

杂交水稻制种气力碰撞组合式授粉的花粉分布

李中秋¹, 汤楚宙^{1,2*}, 李明^{1,2}, 罗海峰^{1,2}

(1.湖南农业大学工学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省现代农业装备工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128)

摘要:采用自制的气力碰撞组合授粉试验装置,以杂交水稻花粉的有效分布面积比率、平均分布密度、分布不均匀度为评价指标,对影响授粉均匀性的因素(气流速度、喷气管道放置相对位置、喷孔中心距、气流作用角度、喷孔直径)进行5因素4水平正交试验,考察各因素对授粉均匀性的影响,对试验结果进行极差分析、方差分析和多指标矩阵分析。结果表明,5个因素主次排序及较优水平依次为气流速度6 m/s,喷气管道放置相对位置高于碰杆10 cm,喷孔中心距25 mm,气流作用角度倾斜向上20°,喷孔直径8 mm。组合授粉较单一授粉方式的花粉有效分布面积率明显提高,花粉分布不均匀度显著下降,花粉空间传播性能更好。

关键词:杂交水稻;制种;授粉;气力;碰撞;组合;花粉分布

中图分类号: S334.2⁺²

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2015)03-0325-07

Pollen distribution of pneumatic and collision combined pollination for hybrid rice breeding

Li Zhongqiu¹, Tang Chuzhou^{1,2*}, Li Ming^{1,2}, Luo Haifeng^{1,2}

(1.College of Engineer, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Modern Agricultural Equipment, Changsha 410128, China)

Abstract: Pollination is an important part during hybrid rice seed production. Uniform and sufficient pollination has significant meaning for improving seed setting rate and seed production. To study the effect of pollen distribution by pneumatic and collision combined pollination on hybrid rice breeding, a pneumatic and collision combined pollination test apparatus was designed by introducing the air waft mechanism to the collision pollination test device. By using the jet pipe placed relative percentage, airflow velocity of nozzle, airflow tilt angle, nozzle diameter, nozzle hole center distance as influence factors, five factors and four levels of multi-factor orthogonal experiment were performed to validate the effect of various factors on pollination uniformity. Using effective distribution area ratio, mean density and non-uniform degree of pollen distribution as three evaluation indexes, analyzing the test results by range analysis, variance analysis and matrix analysis. The order of the five influence factors is airflow speed, relative position of jet pipe placed, center distance of nozzle hole, airflow inclined angle, nozzle hole diameter, respectively. The optimal combination of the factors for pneumatic and collision combined pollination in hybrid rice breeding are airflow speed of 6 m/s, jet pipe placed above collision rod of 10 cm, nozzle hole' center distance of 25 mm, airflow inclined angle up to 20°, and nozzle hole diameter of 8 mm. Compared with single pneumatic pollination and single collision pollination, the combined pollination obviously improve the effective distribution area ratio of the pollens as well as a significant reduction in the degree of uneven distribution of pollen and the better propagation characteristics of pollens.

Keywords: hybrid rice; breeding; pollination; pneumatic; collision; combined; pollen distribution

有效授粉是保证杂交水稻制种成功的关键,均匀、充分的授粉能确保种子的结实率,提高制种的产量和质量^[1-2]。现行的杂交水稻制种授粉以“绳索拉花”和“竹竿赶粉”为主,劳动强度较大,授粉效率低,授粉明显不均,制种产量较低。机械授粉设备大多停留在理论和专利阶段,生产上尚无大面积推广利用的授粉机械和配套技术^[3]。现行的人工辅助授粉方式,可分为气力式和碰撞式 2 类。碰撞式授粉是传统的方式,使用授粉工具高速碰撞父本穗头或者茎秆,使父本花粉弹离飞散而落到母本区域。近年来,气力式授粉装备的研究进展迅速。汪沛等^[4]对无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场进行了测量;李继宇等^[5-6]对单旋翼和多旋翼电动无人直升机用于杂交水稻辅助授粉的作业参数进行了优选;丁素明等^[7]研制了手持式风送授粉机并应用于果树授粉试验;王慧敏等^[8]对气力授粉参数进行了优选。研究表明,气力授粉的生产效率高,作用效果较好,但单一的气力式授粉存在较明显的花粉分布不均匀的局限^[9]。黄震^[10]对碰撞授粉参数进行了优选,指出碰撞力能促进父本开花散粉,碰撞授粉时花粉脱离父本较彻底,花粉扩散量和分布均匀性较好,但花粉的空间传播能力较差,扩散距离较近。

