                | 675                                | 90           | 116          | 73            | 99            | 8.5          | 15.51    |
| 6       | 130           | 440                                | 675                                | 90           | 108          | 103           | 121           | 7            | 18.08    |
| 7       | 90            | 640                                | 675                                | 90           | 116          | 75            | 101           | 12           | 19.40    |
| 8       | 130           | 640                                | 675                                | 90           | 108          | 105           | 123           | 9            | 17.73    |
| 9       | 76.36         | 540                                | 525                                | 90           | 121          | 61            | 92            | 11           | 16.85    |
| 10      | 143.64        | 540                                | 525                                | 90           | 106          | 112           | 128           | 7            | 20.14    |
| 11      | 110           | 371.82                             | 525                                | 90           | 111          | 89            | 110           | 6            | 15.27    |
| 12      | 110           | 708.18                             | 525                                | 90           | 111          | 91            | 112           | 10           | 15.80    |
| 13      | 110           | 540                                | 272.85                             | 90           | 111          | 92            | 113           | 7            | 21.06    |
| 14      | 110           | 540                                | 777.15                             | 90           | 111          | 90            | 111           | 9            | 15.51    |
| 15      | 110           | 540                                | 525                                | 90           | 111          | 90            | 111           | 8            | 15.52    |
| 16      | 110           | 540                                | 525                                | 90           | 111          | 90            | 111           | 8            | 14.60    |
| 17      | 110           | 540                                | 525                                | 90           | 111          | 90            | 111           | 8            | 16.39    |
| 18      | 110           | 540                                | 525                                | 90           | 111          | 90            | 111           | 8            | 15.34    |
| 19      | 110           | 540                                | 525                                | 90           | 111          | 90            | 111           | 8            | 17.22    |
| 20      | 110           | 540                                | 525                                | 90           | 111          | 90            | 111           | 8            | 15.52    |
| 21      | 110           | 540                                | 525                                | 90           | 111          | 90            | 111           | 7.5          | 14.94    |
| 22      | 110           | 540                                | 525                                | 90           | 111          | 90            | 111           | 8            | 15.26    |
| 23      | 110           | 540                                | 525                                | 90           | 111          | 90            | 111           | 8            | 15.44    |

### 2.3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行处理,并采用逐步回归法将方差分析表中对试验指标影响不显著的因素逐个去除。最终结果表明,肥料分布均匀性变异系数  $C_v$  和幅宽距离  $L$  失拟项  $P$  分别为 0.296 5、0.444 9,均不显著。(0.05< $P$ <0.1 表示较显著、0.01< $P$ <0.05 表示显著、 $P$ <0.01 表示极显著)

肥料分布均匀性变异系数  $C_v$  与各因素的回归方程为:

$$C_v = 15.65 + 0.59A + 0.23B - 1.65C - 0.35AB - 0.090AC + 0.60BC + 1.18A^2 + 1.11C^2 - 0.71ABC + 1.03A^2 \quad (8)$$

幅宽距离  $L$  与各因素的回归方程为:

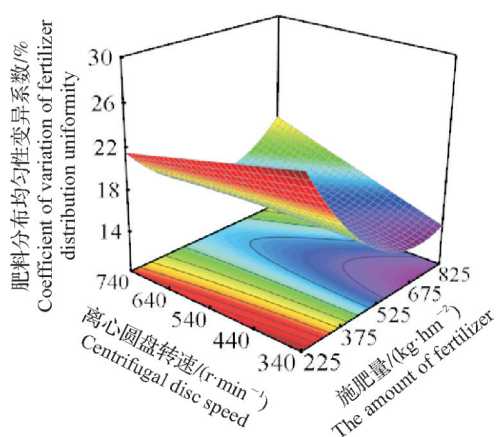
$$L = 7.95 - 1.19A + 1.19B + 0.50C - 0.31AB + 0.37A^2 + 0.016B^2 + 0.12A^2B + 0.35A^2B^2 \quad (9)$$

### 2.3.3 响应曲面分析

利用 Design-Expert 软件对方差分析表中交互作用显著的项进行响应曲面分析,如图 10 所示:

