

无人机飞行高度、速度和喷药量对篱架式葡萄园喷药效果的影响分析

陈海游

福建省厦门市同安区五显镇人民政府, 福建 厦门 361100

2021-12-10 收稿, 2022-07-21 网络版发表

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



陈海游(1989—), 男, 工程师, 硕士, 664506179@163.com

摘要 利用无人机对篱架式葡萄园进行喷药, 以雾滴沉积密度为指标, 通过正交试验法设计, 研究无人机飞行高度、速度和喷药量等对喷药效果的影响。经三因素交互作用分析, 得出: 无人机飞行速度、飞行高度、喷药量等对喷药效果存在因素交互作用, 飞行高度 2.5 m, 飞行速度 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 喷药量等级为 $200\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 喷药效果较佳。

关键词 无人机; 喷药效果; 飞行高度; 飞行速度; 喷药量

在各类农林作物的生产过程中, 病虫害防治是极其关键的一个环节, 直接关系到最后的产量和农民的收入。无人机是当下高精尖技术的集成平台, 通过智能化系统和高灵敏度传感器, 可以实现预定飞行、定速巡航、高清拍摄等多种功能, 是作为农药喷洒自动化载体平台的最佳选择^[1]。

无人机喷药作业具有节省劳力、效率高、效果好等特点, 相比人工作业具有特别明显的优势。高圆圆^[2]等研究发现, 小型无人机 Af-811 在超低容量喷雾时, 对小麦吸浆虫的防治效果达 86.1%。舒勤静^[3]等利用无人机喷药技术在烟叶生产中的应用中, 一台无人机一小时可喷洒烟叶面积 $2.66\sim 5.33\text{ hm}^2$, 一天可以喷洒烟叶面积 $20\sim 40\text{ hm}^2$, 人工一小时可喷洒烟叶面积 $0.06\sim 0.13\text{ hm}^2$, 一天可以喷洒烟叶面积 $0.53\sim 0.66\text{ hm}^2$, 无人机喷药是人工喷药效率的几十倍; 无人机喷药, 烟农可降低人工成本 $225\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$, 可节约农药成本 30% 以上。无人机喷药技术在农业的推广能很大程度节约水资源, 减少对环境的污染, 提高工作效率, 降低劳动成本, 是农业未来的

发展方向。如何利用好无人机, 在喷药技术上如何最大限度的发挥无人机喷药效果, 涉及飞行高度、飞行速度及喷药量等问题。李嘉泓^[4]等利用极飞 2017P20 型植保无人机开展防治葡萄霜霉病飞控参数及防效研究, 设置速度 3 个参数 ($3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、喷药量 4 个参数、喷幅 1 个参数、飞行高度 1 个参数, 结果表明, 在极飞 2017P20 型无人机参数为 $v=5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、喷量为 710 mL 时防治效果最佳。但对飞行高度缺乏相关性比较研究, 飞行速度设置间距较大。许真珠^[5]等利用无人机技术对水稻精准喷药系统研究, 无人机距离水稻植株顶端高度为 2.5 m , 设置 3 个飞行速度 ($2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 发现飞行速度为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的雾滴沉积量与处方图剂量的线性关系较好。但只研究了单因素, 未开展多因素相关性研究。利用无人机在葡萄园中进行喷药, 细化飞行速度、飞行高度及喷药量等参数, 多因素综合研究无人机飞行高度、飞行速度及喷药量对农作物喷药效果的影响, 其结果将为不同植物的无人机喷药研究提供更准确的依据和参考。

引用格式: 陈海游. 无人机飞行高度、速度和喷药量对篱架式葡萄园喷药效果的影响分析[J]. 四川林业科技, 2022, 43(5): 74-82.