笔者尝试采用气力碰撞组合授粉,在碰杆碰撞父本植株的瞬时通过碰杆上方或下方的喷气管道喷射气流,使花粉扩散完成授粉。通过设计 5 因素

4 水平的气力碰撞组合授粉试验,分析对比花粉分布均匀性等授粉效果,以期得到较优的气力参数与碰撞参数组合,为进一步研究田间气力碰撞授粉机械提供理论依据。

1 气力碰撞组合式授粉试验

1.1 试验材料

试验所选材料为恢复系(父本)1356,3 月底播种,7 月下旬至 8 月中旬抽穗扬花。幼穗初始分化时,将植株带土移至培养钵内,每钵移植 1 株,共 48 株,常规水肥管理。试验期间,室内平均温度为 26℃,最高温度约 35℃,最低温度约 23℃,适合杂交水稻的抽穗开花^[11-12]。

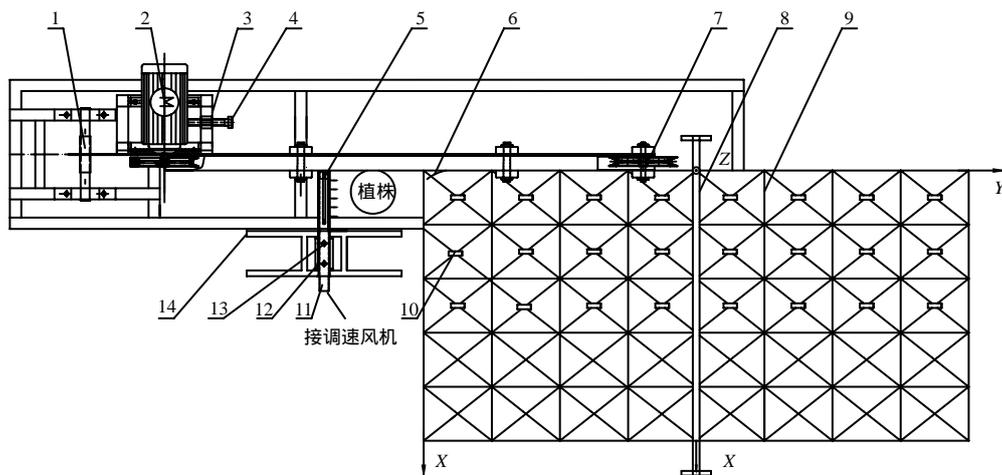
1.2 试验仪器与设备

风机为 CZR-52 离心式交流风机,功率 150 W,全压 490 Pa,最大风量 3.2 m³/h,为保证每个喷封口气流速度和气压的一致性,整个风道通过变径管相连接,由变频器改变风机叶轮转速来调节出风口风速。

显微镜为 XSP-6C 型生物显微镜,光学放大倍数为 40~1 600 倍。

风速仪为 AVM-07 型风速计,其有效测量范围 0~45 m/s。

自制的气力碰撞组合授粉试验装置如图 1 所示,由电机带动皮带轮转动,皮带上安装橡胶棒制



1 支撑轴;2 调速电机;3 电机固定座;4 皮带张紧机构;5 碰杆;6 碰杆阻挡板;7 皮带轮;8 竖直采样板;9 水平采样板;10 载玻片;11 喷气管道;12 开槽外套管;13 紧固螺栓;14 调节支架。