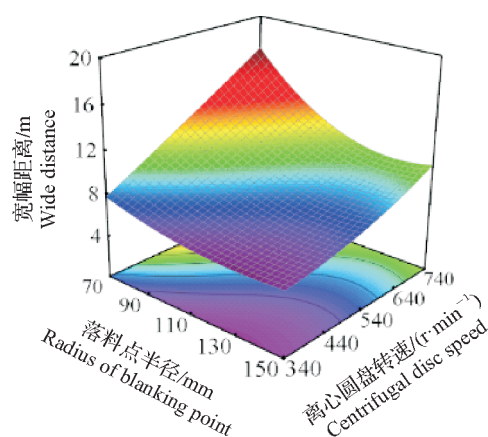
落料点半径  $A=110$  mm 时,离心圆盘转速  $B$  与施肥量  $C$  对肥料均匀性变异系数  $C_v$  的响应曲面如图 9a 所示,当  $B>440$  r/min 时,随着施肥量增加,  $C_v$  先减小后增大;当  $B<440$  r/min 时,  $C$  与  $C_v$  呈反比,且  $C$  越大对  $C_v$  影响越不显著;当  $C<375$  kg/hm<sup>2</sup> 时,随着  $B$  的增加,  $C_v$  无明显变化;当  $C\geq 375$  kg/hm<sup>2</sup> 时,  $B$  与  $C_v$  呈正比,  $C$  越大,  $B$  对  $C_v$  影响越明显。

施肥量  $C=525$  kg/hm<sup>2</sup> 时,离心圆盘转速  $B$  与落料点半径  $A$  对试验指标交互作用的响应曲面如图 9b 所示,当  $B$  一定时,  $A$  增加,有效幅宽距离  $L$  先减小后增大,且  $B$  越大,  $L$  变化越明显;当  $A$  保持不变时,随着  $B$  的增加,  $L$  逐渐增大,  $A=70$  mm 时变化最显著,  $B$  对  $L$  的影响较大。



a. 离心圆盘转速与施肥量的交互作用。

a. Interaction between rotating speed of centrifugal disc and fertilization rate.



b. 离心圆盘转速与落料点半径的交互作用。

b. Interaction between rotating speed of centrifugal disc and radius of blanking point.

图9 响应曲面分析

Fig.9 Response surface analysis

### 2.3.4 关键参数优化

在离心圆盘转速  $B=540$  r/min 时,以试验因素表中落料点半径  $A$ 、施肥量  $C$  取值范围为约束条件<sup>[24]</sup>,利用 Design-expert 软件求解上述模型中有效幅宽距离  $L=8$  m 时最小肥料分布均匀性变异系数  $C_v$ 。优化结果为:  $A=112$  mm、 $B=540$  r/min、 $C=475.05$  kg/hm<sup>2</sup> 时  $C_v=15.49\%$ 、 $L=8$  m。将以上参数组合进行仿真试验,  $C_v=15.19\%$ 、 $L=8$  m,与优化结果基本相吻合。

## 3 撒肥机构性能试验

### 3.1 台架试验

#### 3.1.1 试验设计

为对比仿真试验与实际试验的误差,以最优参数组合:  $A=112$  mm、 $B=540$  r/min、 $C=475.05$  kg/hm<sup>2</sup> 开展台架试验<sup>[25-29]</sup>。试验时间和地点:2023年7月18日在江西农业大学农机实训基地开展试验。试验环境为风速小于 2 m/s,温度 27~33 ℃,湿度 66%。试验采用 4 行 25 列布置采样点,以 0.8 m/s 的前进速度向前,如