CHEN H Y. Analysis on the spraying effect of UAV flight height, flight speed and spraying dose on trellis-type vineyard[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2022, 43(5

1 材料与方法

1.1 动植物材料

植物材料：阳光玫瑰葡萄（*Shine-Mus cat* L.）
试验地：福建省同安区五显镇葡萄园基地

1.2 试验准备

仪器设备：六轴 16 kg 载重的植保无人机一架，安装一条 1 m 长可拆卸铝合金喷杆，将喷药控制装置安装于云台上，控制喷药量；

基地植株情况：试验用葡萄作物期为果实膨大期，平均株高约 1.8 m，行距 2.8 m，株距 1 m（葡萄园株高、株行距等指标不影响试验参数设置）；

基地环境指标：温度为 25℃~30℃，相对湿度 46%~50%，风速 0.3~0.8 m·s⁻¹。

药剂与雾滴收集卡：采用清水代替药剂进行喷药试验，采用水敏纸进行雾滴采集，水敏纸为 5 cm×2 cm；

试验因素：本试验设置 3 个因素，分别是飞行高度、飞行速度与喷药量。

彩色布条一卷，竹竿若干，回形针若干，米尺，温湿度计 1 个，便携式风速仪 1 台等^[6,7]。

1.3 试验设计

1.3.1 正交试验方案设计

无人机喷药后，要在植株上形成雾滴才能被植株吸收，达到喷药效果。而要使雾滴能滴落在植株上，不仅要考虑无人机的飞行速度，还要考虑飞行高度与喷药量的等级等因素。

试验设置飞行高度、飞行速度及喷药量 3 因素，各设置 3 水平（见表 1）。为减少试验次数，避免数据统计时的重复性与盲目性，根据正交表 L₉（3⁴）设计正交试验。由于植株较高，喷药不仅要顶层叶片有效，还得对下层有效，才能达到喷药防治的目的，因而要设置并收集植株上下层试验数据，上层选取 180 cm 处，下层选取 80 cm 处。^[8-10]

正交试验因素水平表如下：

1.3.2 样地设置及随机区组设置

在葡萄园中部区划出一个 28 m×23.6 m 的矩形地带，内部四周各 2.8 m 的缓冲区，中间按株距 1 m 行距 2.8 m 布设试验区。试验区按短边均分成 I 区、II 区、III 区等 3 个区组，即 3 组重复，每个区组设 9 个小区即 9 个正交试验处理（见图 1）。将该地带

表 1 正交试验因素水平表（上层 180 cm / 下层 80 cm 处）

Tab. 1 Orthogonal test factor design（180 cm in the upper layer / 80 cm in the lower layer）

序号 Number	飞行高度/m Flight height /m	飞行速度 /（m·s ⁻¹ ） Flight speed /m·s ⁻¹	喷药量等级 /（ml·min ⁻¹ ） Spraying dose / ml·min ⁻¹
A ₁	2	1	160
A ₂	2	1.5	180
A ₃	2	2	200
A ₄	2.5	1	180
A ₅	2.5	1.5	200

表 2 随机数表
Tab. 2 Table of random numbers

行列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	03	47	43	73	86	36	96	47	36	61	46	99	69	81	62
...															
4	12	56	85	99	26	96	96	68	27	31	05	03	72	93	15
5	55	59	56	35	64	38	54	82	46	22	31	62	43	09	90
6	16	22	77	94	39	49	54	43	54	82	17	37	93	23	78
7	84	42	17	53	31	57	24	55	06	88	77	04	74	47	67
...															
15	37	85	94	35	12	83	39	50	08	30	42	34	07	96	88
16	70	29	17	12	13	40	33	20	38	26	13	89	51	03	74
17	56	62	18	37	35	96	83	50	87	75	97	12	25	93	47
...															
...															

表 3 随机区组中小区的随机排列设计表
Tab. 3 Randomly arranged table in randomized block design

小区Block		1	2	3	4	5	6	7	8	9
区组 I Block I	处理Treatment	A ₂	A ₆	A ₁	A ₃	A ₈	A ₉	A ₅	A ₇	A ₄
区组 II Block II	处理Treatment	A ₃	A ₈	A ₅	A ₄	A ₂	A ₆	A ₁	A ₉	A ₇
区组 III Block III	处理Treatment	A ₉	A ₄	A ₃	A ₅	A ₈	A ₂	A ₁	A ₇	A ₆