图 1 气力碰撞组合式授粉装置

Fig.1 The sketch of test device for pneumatic and collision combined pollination

作的碰杆,电机转速可调,碰撞速度、碰撞位置、碰撞角度可调节。在碰杆上方或下方安装喷气管道(直径 40 mm),喷气管道面向杂交水稻植株的一侧均匀布置 5 个喷气圆孔,靠近碰撞装置的一端封闭,另一端与调速风机出风口通过变径管连接,风机的风速可调节,喷气管道外面套有开槽的管道,套管靠近碰撞装置的一端安装一根细长螺杆,碰撞装置中安装在皮带轮上的碰杆碰撞父本植株及细长螺杆的瞬时带动套管转动,至水平位置时,套管的开槽部位与喷气管道的喷孔重合,喷孔外露,气流通通过喷气孔吹向杂交水稻父本植株。

采样板采用单一授粉方式时自制的水平采样板和竖直采样板^[9-10]。考虑对称性,水平采样板 X 轴放置 3 列载玻片, Y 轴放置 8 行载玻片; 竖直采样板 X 轴放置 5 列载玻片, Z 轴放置 7 行载玻片。水平采样板放置位置比植株穗头低 0.2 m, 近端距植株 20 cm; 竖直采样板垂直于水平采样板放置在植株前方 1 m 处, 底端比植株穗头低 0.4 m。载玻片上涂凡士林用于采集花粉。

1.3 试验设计

前期通过碰撞授粉试验, 优选出碰撞授粉的最优试验参数后^[10], 加入气力授粉参数, 即喷气管道放置相对位置、气流速度、气流作用角度、喷孔直径、喷孔中心距, 通过单因素试验, 选取 4 水平, 进行正交试验。试验因素及水平如表 1 所示。

表 1 试验因素及水平

Table 1 Factors code table

水平	喷气管道放置位置 A/cm	气流速度 B/(m·s ⁻¹)	气流作用角度 C/(°)	喷孔直径 D/mm	喷孔中心距 E/mm
1	高于碰杆 10	2	水平向上 20°	6	100
2	高于碰杆 5	4	水平向上 10°	8	50
3	低于碰杆 5	6	水平向前 0°	10	40
4	低于碰杆 10	8	水平向下 5°	12	25

1.4 测定项目和方法

试验于杂交水稻父本植株处于旺盛开花期的上午 11:00—12:00 进行, 将待测试的水稻植株逐株放置于喷气管道前方 40 cm, 调节气力碰撞组合授粉试验装置达到处理组合要求的工作参数。每个处理抽选 3 株进行 3 次试验, 以 3 次试验的平均值作

为最终试验数据, 喷气管道的喷气孔面向植株穗层, 单次试验风机出风时间固定为 20 s, 试验后把载玻片置于放大 100 倍的生物显微镜下观察采样点花粉的分布, 每个载玻片根据等距取样方法, 沿长轴线的方向划分成 5 个视野, 分别是对称中心、左右距对称中心 15 mm 和左右距对称中心 30 mm, 用 5 个采样点的花粉数量的平均值作为该载玻片上单个视野的花粉分布量。分别记载水平采样板和竖直采样板上花粉最大值、最大值的坐标等。统计水平采样板和竖直采样板上各个载玻片单个视野的花粉分布量相加, 作为水平分布总量和竖直分布总量, 两者之和为花粉分布总量。