图 10、图 11 所示。为减少肥料弹跳,在每个收集盒里装入 2~3 cm 厚黑色细沙(直径 0.5~1 mm),并在收集盒前方铺上一层 2 m×8 m 泥巴进行缓冲,如图 10b 所示。试验后,对撒肥完成后的盒子进行拍照统计数量并记录其质量。



a. 撒肥试验现场  
a. Test Site of fertilizer application



b. 撒肥试验效果  
b. Effect of fertilization experiment

图 10 撒肥试验布置  
Fig.10 Experiment layout of fertilizer spreading

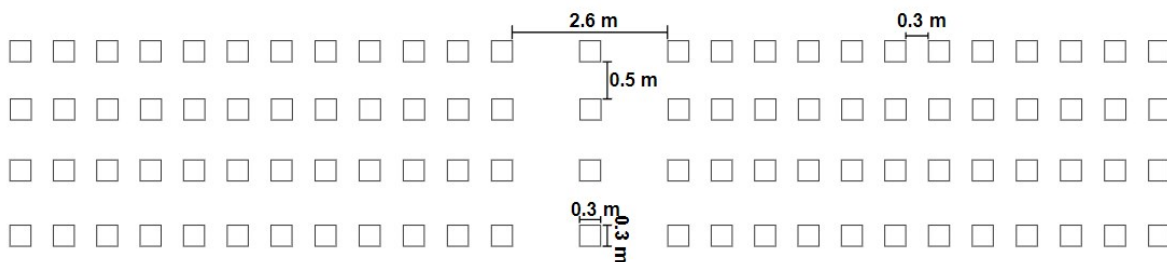


图 11 收集点布置

Fig.11 Collection Point layout

### 3.1.2 试验结果

试验结果表明:单趟肥料分布均匀性变异系数为 15.80%、15.99%、15.71%,均值为 15.83%,与仿真结果单趟肥料分布均匀性变异系数 15.19% 基本一致,相对误差为 4.14%,有效幅宽距离为 7.7 m。可见仿真能够指导实际撒肥作业。

在实际生产中采用往复式作业,对仿真参数优化组合验证性试验结果进行多轨迹拟合叠加,计算得到往复撒肥肥料分布均匀性变异系数为 9.12%,幅宽为 8 m,离心式撒肥机撒肥均匀性得到显著提升。

### 3.2 田间作业试验

为进一步明确双落点供料离心式撒肥机构田间工作性能,结合前期试验以落料点半径及施肥量为试验因素,使用如图 12 所示的采样方式进行全因素试验。于 2023 年 11 月 4 日在江西农业大学试验田开

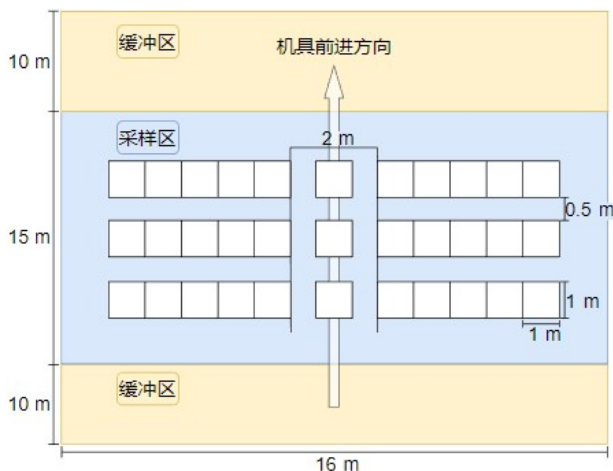


图 12 田间作业试验布置

Fig.12 Experiment layout of fertilizer spreading

展撒肥机田间工作性能试验。当天天气晴,气温 19~28 ℃,风速 1 m/s,湿度 56%。试验时,田块灌水旋耕平整后排水 2 d 至采集区域无明显积水,为提高田间肥料数据收集精度,每组试验后将采样区田块人工平整。机具作业完成后,统计每个采样点的肥料颗粒数量并换算为质量,肥料分布均匀性变异系数  $C_v$  计算方法与前述相同。

为探究不同落料点下不同施肥量对田间作业试验指标的影响,参考前期试验结果,并调整田间作业试验因素及水平,保持离心圆盘转速  $B=540$  r/min,落料点半径  $A$  范围为 80~120 mm,增量为 20 mm;施肥量  $C$  范围为 225~825 kg/hm<sup>2</sup>,增量为 300 kg/hm<sup>2</sup>,试验方案及结果如表 3 所示。 $(a_1', a_2')$  为静态仿真试验得到田间试验落料点 1、2 在离心圆盘上的角度分布)