注：区组随机数字：261 389 5

某一因素是影响喷药效果的主要因素，则研究在该因素不同水平下，另两个因素对雾滴沉积密度的影响。

1.4.6 统计检验分析

在提供自变量之间交互作用直观分析的基础上，为进一步确定这些样本结果是否可以代表总体，即图形结果是否会受到抽样误差的影响。因此，进行了统计检验分析。

1.4.7 数据处理

采用软件 Excel 2003 和 SPSS 22.0 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 试验结果及极差分析

根据上、下两层对应各小区雾滴沉积密度试验结果（见表 4 和表 5），比较同一处理的上层雾滴沉积密度与下层雾滴沉积密度，可以发现，上层雾滴沉积密度明显大于下层，说明喷药后，植株上层部位将得到更好的药效作用。

根据表 4 极差分析可以看出，利用无人机喷药时，影响植株上层雾滴沉积密度的主要因素是飞行速度，按主次顺序排：飞行速度>喷药量>飞行高度。

根据表 5 极差分析可以看出，利用无人机喷药时，影响植株下层雾滴沉积密度的主要因素也是

飞行速度，按主次顺序排：飞行速度>飞行高度>喷药量。

根据极差分析，说明飞行速度是影响喷药效果的主要因素，飞行高度对下层喷药效果影响较上层更明显，而喷药量对上层喷药效果比下层更好。因而，以飞行速度为另一因素，研究在不同飞行速度下，飞行高度与喷药量对雾滴沉积密度的影响。

2.2 异常值检验分析及正态性分析

根据上、下层各 9 张箱式图（见图 2），可以看出，A₁ 至 A₉ 9 个处理均无距离箱子边缘超过 1.5 倍箱身长度的离群值存在，即数据中无异常值。

采用 Shapiro-Wilk 检验数据正态性，结果见表 6。可见，Shapiro-Wilk 检验的上层 180 cm 与下层 80 cm 处 P 值均大于 0.05，数据服从正态分布。

2.3 三因素交互作用分析

2.3.1 直观结果分析

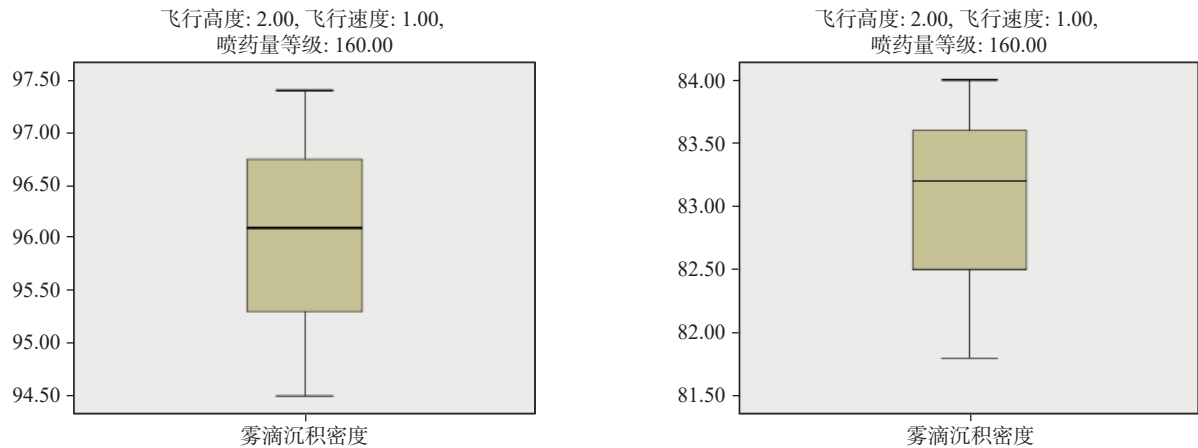
如图 3、图 4 所示，在飞行速度为 1 m·s⁻¹ 或 1.5 m·s⁻¹，喷药量等级为 160 mL·min⁻¹、180 mL·min⁻¹、200 mL·min⁻¹ 时，雾滴沉积密度随飞行高度的变化曲线不平行，也就是喷药量与飞行高度交互作用存在；在飞行速度为 1 m·s⁻¹ 或 1.5 m·s⁻¹，飞行高度为 2 m、2.5 m、3 m 时，雾滴沉积密度随喷药量的变化曲线也不平行，也就是飞行高度与喷药量交互作用

