doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.018

离心圆盘式撒肥机撒肥均匀性试验

杨立伟[1,2]　陈龙胜[1]　张俊逸[1]　孙　红[1]　刘豪杰[1]　李民赞[1,2]

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了开展基于作物实时传感器的田间变量作业离心圆盘式撒肥机的研究,综合考虑已设计的离心圆盘撒肥机的结构和机理,选取并分析撒肥高度、圆盘叶片位置角、肥料下落位置角 3 个关键参数对双圆盘离心撒肥机撒肥均匀性的影响。基于 Design-Expert 的试验设计,进行了响应面分析试验和单因素试验,分析各因素对撒肥均匀性的影响。响应面分析试验结果表明,各因素对分布变异系数影响由大到小分别为下料位置角、撒肥高度、叶片位置角;经参数优化后,撒肥高度为 68.80 cm、下料位置角为 60°、叶片位置角 29.63°时,肥料分布变异系数最小,为 9.95%;验证试验结果表明,分布变异系数预测值的平均值为 9.95%,试验值的平均值为 18.93%,平均相对误差为 47.26%。单因素试验结果表明,单个因素变化下,撒幅范围内肥料质量分布变化明显;撒肥高度为 70 cm、下料位置角为 30°,当叶片位置角取 22.5°时,肥料分布变异系数最小,为 22.87%;下料位置角 30°、叶片位置角为 22.5°,当撒肥高度取 80 cm 时,肥料分布变异系数最小,为 17.26%;以分布变异系数最小原则,撒肥高度为 80 cm、叶片位置角 22.5°,当下料位置角取 60°时,肥料分布变异系数最小,为 15.76%。

关键词: 离心圆盘撒肥机; 变量施肥; 响应面分析; 变异系数

中图分类号: S224.2; S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)S0-0108-07

Test and Analysis of Uniformity of Centrifugal Disc Spreading

YANG Liwei[1,2]　CHEN Longsheng[1]　ZHANG Junyi[1]　SUN Hong[1]　LIU Haojie[1]　LI Minzan[1,2]

(1. *Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to design and develop the field variable operation manure spreader based on crop real-time sensor, the research on the centrifugal disc spreader was carried out. Considering the structure and mechanism of the designed centrifugal disc spreader, the three key influence parameters were selected, which were spreading height, disc blade inclination angle and fertilizer drop position angle, and the influence on the uniformity of spreading of the double disc centrifugal spreader was analyzed. Based on the experiments designed by Design-Expert software, the response surface analysis tests and single factor orthogonal tests were carried out. Finally, the influence of various factors on the uniformity of spreading was analyzed. The response surface analysis test results showed that the magnitude of the influence of each factor on the distribution coefficient of variation was the blanking position angle, the spreading height, and the blade position angle after optimization of parameters, the fertilizer distribution coefficient of variation was the smallest, which was 9.95%, when the spreading height was 68.80 cm, the blanking position angle was 60°, and the blade position angle was 29.63°. The verification test showed that the average value of the predicted distribution coefficient of variation was 9.95%, the average value of the test value was 18.93%, and the average relative error was 47.26%. The results of single factor orthogonal test showed that under the single factor change, the distribution of fertilizer mass was changed obviously. When only the position of the blade was changed, the height of the spreading, the angle of the

收稿日期: 2019-04-20　修回日期: 2019-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600-2016YFD0200602)、中国农业大学研究生实践教学基地建设项目(ZYXW037)和中国农业大学研究生课程建设项目(HJ2019029、YW2019018)