选择水平采样板上花粉有效分布面积比率 y_1 、花粉平均分布密度 y_2 、花粉分布不均匀度 y_3 为目标函数。花粉有效分布面积定义为单视野内花粉平均值大于或等于 2 粒的分布面积^[12-13], 其采样点视为有效采样点, 其所占比率由式(1)计算。花粉平均分布密度为所有采样点花粉量的平均值, 由式(2)计算。花粉分布不均匀度为单次试验中所有采样点花粉数量的方差, 由式(3)计算。

$$y_1 = \frac{a}{16} \times 100\% \quad (1)$$

$$y_2 = \frac{\sum_{i=1}^{24} b_i}{24} \quad (2)$$

$$y_3 = \frac{\sum_{i=1}^{24} (b_i - y_2)^2}{23} \quad (3)$$

式中: a 为单次试验中花粉大于或等于 2 粒的采样点个数; b_i 为单次试验中第 i 个采样点的花粉量, $1 \leq i \leq 24$ 。

利用 Matlab 软件的 Surf 函数生成花粉水平、竖直分布的三维图, 以便于直观分析花粉分布规律。利用 Spss 和 Matlab 软件对试验数据进行极差分析、方差分析及多指标评价模型的建立和分析, 得到各因素影响指标值的主次顺序和最优方案。

2 试验结果与分析

2.1 正交试验结果

正交试验结果列于表 2。

表 2 正交试验结果

Table 2 Protocol and result of orthogonal experiment

编号	A/cm	B/(m·s ⁻¹)	C/(°)	D/mm	E/mm	y ₁ /%	y ₂ /粒	y ₃
1	高于碰杆 10	2	水平向上 20	6	100	62.5	5.02	28.54
2	高于碰杆 10	4	水平向上 10	8	50	58.3	2.14	2.33
3	高于碰杆 10	6	水平向前 0	10	40	54.2	3.06	9.01
4	高于碰杆 10	8	水平向下 5	12	25	41.7	2.16	3.15
5	高于碰杆 5	2	水平向上 10	10	25	29.2	2.16	7.04
6	高于碰杆 5	4	水平向上 20	12	40	20.8	1.56	2.72
7	高于碰杆 5	6	水平向下 5	6	50	37.5	2.28	5.06
8	高于碰杆 5	8	水平向前 0	8	100	4.2	0.71	0.55
9	低于碰杆 5	2	水平向前 0	12	50	70.8	5.18	41.13
10	低于碰杆 5	4	水平向下 5	10	100	0.0	0.68	0.14
11	低于碰杆 5	6	水平向上 20	8	25	70.8	2.35	1.33
12	低于碰杆 5	8	水平向上 10	6	40	45.8	0.24	11.9
13	低于碰杆 10	2	水平向下 5	8	40	45.8	3.19	16.53
14	低于碰杆 10	4	水平向前 0	6	25	50.0	2.89	17.1
15	低于碰杆 10	6	水平向上 10	12	100	37.5	2.34	9.43
16	低于碰杆 10	8	水平向上 20	10	50	37.5	2.71	15.45

2.2 花粉分布

不同处理组合下花粉分布总量如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 1 号、9 号处理, 花粉总量