表 3 田间作业试验方案及结果

Tab.3 Scheme and result of field experiment

| 落料点半径 $A$ /mm<br>Radius of blanking<br>point | 施肥量 $C$ /(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Application<br>rate | $a_1'$ /(°) | $a_2'$ /(°) | 单趟撒肥变异系数/%<br>Single fertilizer variation<br>coefficient | 往复撒肥变异系数/%<br>Reciprocating fertilizer<br>variation coefficient | 幅宽 $L$ /m<br>Width |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|
| 80                                           | 225                                                    | 67          | 96          | 25.07                                                    | 17.16                                                           | 9                  |
|                                              | 525                                                    | 65          | 94          | 17.80                                                    | 10.26                                                           | 10                 |
|                                              | 825                                                    | 64          | 93          | 21.14                                                    | 14.25                                                           | 11                 |
| 100                                          | 225                                                    | 86          | 110         | 22.07                                                    | 15.72                                                           | 7                  |
|                                              | 525                                                    | 84          | 108         | 16.57                                                    | 10.92                                                           | 8                  |
|                                              | 825                                                    | 83          | 107         | 18.58                                                    | 14.85                                                           | 9                  |
| 120                                          | 225                                                    | 100         | 120         | 24.46                                                    | 9.34                                                            | 6                  |
|                                              | 525                                                    | 98          | 118         | 16.91                                                    | 8.41                                                            | 7                  |
|                                              | 825                                                    | 97          | 117         | 19.39                                                    | 12.95                                                           | 8                  |

由表 3 可知,  $C$  从 225 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 825 kg/hm<sup>2</sup> 时:  $A=80$  mm, 单趟撒肥变异系数变化相对较大, 肥料分布不均;  $A=120$  mm, 单趟撒肥变异系数为 16.91%~24.46%, 往复撒肥变异系数最小, 但幅宽距离只有 6~8 m, 不符合企业明示要求(8 m);  $A=100$  mm, 单趟撒肥变异系数变化范围为 16.57%~22.07%, 相对较小且浮动不大, 往复撒肥变异系数由 15.72% 先减小到 10.92%、后增加到 14.85%, 有效幅宽距离从 7 m 增加到 9 m, 施肥量变化范围绝大多数能达到 8 m 幅宽设计要求; 综上所述, 田间作业试验能够指导田间实际作业。

对 3.1 参数验证试验的最优参数组合进行田间作业试验验证, 重复 3 次得到单趟撒肥变异系数为 16.11%、16.91%、16.23%, 平均值为 16.42%; 往复撒肥变异系数为 10.55%、10.95%、10.88%, 平均值为 10.79%; 幅宽距离为 8 m; 田间作业单趟撒肥变异系数平均值与仿真优化值相对误差为 8.10%, 最大相对误差为 11.32%, 田间作业试验结果与仿真试验结果基本一致, 撒肥均匀性好且幅宽均满足撒肥作业要求。

## 4 结 论

本研究设计了一种双落点供料离心式撒肥机构, 通过单因素仿真试验对肥料撒施运动规律的影响因素范围进行筛选取值: 落料点半径  $A=70\sim150$  mm, 离心圆盘转速  $B=340\sim740$  r/min, 施肥量  $C=225\sim825$  kg/hm<sup>2</sup>。

二次旋转正交组合试验与响应曲面分析表明, 施肥量  $C$  对肥料分布均匀性变异系数  $C_v$  影响极显著, 各因素对肥料分布均匀性变异系数影响主次顺序为施肥量  $C$ 、落料点半径  $A$ 、离心圆盘转速  $B$ , 以上各因素对有效幅宽距离  $L$  均极显著。

利用 Design-Expert 软件对目标进行优化求解, 结果为落料点半径  $A=112$  mm、离心圆盘转速  $B=540$  r/min、施肥量  $C=475.05$  kg/hm<sup>2</sup> 时, 肥料分布均匀性变异系数  $C_v=15.49\%$ 、有效幅宽距离  $L=8$  m, 对优化结果进行仿真试验得到:  $C_v=15.19\%$ 、 $L=8$  m, 实际台架试验验证:  $C_v=15.83\%$ 、 $L=7.7$  m。实际工况下多轨迹拟合与叠加, 优化组合实际田间作业叠加均匀性变异系数为 9.12%, 有效提高了离心式撒肥机撒肥均匀性。