作者简介: 杨立伟(1981—),女,副教授,主要从事农业物联网研究,E-mail: yangliwei@cau.edu.cn

通信作者: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业系统与农业信息化技术研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

blanking, and the position angle of the blade were 70 cm, 30° and 22.5°, respectively, the coefficient of variation of fertilizer distribution was the smallest, which was 22.87%. When only the height of spreading was changed, the height of spreading, the angle of the blanking, and the position angle of the blade were 80 cm, 30° and 22.5°, respectively, the coefficient of variation of fertilizer distribution was the smallest, which was 17.26%. When only the angle of the blanking was changed, the height of spreading, the angle of the blanking, and the position angle of the blade were 80 cm, 60° and 22.5°, respectively, the coefficient of variation of fertilizer distribution was the smallest, which was 15.76%. Based on the test results, theoretical guidance can be provided for initialization system parameter setting of the variable fertilizer spreader, the improvement of the variable fertilizer application equipment, the performance optimization and the field operation.

Key words: centrifugal disc spreading; variable fertilization; response surface analysis; coefficient of variation

0　引言

施肥机械中，离心圆盘式撒肥机具有结构简单、质量较轻、撒肥幅度大、作业效率高等优点，在欧美国家使用普遍[1-3]，并逐步集成 Greenseeker、Cropcirle 等作物信息实时采集传感器，研制了变量作业撒肥机。国外针对颗粒肥撒肥机械性能研究较多[4-9]。在撒肥机工作性能和作业效果分析中，文献[10－12]模拟仿真研究了肥料颗粒在离心盘的运动，而 OLIESLAGERS 等[13]研究了离心盘角速度、孔口位置、孔口开度对肥料分布的影响；吴爱兵等[14]对撒肥机构本体作业参数和撒肥性能开展了测试和分析；刘彩玲等[15]选取撒肥盘转速、喂入量、喂入角和喂入位置角 4 个参数，进行了单因素和多因素回归正交仿真试验，分析了以上参数对均匀变异系数的影响，并在实验室台架条件下验证其仿真试验结果；SHI 等[16]仿真研究了叶片倾角、圆盘锥角和撒肥高度对撒肥均匀性的影响。在改进型离心式撒肥结构方面，胡永光等[17]设计了一种偏置式撒肥盘茶园施肥机，选取行走速度、撒肥盘叶片偏置角度、撒肥盘叶片个数 3 个参数进行三因素三水平中心组合仿真试验，分析这些因素对撒肥分布变异系数的影响；董向前等[18]设计了一种锥盘式撒飞机构，并分析了喂入角、甩盘转速、撒肥高度对肥料分布变异系数的影响。

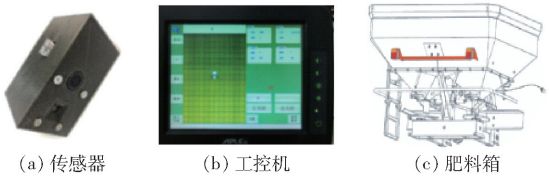
综上，目前相关研究以理论仿真和应用测试相结合展开，离心撒肥机作业的撒肥性能与效果主要通过测试其施肥的一致性进行评价，理论上圆盘式撒肥机的撒肥变异系数在 5% ~10% 之间，受机械本体、多参数协同和作业外部因素等影响，田间施肥测试的实际变异系数通常在 15% ~20% 之间[19]。上述各类研究以撒肥变异系数最小为原则[20]，保证该参数组合下最佳的作业均匀性，但是对于基于作物实时传感器的变量作业撒肥机，固定最佳参数组合的方式，将无法满足撒肥机作业依据作物传感器数据而动态调整的需求。

由于撒肥机性能测试与分析是建立变量施肥机械多参数协同控制的重要基础，为了开展基于作物实时传感器的田间变量作业离心圆盘研究，综合考虑已设计的离心圆盘式撒肥机的结构和机理，选取撒肥高度、叶片位置角、肥料下落位置角 3 个关键参数，分析其对双圆盘离心撒肥机撒肥均匀性的影响；将通过响应面分析试验得到的推荐最优参数组合作为撒肥机初始化设置参数，并通过单因素试验获得撒肥幅宽内不同参数组合下的肥料质量分布状况和对应的肥料分布变异系数，以期建立变量撒肥机控制多参数协同调整的方案。