及水平分布量较多, 3 号、12 号、13 号处理的花粉总量相差不大。花粉水平分布较大(表 3), 变化较明显, 竖直分布较少, 变化不明显。

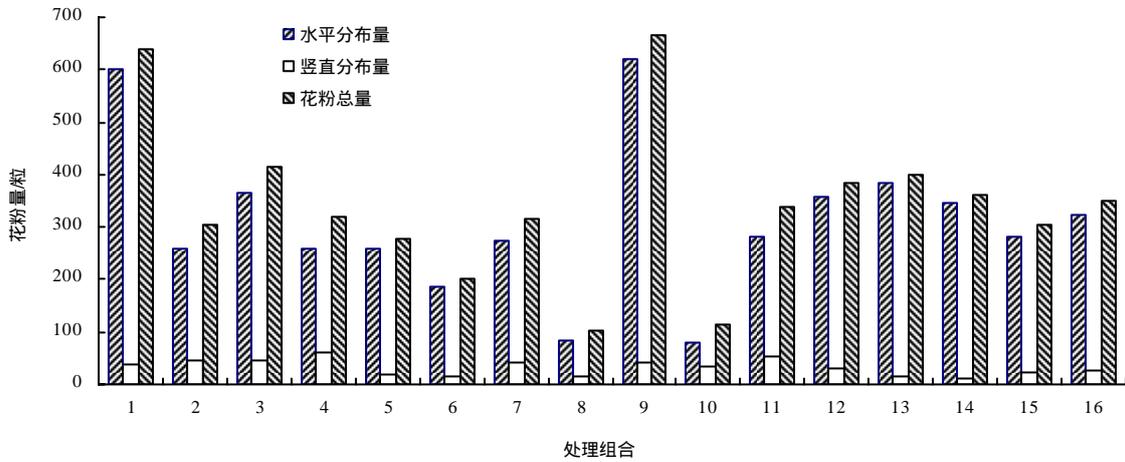


图 2 不同组合处理的花粉量

Fig.2 Pollen distribution under different treatments

表 3 不同组合下花粉水平分布

Table 3 Horizontal distribution of pollens under different treatments

处理	花粉量 峰值/粒	峰值位置 坐标	大于 10 粒 的面积比/%	花粉水平 分布总量/粒	处理	花粉量 峰值/粒	峰值位置 坐标	大于 10 粒 的面积比/%	花粉水平 分布总量/粒
1	19.4	x ₃ y ₁	0.13	602	9	25.8	x ₃ y ₁	0.17	621
2	6.6	x ₃ y ₂	0.00	257	10	1.6	x ₃ y ₂	0.00	81
3	13.6	x ₃ y ₁	0.04	367	11	5.2	x ₃ y ₂	0.00	282
4	5.8	x ₃ y ₁	0.00	259	12	14.0	x ₃ y ₁	0.04	356
5	12.2	x ₃ y ₁	0.04	259	13	16.2	x ₃ y ₁	0.08	383
6	7.4	x ₃ y ₁	0.00	187	14	17.4	x ₃ y ₁	0.08	347
7	8.4	x ₃ y ₁	0.00	273	15	11.4	x ₃ y ₁	0.08	281
8	3.4	x ₃ y ₁	0.00	85	16	18.6	x ₃ y ₁	0.04	325

由表 2、表 3 可知，9 号处理，花粉量峰值和花粉有效作用面积比率最大，最大花粉量出现在水平采样板上最靠近植株的位置。11 号处理的有效作用面积比率与 9 号处理相同，但花粉量峰值较小。

由于竖直采样板上采集的花粉数量显著少于水平采样板，为大体分析花粉竖直分布情况，竖直采样板上的花粉有效分布面积定义为单视野内花粉平均值大于或等于 0.2 粒的分布面积，其采样点为有效采样点，所占比率为有效采样点与总采样点数的比值。不同组合下花粉竖直分布如表 4 所示。

表 4 不同组合的花粉的竖直分布

Table 4 Vertical distribution of pollens under different treatments

处理	花粉量 峰值/粒	峰值位置坐标	有效作用面 积比率/%	花粉竖直分 布总量/粒
1	1.2	x_4z_1	45.7	39
2	0.8	$x_3z_3, x_5z_3, x_5z_4, x_5z_6$	62.9	46
3	1.6	x_4z_6	74.1	46
4	1.8	x_5z_2	48.6	59
5	0.6	x_5z_1	42.9	20
6	0.8	x_5z_6	17.1	14
7	1.0	x_2z_1	57.1	43
8	0.6	x_1z_5, x_4z_1, x_5z_1	28.6	17
9	0.8	$x_1z_6, x_2z_5, x_2z_6, x_5z_5$	87.5	43
10	1.2	x_2z_3	65.7	35
11	1.0	x_2z_4, x_5z_4	77.1	55
12	0.8	x_5z_3	57.6	29
13	0.8	x_3z_6	25.7	16
14	0.6	x_5z_3	14.3	13
15	0.6	x_1z_3	51.4	24
16	0.8	x_5z_6	48.6	25