以落料点半径 $A$ 、施肥量 $C$ 为试验因素进行田间作业试验,在施肥量 $C=225\sim 825\text{ kg/hm}^2$ 时, $A=80\text{ mm}$ ,单趟撒肥均匀性不高; $A=120\text{ mm}$ ,往复撒肥均匀性最好,但有效幅宽距离太小; $A=100\text{ mm}$ 时,单趟撒肥均匀性变异系数相对较小,往复撒肥变异系数为 $10.92\%\sim 15.72\%$ ,有效幅宽距离达到设计要求。

## 参考文献 References:

- [1] 王赆,徐昌旭,周国朋,等.连续种植翻压紫云英减施化肥对江西早稻产量、品质及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(10):1735-1745.  
WANG Y, XU C X, ZHOU G P, et al. Effects of long-term incorporation of milk vetch combined with reduction of chemical fertilizer on yield, quality and soil fertility of early rice in Jiangxi[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2021, 27(10): 1735-1745.
- [2] 丰宝华.水稻施肥技术与机械化施肥研究[J].种子科技,2022,40(7):86-88.  
FENG B H, Research on rice fertilization technology and mechanized fertilization[J]. Seed science & technology, 2022, 40(7): 86-88.
- [3] 闫湘,金继运,梁鸣早.我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J].土壤,2017,49(6):1067-1077.  
YAN X, JIN J Y, LIANG M Z. Fertilizer use efficiencies and yield-increasing rates of grain crops in China[J]. Soils, 2017, 49(6): 1067-1077.
- [4] 施印炎,陈满,汪小岳,等.稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J].农业机械学报,2017,48(7):97-103.  
SHI Y Y, CHEN M, WANG X C, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(7): 97-103.
- [5] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等.基于EDEM的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J].农业工程学报,2017,33(14):32-39.  
LIU C L, LI Y N, SONG J N, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(14): 32-39.
- [6] 杨立伟,陈龙胜,张俊逸,等.离心圆盘式撒肥机撒肥均匀性试验[J].农业机械学报,2019,50(增刊1):108-114.  
YANG L W, CHEN L S, ZHANG J Y, et al. Test and analysis of uniformity of centrifugal disc spreading[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(Sup1): 108-114.
- [7] 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 X C, CHEN S F, YANG J, et al. Design and experiment on double-disc spreader with wide breadth and highly efficiency[J]. Research on agricultural mechanization, 2015, 37(8): 100-103.
- [8] 胡东彬.锥盘式撒肥装置的参数优化与试验研究[D].石河子:石河子大学,2021.  
HU D B, Parameter optimization and experimental research of cone-disc fertilizer spreading device[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021.
- [9] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等.两级螺旋排肥装置的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(3):10-16.  
CHEN X F, LUO X W, WANG Z M, et al. Design and experiment of fertilizer distribution apparatus with double-level screws[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(3): 10-16.
- [10] 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 H. Development of distribution study on the spreading test system for a spinner spreader[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2007.
- [11] LIEDEKERKE P V, PIRON E, VANGEYTE J, et al. Recent results of experimentation and DEM modeling of centrifugal fertilizer spreading[J]. Granular matter, 2008, 10(4): 247-255.
- [12] 卢帆.凸轮顶板自清式排肥器的设计与试验[D].南昌:江西农业大学,2020.  
LU F, Design and experiment of cam top plate self-cleaning fertilizer apparatus[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020.
- [13] 彭永福.双落种点供料离心式水稻撒播机的设计与试验[D].南昌:江西农业大学,2022.  
PENG Y F, Design and experiment of centrifugal rice spreader with double feeding points[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020.
- [14] 全国农业机械标准化委员会.施肥机械 第1部分:全幅宽撒肥机:GB/T 20346.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.  
Agricultural Machinery to Standardization Administration of China. Fertilization machinery Part 1: Full width spreader: GB/T