1　结构与工作原理

1.1　撒肥机结构

基于作物实时传感器的变量撒肥机系统硬件结构如图 1 所示，包括作物光谱学传感器、工控机和肥料箱。其中，作物光谱学传感器用于实时采集作物冠层反射光谱；工控机用于接收并计算作物冠层光谱归一化植被指数（Normalized different vegetation index，NDVI），同时基于变量施肥模型输出撒肥指令至料箱控制器。料箱结构主要由肥料箱、下料口、撒肥盘（含叶片）、传动轴组成，料箱外设控制器通过电动推杆控制下料口开度。



（a）传感器　（b）工控机　（c）肥料箱

图 1　系统硬件结构

Fig. 1　Mechanical structure of hardware system

撒肥机自身质量 405 kg，最大肥料载荷 3 000 kg，横向播撒幅宽为 12 m。两离心撒播圆盘呈对称分布，

每个圆盘都有两个叶片,每个叶片位置可调。

1.2 工作原理

撒肥机悬挂于拖拉机上进行作业。作业时,传感器采集信息并通过 CAN 总线协议传送至工控机,工控机人机交互界面会显示传感器采集的信息,指导用户施肥。用户通过操作工控机对撒肥机下料口开闭及开口大小进行控制,肥料经过下料口落至高速旋转的离心盘,被撒播出去,离心盘旋转动力来源于拖拉机传动轴。

2 物料特性参数

试验中所用肥料为尿素,其颗粒特性参数如表 1 所示。

表 1 肥料颗粒特性参数

Tab. 1 Fertilizer particle characteristic parameters

参数	数值
颗粒直径/mm	1.18 ~ 3.35
泊松比	0.23
剪切模量/MPa	10
颗粒密度/(kg·m^{-3})	1.25×10^{3}
颗粒与颗粒之间弹性恢复系数	0.11
颗粒与钢材之间弹性恢复系数	0.41
颗粒与颗粒之间动摩擦因数	0.28
颗粒与钢材之间动摩擦因数	0.22
颗粒与颗粒之间静摩擦因数	0.32
颗粒与钢材之间静摩擦因数	0.33

3 多因素响应面分析试验

3.1 试验设计与方法

参考美国 ASAE S341 圆盘式撒肥机撒肥试验方法和试验标准[19,21],采用二维矩阵收集法,在撒肥区域内摆放 110 个收集框采集 110 个样本。由于离心式撒肥机横向幅宽较大更易产生误差,所以试验以横向撒肥变异系数为评价指标,其计算公式为

$$C_V=\frac{S}{\overline{m}}\times100\% \tag{1}$$

其中

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i-\overline{m})^2}{n-1}} \tag{2}$$

式中 C_V——变异系数 S——标准差

m_i——某个样本质量

$\overline{m}$——样本平均质量

n——样本数

试验选取撒肥高度、下料位置角、叶片位置角 3 个因素运用 Design-Expert 软件设计 3 因素 3 水平二次回归正交试验[22-23],试验因素编码如表 2 所示,试验设计方案如表 3 所示,表中 A、B、C 为因素编码。试验在风速小于 2 m/s 的天气下进行,车速 6 km/h,肥料开度为总开口的 40%,肥料流速 0.4 kg/s,圆盘转速 720 r/min,撒肥横向幅宽 12 m。依据表 3 的试验方案,试验在河北省涿州市中国农业大学科技园进行,图 2 为撒肥示意图,图 3 为试验场景,每组试验完成后,对每个框中的肥料进行装袋称量,记录数据并计算肥料分布变异系数。