由表 4 可以看出，4 号处理竖直采样板上的花粉总量较多，花粉量峰值最大，采样点花粉峰值 1.8 粒位于紧靠植株的第 5 列第 2 排。9 号处理的有效作用面积比率最大，花粉量峰值最大值为 0.8 粒，分别位于第 1 列第 6 排，第 2 列第 5 排，第 2 列第 6 排，第 5 列第 5 排。

2.3 正交试验结果的极差分析

花粉有效分布面积比率 y_1 极差分析如表 5 所示。从表 5 可知，对花粉有效分布面积比率 y_1 的影响大小排序依次是喷气管道放置相对位置、喷孔中心距、气流速度、喷孔直径、气流作用角度。最优组合为 $A_1E_2B_1D_1C_1$ ，即喷气管道放置高于碰杆 10 cm，喷孔中心距 50 mm，气流速度 2 m/s，喷孔直径 6 mm，气流作用角度 20°。

表 5 花粉有效分布面积比率的极差

Table 5 Extreme deviation with the distribution area range ratio

	A	B	C	D	E
K_1	216.67	208.33	191.67	195.83	104.17
K_2	91.67	129.17	170.83	179.17	204.17
K_3	187.50	200.00	179.17	120.83	166.67
K_4	170.83	129.17	125.00	170.83	191.67
k_1	54.17	52.08	47.92	48.96	26.04
k_2	22.92	32.29	42.71	44.79	51.04
k_3	46.88	50.00	44.79	30.21	41.67
k_4	42.71	32.29	31.25	42.71	47.92
极差	31.25	19.79	16.67	18.75	25.00
优方案	$A_1E_2B_1D_1C_1$				

花粉平均分布密度 y_2 极差分析如表 6 所示。从表 6 可知，对花粉平均分布密度 y_2 的影响大小依次是气流速度、喷气管道放置相对位置、气流作用角度、喷孔中心距、喷孔直径。最优组合为 $B_1A_1C_3E_2D_4$ ，即气流速度 2 m/s，喷气管道放置高于碰杆 10 cm，气流作用角度 0°，喷孔直径 12 mm，喷孔中心距 50 mm。

表 6 花粉平均分布密度的极差

Table 6 Extreme deviation with the mean pollen density

	A	B	C	D	E
K_1	12.38	15.55	11.64	10.43	8.75
K_2	6.71	7.27	6.88	8.39	12.31
K_3	8.45	10.03	11.84	8.61	8.05
K_4	11.13	5.82	8.31	11.24	9.56
k_1	3.10	3.89	2.91	2.61	2.19
k_2	1.68	1.82	1.72	2.10	3.08
k_3	2.11	2.51	2.96	2.15	2.01
k_4	2.78	1.46	2.08	2.81	2.39
极差	1.42	2.43	1.24	0.71	1.07
优方案	$B_1A_1C_3E_2D_4$				

花粉分布不均匀度 y_3 的极差分析如表 7 所示。

表 7 花粉分布不均匀度的极差分析

Table 7 Extreme deviation with pollen non-uniform distribution

	A	B	C	D	E
K_1	43.03	93.24	48.04	62.60	38.66
K_2	15.37	22.29	30.70	20.74	63.97
K_3	54.50	24.83	67.79	31.64	40.16
K_4	58.51	31.05	24.88	56.43	28.62
k_1	10.76	23.31	12.01	15.65	9.67
k_2	3.84	5.57	7.68	5.19	15.99
k_3	13.63	6.21	16.95	7.91	10.04
k_4	14.63	7.76	6.22	14.11	7.16
极差	10.79	17.74	10.73	10.47	8.84
优方案	$B_1A_2C_3D_1E_2$				

从表 7 可知,对花粉分布不均匀度 y_3 的影响大小依次是气流速度、喷气管道放置相对位置、气流作用角度、喷孔直径、喷孔中心距。最优组合为 $B_1A_4C_3D_1E_2$, 即气流速度 2 m/s, 喷气管道放置低于碰杆 10 cm, 气流作用角度 0° , 喷孔直径 6 mm, 喷孔中心距 50 mm。