- 20346.1—2021[S].Beijing:Standards Press of China,2021.
- [15] 施印炎.基于水稻光谱信息的离心式变量撒肥机的研制[D].南京:南京农业大学,2018.  
SHI Y Y,Design on variable fertilizer spreader with centrifugal discs in spectral reflectance for rice field[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University,2018
- [16] 陈满,施印炎,汪小昆,等.基于光谱探测的小麦精准追肥机设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(5):26-32.  
CHEN M,SHI Y Y,WANG X C,et al.Design and experiment of variable rate fertilizer applicator based on crop canopy spectral reflectance[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2015,46(5):26-32.
- [17] 张国忠,王洋,刘浩蓬,等.离心侧抛式藕田撒肥器设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(19):37-47.  
ZHANG G Z,WANG Y,LIU H P,et al.Design and experiments of the centrifugal side throwing fertilizer spreader for lotus root fields[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2021,37(19):37-47.
- [18] 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等.锥盘式撒肥装置的性能分析与试验[J].农业工程学报,2016,32(11):16-24.  
LYU J Q,SHANG Q Q,YANG Y,et al.Performance analysis and experiment on granular fertilizer spreader with cone disc [J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2016,32(11):16-24.
- [19] FULTON P J,SHEARER A S,HIGGINS F S,et al.A method to generate and use as-applied surfaces to evaluate variable-rate fertilizer applications[J].Precision agriculture,2013,14(2):184-200.
- [20] VILLETTE S,PIRON E,MARTIN R,et al.Estimation of two-dimensional fertiliser mass flow distributions by recording granule impacts[J].Biosystems engineering,2013,115(4):463-473.
- [21] CROZIER C R,ROBERSON G T.Granular fertilizer spreader swath uniformity achieved at varying target application rates [J].Crop management,2014,13(1):1-6.
- [22] 张睿.智能型变量施肥关键技术研究[D].北京:中国农业科学院,2012.  
ZHANG R.The research on key technology of intelligent variable rate fertilization[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2012.
- [23] 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 X Q,SONG J N,ZHANG J K,et al.Working performance and experiment on granular fertilizer spreader with cone disk[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2013,29(19):33-40.
- [24] 陈雄飞,彭永福,刘木华,等.一种离心式种/肥兼用型撒播机:CN114375650B[P].2022-10-11.  
CHEN X F,PENG Y F,LIU M H,et al.A centrifugal seed/fertilizer spreader:CN114375650B[P].2022-10-11.
- [25] 张季琴,刘刚,胡号,等.排肥单体独立控制的双变量施肥控制系统研制[J].农业工程学报,2021,37(10):38-45.  
ZHANG J Q,LIU G,HU H,et al.Development of bivariate fertilizer control system via independent control of fertilizing unit [J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2021,37(10):38-45.
- [26] 韩英,贾如,唐汉.精准变量施肥机械研究现状与发展建议[J].农业工程,2019,9(5):1-6.  
HAN Y,JIA R,TANG H.Research status and development suggestions of precision variable-rate fertilization machine[J].Agricultural engineering,2019,9(5):1-6.
- [27] 李普,梁春英,王紫玉,等.我国精准变量施肥技术研究现状和建议[J].农业工程,2021,11(11):31-34.  
LI P,LIANG C Y,WANG Z Y,et al.Research status and suggestions of precision variable rate fertilization technology in China[J].Agricultural engineering,2021,11(11):31-34.
- [28] 吴爱兵,朱德文,赵国栋.我国固态肥料施肥机械现状及发展对策[J].农业开发与装备,2014(2):27-28.  
WU A B,ZHU D W,ZHAO G D.Present situation and development countermeasures of solid fertilizer fertilization machinery in China[J].Agricultural development & equipments,2014(2):27-28.
- [29] 杨立伟,陈龙胜,张俊逸,等.离心圆盘式撒肥机撒肥均匀性试验[J].农业机械学报,2019,50(增刊1):108-114.  
YANG L W,CHEN L S,ZHANG J Y,et al.Test and analysis of uniformity of centrifugal disc spreading[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2019,50(Sup1):108-114.