表 2 因素水平编码

Tab. 2 Coding of factors and levels

编码	因素		
	撒肥高度/cm	下料位置角/(°)	叶片位置角/(°)
-1	50	0	0
0	65	30	22.5
1	80	60	45

表 3 试验设计与结果

Tab. 3 Test design and results

试验序号	A	B	C	变异系数 Y/%
1	0	-1	1	35.15
2	0	0	0	13.81
3	-1	1	0	20.85
4	-1	0	-1	14.91
5	1	-1	0	44.46
6	1	1	0	15.76
7	0	0	0	13.81
8	0	0	0	13.81
9	-1	-1	0	13.81
10	-1	0	1	31.41
11	0	0	0	13.81
12	0	1	1	9.65
13	0	1	-1	19.18
14	1	0	-1	24.17
15	0	-1	-1	23.76
16	0	0	0	13.81
17	1	0	1	29.25

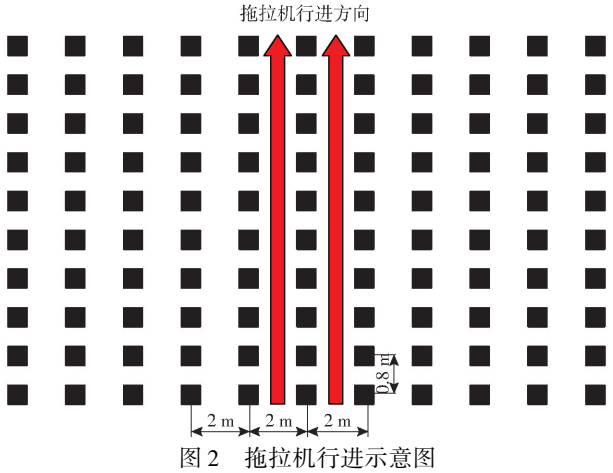


图 2 拖拉机行进示意图

Fig. 2 Tractor travel diagram



图 3　试验场景

Fig. 3　Test scene

3.2　结果与分析

3.2.1　方差分析与回归模型建立

依照试验设计方案，每组试验算得的变异系数如表 3 所示，17 组试验变异系数位于 9.65% ~ 29.25%之间。在 Design-Expert 中，可通过方差分析和建立回归模型得出各因素对分布变异系数的影响。方差分析结果如表 4 所示，由表 4 可知，调整 R^2 为 0.900 0，表明回归模型与试验值符合程度较好[24]。模型 F 值为 17，$P = 0.000\ 6 < 0.01$，表明变异系数与参数间有较显著的相关关系，拟合水平较好。A、B、C、AB、BC、A^2、B^2、C^2的 P 值均小于 0.05，说明对模型影响显著；其中，B、AB、BC、A^2的 P 值小于 0.01，说明对模型影响极为显著；AC 的 P 值大于 0.05，说明对模型影响不显著，模型中可不予考虑。根据 P 值可知各参数对分布变异系数由大到小顺序为：B、A、C，即下料位置角、撒肥高度、叶片位置角。去除不显著因素，可得分布变异系数 Y 与影响因素编码值二次回归方程

$$Y = 13.81 + 3.03A - 7.52B + 2.93C - 6.84AB - 5.23BC + 7.50A^2 + 4.5B^2 + 3.62C^2 \quad (3)$$

表 4　方差分析

Tab. 4　Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	1 339.57	9	148.84	17	0.000 6
A	73.63	1	73.63	8.41	0.023 0
B	451.95	1	451.95	51.62	0.000 2
C	68.68	1	68.68	7.84	0.026 5
AB	187.01	1	187.01	21.36	0.002 4
AC	32.60	1	32.60	3.72	0.095 0
BC	109.41	1	109.41	12.50	0.009 5
A^2	237.08	1	237.08	27.08	0.001 2
B^2	85.41	1	85.41	9.75	0.016 8
C^2	55.21	1	55.21	6.31	0.040 3
残差	61.29	7	8.76		
失拟	61.29	3	20.43		
R^2	0.956 3				
调整 R^2	0.900 0				