2.4 正交试验结果的方差分析

花粉有效分布面积比率 y_1 的正交试验结果方差分析如表 8 所示。喷气管道放置相对位置、喷孔中心距、气流速度对花粉有效分布面积比的影响显著, 喷孔直径、气流作用角度的影响不显著。

表 8 花粉有效分布面积比率的方差分析

因素	均方	F 值	P 值	显著性
A	714.648	1.988	0.170	**
B	471.641	1.122	0.379	*
C	211.204	0.435	0.732	
D	260.333	0.550	0.657	
E	474.729	1.194	0.354	*

花粉平均分布密度 y_2 正交试验结果的方差分析结果如表 9 所示。气流速度对花粉平均分布密度影响极显著, 喷气管道放置相对位置对花粉平均分布密度影响显著, 因素气流作用角度、喷孔中心距、喷孔直径的影响不显著。

表 9 花粉平均分布密度的方差分析

因素	均方	F 值	P 值	显著性
A	1.644	0.879	0.479	*
B	4.607	4.080	0.033	**
C	1.519	0.799	0.518	
D	0.484	0.224	0.878	
E	0.871	0.422	0.741	

花粉分布不均匀度 y_3 正交试验结果的方差分析结果如表 10 所示。气流速度对花粉分布不均匀度的影响极显著, 喷孔直径、喷气管道放置相对位置、气流作用角度、喷孔中心距的影响不显著。

表 10 花粉平均不均匀度的方差分析

因素	均方	F 值	P 值	显著性
A	94.678	0.709	0.565	
B	285.486	3.328	0.056	**
C	93.290	0.697	0.572	
D	99.083	0.748	0.544	
E	56.112	0.392	0.761	

2.5 正交试验结果的多指标评价模型分析

正交试验结果的单指标极差、方差分析, 仅考虑了多个因素对单一评价指标的影响程度, 为了分析多因素对多指标的综合影响评价, 需要对花粉有效作用面积比率 y_1 、花粉平均分布密度 y_2 、花粉分布不均匀度 y_3 建立多指标的评价模型, 采用数理分析方法进行综合分析和参数优化, 以确定多因素各水平对多个指标的影响权重和最优方案。

通过借助简便的矩阵分析法建立评判模型并进行矩阵分析计算^[14-15], 得到最优方案和各因素影响指标的次序。建立三层结构模型: 第 1 层为试验考察指标层; 第 2 层为因素层; 第 3 层为水平层。以花粉有效分布面积比率 y_1 越大越好, 花粉平均分布密度 y_2 越大越好, 花粉分布不均匀度 y_3 越小越好为评价原则, 进行综合分析计算和参数优化。

根据正交试验的极差分析结果, 用 Matlab 软件进行矩阵运算, 求得各因素 4 水平的权值如表 11 所示。

表 11 试验因素的权值

因素水平	权值				
	A	B	C	D	E
1	0.084	0.085	0.053	0.045	0.044
2	0.065	0.076	0.050	0.058	0.062
3	0.068	0.091	0.049	0.041	0.054
4	0.068	0.062	0.051	0.043	0.065
合计	0.285	0.314	0.203	0.187	0.225

通过矩阵方法的分析计算, 喷气管道放置相对位置中 A_1 的权重最大, 气流速度中 B_3 的权重最大, 气流作用角度中 C_1 的权重最大, 喷孔直径中 D_2 的权重最大, 喷孔中心距中 E_4 的权重最大; 5 个因素对试验指标值影响的次序顺序为气流速度、喷气管道放置相对位置、喷孔中心距、气流作用角度、喷孔直径。正交试验的最优方案为 $A_1B_3C_1D_2E_4$, 即在喷气管道放置相对位置高于碰杆 10 cm, 气流速度 6 m/s, 气流作用角度倾斜向上 20° , 喷孔直径 8 mm, 喷孔中心距 25 mm 时综合试验效果最好。