3.2.2　因素交互响应面分析与试验验证

（1）多因素交互响应面分析

在 Design-Expert 中通过响应面分析得出两因素相互作用对分布变异系数的影响，如图 4 所示。

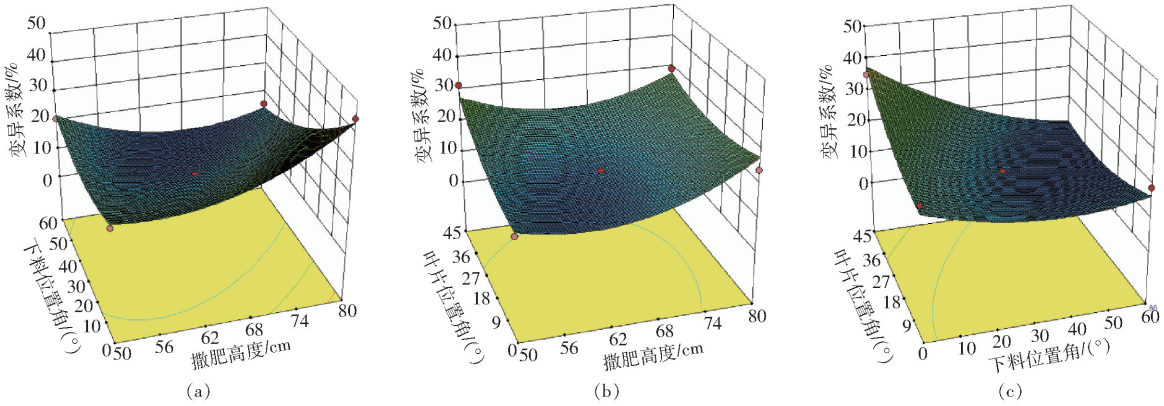


图 4　因素交互作用的响应面分析

Fig. 4　Response surface analysis of factor interaction

由图 4a 可知，下料位置角对分布变异系数的影响比撒肥高度大。分布变异系数在撒肥高度为 50 ~ 65 cm 时变异系数随高度增加而减小，撒肥高度为 65 ~ 80 cm 时变异系数随高度的增大而增大；变异系数随下料位置角在 0° ~ 60°范围内的增大而减小。在下料位置角为 60°、高度为 65 cm 时，变异系数最小。

由图 4b 可知，撒肥高度对分布变异系数的影响比叶片位置角大。撒肥高度为 50 ~ 58 cm 时变异系数随高度增加而减小，撒肥高度为 58 ~ 80 cm 时变异系数随高度的增大而增大；叶片位置角为 0° ~ 45°时，变异系数随叶片位置角的增大而增大。在叶片位置角为 0°、高度为 58 cm 时，变异系数最小。

由图 4c 可知，下料位置角对变异系数的影响比叶片位置角大。下料位置角为 0° ~ 60°时，变异系数随下料位置角的增大而减小，叶片位置角为 0° ~ 45°时，变异系数随叶片位置角的增大而增大。在下料位置角为 60°、叶片位置角为 45°时，变异系数最小。

基于回归方程和响应面分析,在各参数范围约束的条件下,以分布变异系数最小原则进行参数优化。优化结果为:撒肥高度 68.80 cm、下料位置角 60°、叶片位置角 29.63°,在此参数组合下分布变异系数为 9.95%。

(2)优化参数组合试验验证

利用上述优化参数组合,在中国农业大学涿州试验基地进行了验证试验[25-26],试验结果如表 5 所示。在响应面推荐最优参数组合下,分布变异系数预测值较小,均为 9.95%。实际验证测试分布变异系数范围为 17.20% ~19.96%,位于田间实际作业常规范围;分布变异系数平均值方面,试验均值为 18.93%,相对误差均值为 47.26%。

表 5 验证试验结果

Tab.5 Verification test results %

试验序号	分布变异系数		相对误差
	预测值	试验值	
1	9.95	19.51	48.99
2	9.95	19.96	50.15
3	9.95	19.05	47.76
4	9.95	17.20	42.15
平均值	9.95	18.93	47.26

受环境、机器本身等环境因素的影响,在推荐最优参数下获得的肥料分布变异系数实际值与理想值有差距,因此作业时,需要在推荐最优参数的指导下,动态调整因素值。为合理调整撒肥参数,进一步开展了单因素的试验。

4 单因素试验

4.1 叶片位置角对肥料分布变异系数的影响

按照小麦追肥实际需求为例,撒肥高度为 70 cm,下料位置角为 30°,叶片位置角在 0° ~45°间隔 22.5°进行试验,试验结果如图 5 所示。肥料分布变异系数在叶片位置角为 45°时最大,为 30.52%;分布变异系数在叶片位置角为 22.5°时最小,为 22.87%。撒肥变异系数最大值与最小值均大于 20%,不满足田间作业要求。由图 5 可以看出,叶片位置角较小时,肥料质量分布较均匀,且撒肥幅宽内中部区域肥料质量随着角度增大而增大。根据分布变异系数最小原则,在撒肥高度 70 cm,下料位置角 30°时,当叶片位置角取 22.5°时,肥料分布变异系数最小,为 22.87%。

4.2 撒肥高度对肥料分布变异系数的影响

取下料位置角为 30°,叶片位置角为 22.5°,撒肥高度在 50 ~80 cm 间每 10 cm 取值进行试验,试验结果如图 6 所示。肥料分布变异系数在撒肥高度

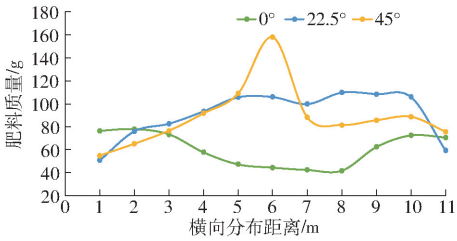


图 5 叶片位置变化下的肥料质量分布

Fig.5 Mass distribution under varying blade position

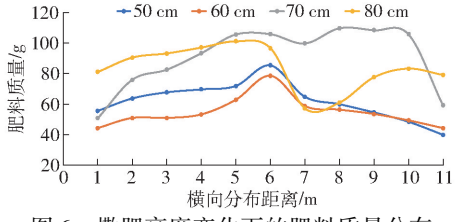


图 6 撒肥高度变化下的肥料质量分布

Fig.6 Mass distribution under varying fertilization height

70 cm 时最大,为 22.88%;肥料分布变异系数在撒肥高度为 80 cm 时最小,为 17.26%。由图 6 可以看出,撒肥高度分别为 50、60 cm 时,肥料质量分布近似倒“V”形;撒肥高度为 80 cm 时,肥料分布近似“M”形。以分布变异系数最小原则,下料位置角 30°,叶片位置角为 22.5°时,当撒肥高度取 80 cm 时,肥料分布变异系数最小,为 17.26%。

4.3 下料位置角对分布变异系数的影响

取撒肥高度为 80 cm,叶片位置角为 22.5°,下料位置角在 0° ~60°间每隔 15°取值进行试验,试验结果如图 7 所示。

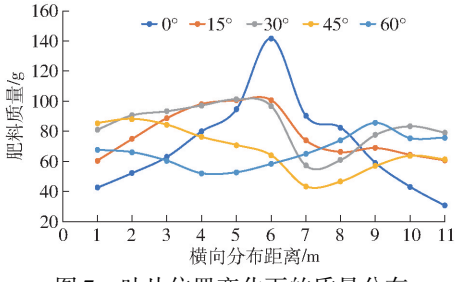


图 7 叶片位置变化下的质量分布

Fig.7 Mass distribution under varying blade position

肥料分布变异系数在下料位置角为 60°时最小,为 15.76%;肥料分布变异系数在下料位置角为 0°时最大,为 44.46%。肥料分布变异系数最大值与最小值相差较大。由图 7 可知,下料位置角为 0°时,肥料质量分布呈倒“V”形,且随下料位置角的增大,分布在撒肥幅宽内中间区域的肥料质量随之减少。以分布变异系数最小原则,在撒肥高度 80 cm,叶片位置角 22.5°时,当下料位置角取 60°时,肥料分布变异系数最小,为 15.76%。