2.6 组合式授粉与单一授粉方式的对比分析

对比单一授粉方式时花粉分布效果的研究结果^[9-10], 其最大的有效分布面积比率 y_1 分别为 58%、61.25%, 最小的花粉分布不均匀度 y_3 分别为 7.4、

10.26。由表 3 数据可得,组合式授粉正交试验的最大花粉有效作用面积比率 $y_1 = 70.8\% > 61.25\%$ (碰撞授粉) $> 58\%$ (气力授粉),16 种处理组合中有 4 个处理组合的 y_1 大于 58%,占组合数的 25%。组合式授粉正交试验的最小花粉不均匀度 $y_3 = 0.14 < 7.4$ (气力授粉) < 10.26 (碰撞授粉),16 种处理组合中有 8 个处理组合的 y_3 小于 7.4,占组合数的 50%,因此,组合授粉相比单一的气力授粉和碰撞授粉,花粉分布有效分布面积率 y_1 明显提高,花粉分布不均匀度 y_3 显著下降。

3 结论与讨论

花粉水平分布数据的方差分析表明:喷气管道放置相对位置、喷孔中心距、气流速度对花粉有效分布面积比率的影响显著;气流速度、喷气管道放置相对位置对花粉平均分布密度的影响极显著;气流速度对花粉分布不均匀度的影响极显著。

通过三层多指标评判模型矩阵分析表明:5 个因素对指标值影响的主次顺序为气流速度、喷气管道设置位置、喷孔中心距、气流作用角度、喷孔直径。正交试验的最优方案为 $A_1B_3C_1D_2E_4$,即气流速度 6 m/s,喷气管道放置相对位置高于碰杆 10 cm,喷孔中心距 25 mm,气流作用角度倾斜向上 20° ,喷孔直径 8 mm。

组合授粉相比单一的气力授粉或碰撞授粉,花粉分布有效分布面积率明显提高,花粉分布不均匀度显著下降。

参考文献:

- [1] 胡建平. 浅析杂交水稻制种的产量构成与高产制种技术[J]. 种子, 2010, 29(12): 119-121.
- [2] 张绍安, 余保生, 谢保忠. 杂交水稻制种高产的影响

因素与对策[J]. 现代农业科技, 2010 (24): 86-89.

- [3] 吴辉, 熊朝, 刘爱民, 等. 杂交水稻机械化制种辅助授粉技术研究现状与设想[J]. 作物研究, 2014, 28(3): 321-323.
- [4] 汪沛, 胡炼, 周志艳, 等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 54-61.
- [5] 李继宇, 周志艳, 胡炼, 等. 单旋翼电动无人直升机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 10-17.
- [6] 李继宇, 周志艳, 胡炼, 等. 圆形多轴多旋翼电动无人直升机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 1-11.
- [7] 丁素明, 薛新宇, 蔡晨, 等. 手持式风送授粉机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 20-27.
- [8] 王慧敏, 汤楚宙, 李中秋, 等. 杂交水稻制种气力授粉的参数试验及优化 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(S2): 101-106.
- [9] 王慧敏. 杂交水稻制种气力式授粉机理的试验研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [10] 黄震. 杂交水稻制种碰撞式授粉机理研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [11] 易著虎, 吴升高, 肖层林, 等. 杂交水稻父本制种特性研究进展[J]. 湖南农业科学, 2009(7): 17-19, 21.
- [12] 张彬, 芮雯奕, 郑建初, 等. 水稻开花期花粉活力和结实率对高温的响应特征[J]. 作物学报, 2007, 33(7): 1177-1181.
- [13] Hyoji Namai, Hiroshi Kato. The number of pollen grains deposited upon a pistil assuring seed setting of male sterile seed parent in rice[J]. Japanese Journal of Breeding, 1987, 37(1): 98-102.
- [14] 魏效玲, 薛冰军, 赵强. 基于正交试验设计的多指标优化方案研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(3): 75-99.
- [15] 周玉珠. 正交试验设计的矩阵分析方法[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(2): 202-207.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立