由上述单因素分析结果可知,每组参数组合下,都有特定的肥料分布情况和对应肥料分布变异系

数，可供作业时选择与调整。当撒肥高度与下料位置角一定时，调整叶片位置角得到的肥料分布变异系数可能满足不了田间作业要求，因此当确定合适的叶片位置角时，应尽量调整撒肥高度和下料位置角使肥料分布变异系数达到作业要求。又由上述分析知下料位置角为0°时，变异系数为44.46%，所以应避免下料位置角设置为0°。

5　结论

（1）通过多因素响应面分析试验，进行了方差分析并建立了回归方程，得出各因素对肥料分布变异系数的影响由大到小为：下料位置角、撒肥高度、叶片位置角。

（2）通过因素交互响应面分析进行参数优化，得到优化结果为：在撒肥高度68.80 cm、下料位置角60°、叶片位置角29.63°时，肥料分布变异系数最小，为9.95%；通过验证试验得知，肥料分布变异系数试验值的平均值为18.93%，满足离心圆盘式撒肥机田间作业要求。

（3）通过单因素试验，分析了撒肥高度、叶片位置角、下料位置角单个因素变化对肥料分布变异系数的影响。同时，在每组参数组合下，均获得特定的肥料分布情况和对应肥料分布变异系数，可供作业时选择与调整。

参　考　文　献

[1] PHILIPSON K. On the production of monodisperse particles with a spinning disc[J]. Journal of Aerosol Science, 1973, 4(1): 51 – 57.

[2] FULTON J P, SHEARER S A, HIGGINS S F, 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.

[3] VILLETTE S, COINTAULT F, PIRON E, et al. Centrifugal spreading: an analytical model for the motion of fertilizer particles on a spinning disc[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2): 157 – 164.

[4] VILLETTE S, PIRON E, MICLET D. Hybrid centrifugal spreading model to study the fertilizer spatial distribution and its assessment using the transverse coefficient of variation[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2017, 137(2): 115 – 129.

[5] 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.

[6] CHATTHA H S, ZAMAN Q U, CHANG Y K, et al. Variable rate spreader for real-time spot-application of granular fertilizer in wild blueberry[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2014, 100(1): 70 – 78.

[7] ABBOUOUCHERIF E M, PIRON E, CHATEAUNEUF A, et al. On-the-field simulation of fertilizer spreading: part 1—modeling[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2017, 142: 235 – 247.

[8] ABBOUOUCHERIF E M, PIRON E, CHATEAUNEUF A, et al. On-the-field simulation of fertilizer spreading: part 2—uniformity investigation[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2017, 141: 118 – 130.

[9] ABBOUOUCHERIF E M, PIRON E, CHATEAUNEUF A, et al. On-the-field simulation of fertilizer spreading: Part 3—Control of disk inclination for uniform application on undulating fields[J]. Computer and Electronic in Agriculture, 2019, 158: 150 – 158.

[10] 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(4): 213 – 234.

[11] DINTWA E, LIEDEKERKE P V, OLIESLAGERS R, et al. Model for simulation of particle flow on a centrifugal fertiliser spreader[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 407 – 415.

[12] VAN LIEDEKERKE P, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Powder Technology, 2009, 190(3): 348 – 360.

[13] OLIESLAGERS R, RAMON H, BAERDEMAEKER J D. Calculation of fertilizer distribution patterns from a spinning disc spreader by means of a simulation model[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(2): 137 – 152.

[14] 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 Aibing, ZHU Dewen, ZHAO Guodong. Current situation and development countermeasures of solid fertilizer fertilization machinery in China [J]. Agricultural Development and Equipments, 2014(2): 27 – 28. (in Chinese)

[15] 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 Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and test of centrifugal disc spreader based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32 – 39. (in Chinese)

[16] SHI Y, CHEN M, WANG X, et al. Numerical simulation of spreading performance and distribution pattern of centrifugal variable-rate fertilizer applicator based on DEM software[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 144: 249 – 259.

[17] 胡永光，杨叶成，肖宏儒，等. 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J]. 农业机械学报，2016, 47(5): 77 – 82.
HU Yongguang, YANG Yecheng, XIAO Hongru, et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreading process for tea garden fertilizer applicator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 77 – 82. (in Chinese)

[18] 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. Performance analysis and test of cone-disk granule fertilizer spreading mechanism [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19):33 - 40. (in Chinese)

[19] SOGAARD H T, KIERKEGAARD P. Yield reduction resulting from uneven fertilizer distribution[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6):1749 - 1752.

[20] Procedure for measuring distribution uniform and calibrating granular broadcast spreaders:ISO ASAE S341.2:2006[S].

[21] Equipment for distributing fertilizers-test methods—part2: fertilizer distributors in lines: ISO 5690: 1984[S].

[22] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.

[23] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

[24] 陈树人, 段建, 姚勇,等. 环模式成型机压缩水稻秆成型工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22):32 - 41.
CHEN Shuren, DUAN Jian, YAO Yong, et al. Optimization of processing parameters of RSM compressing rice straw molding [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22):32 - 41. (in Chinese)

[25] 袁志发,周静芋. 实验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000.

[26] JONES J R, LAWRENCE H G, YULE I J. A statistical comparison of international fertilizer spreader test methods—confidence in bout width calculations[J]. Powder Technology, 2008, 184(3):337 - 351.

[27] 刘宇欣, 肖志刚, 杨庆余, 等. 挤压复合酶法制备玉米多孔淀粉工艺参数优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4):171 - 178.
LIU Yuxin, XIAO Zhigang, YANG Qingyu, et al. Optimization of process parameters for the preparation of corn porous starch by extrusion complex enzyme method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 171 - 178. (in Chinese)

[28] 程浈浈, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2017,48(增刊):22 - 29.
CHENG Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Optimization of parameter response surface method for sprayer of rolling variable in dwarf dense planting orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):22 - 29. (in Chinese)

(上接第 95 页)

[14] 陈满,施印炎,汪小旦,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 Man,SHI Yinyan,WANG Xiaochan,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. (in Chinese)

[15] 杨硕,王秀,翟长远,等. 支持种肥监测的变量施肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):145 - 153.
YANG Shuo,WANG Xiu,ZHAI Changyuan,et al. Design and test on variable rate fertilization system supporting seeding and fertilizing monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):145 - 153. (in Chinese)

[16] 戚武振,王金星,刘双喜,等. 稻麦变量施肥机控制系统设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(8):72 - 79.
QI Wuzhen,WANG Jinxing,LIU Shuangxi,et al. Design and experiment of control system for rice and wheat variable rate fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(8):72 - 79. (in Chinese)

[17] LIANG Chunying. Research of PID algorithm for valve controlled hydraulic motor variable rate fertilizer control system[C]// Proceedings of 7th IFIP WG 5.14 International Conference,CCTA,2013.

[18] XU Taosheng. A novel variable rate fertilization system based on the Android platform[C]// Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing,2015.

[19] CHATTHA H S, ZAMAN Q U, CHANG Y K, et al. Variable rate spreader for real-time spot-application of granular fertilizer in wild blueberry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100:70 - 78.

[20] 孟志军,赵春江,付卫强,等. 变量施肥处方图识别与位置滞后修正方法[J]. 农业机械学报,2011,42(7):204 - 209.
MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, FU Weiqiang,et al. Prescription map identification and position lag calibration method for variable rate application of fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(7):204 - 209. (in Chinese)

[21] 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)