表 4 上层的试验结果及极差分析表
Tab. 4 Testing results and range analysis table of the upper layer (80cm)

序号 Number	飞行高度/m Flight height/m	飞行速度 /(m·s ⁻¹) Flight speed /m·s ⁻¹	喷药量等级 /(ml·min ⁻¹) Spraying dose /ml·min ⁻¹	I 区雾滴沉积密度 /(个·cm ⁻²) Droplet deposition density in Block I /个·cm ⁻²	II 区雾滴沉积密度 /(个·cm ⁻²) Droplet deposition density in Block II /个·cm ⁻²	III 区雾滴沉积密度 /(个·cm ⁻²) Droplet deposition density in Block III /个·cm ⁻²	雾滴沉积密度平均值 /(个·cm ⁻²) Average droplet deposition density /个·cm ⁻²
--------------	---------------------------	---	---	--	--	--	---

表 5 下层的试验结果及极差分析表
Tab. 5 Testing results and range analysis table of the lower layer (180cm)

序号 Number	飞行高度/m Flight height /m	飞行速度 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) Flight speed / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	喷药量等级 /($\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$) Spraying dose / $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$	I 区雾滴沉积密度 /($\text{个}\cdot\text{cm}^{-2}$) Droplet deposition density in Block I / $\text{个}\cdot\text{cm}^{-2}$	II 区雾滴沉积密度 /($\text{个}\cdot\text{cm}^{-2}$) Droplet deposition density in Block II / $\text{个}\cdot\text{cm}^{-2}$	III 区雾滴沉积密度 /($\text{个}\cdot\text{cm}^{-2}$) Droplet deposition density in Block III / $\text{个}\cdot\text{cm}^{-2}$	雾滴沉积密度平均值 /($\text{个}\cdot\text{cm}^{-2}$) Average droplet deposition density / $\text{个}\cdot\text{cm}^{-2}$
A ₁	2	1	160	84	81.8	83.2	83
A ₂	2	1.5	180	66.3	63.8	55.9	62
A ₃	2	2	200	64.7	62.1	47.2	58
A ₄	2.5	1	180	112	106.7	105.3	108
A ₅	2.5	1.5	200	109.8	105	76.2	97
A ₆	2.5	2	160	84	80.3	69.7	78
A ₇	3	1	200	100.6	98.8	82.6	94
A ₈	3	1.5	180	51.8	55.3	57.9	55
A ₉	3	2	160	42.4	36	38.6	39
K ₁	203	285	200				
K ₂	283	214	225				
K ₃	188	175	249				
R	95	110	49				



注：上层 A₁ 处理的数据箱式图（共 9 图，选其 1，见左图），下层 A₁ 处理的数据箱式图（共 9 图，选其 1，见右图）

Note: the data box diagram of A₁ treatment in the upper layer (9 figures in total. Choose one as the example. See the left figure) and the data box diagram of A₁ treatment in the lower layer (9 figures in total. Choose one as the example. See the right figure).

图 2 A₁ 处理的数据箱式图
Fig. 2 Data box diagram of A₁ treatment

存在；所以在飞行速度为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或 1

表 6 上层/下层数据的正态检验 (上层 180 cm / 下层 80 cm 处)
Tab. 6 Normality test of the upper/lower data (180 cm or 80 cm)

飞行高度 (m) Flight height (m)	飞行速度 (m·s ⁻¹) Flight speed (m·s ⁻¹)	喷药量等级 (mL·min ⁻¹) Spraying dose (mL·min ⁻¹)		Shapiro-Wilk (180 cm)			Shapiro-Wilk (80 cm)		
				统计量 Statistics	自由度 Freedom	P	统计量 Statistics	自由度 Freedom	P
2.00	1.00	160.00	雾滴沉积密度Droplet deposition density	0.996	3	0.886	0.976	3	0.702
	1.50	180.00	雾滴沉积密度Droplet deposition density	0.978	3	0.719	0.918	3	0.444
	2.00	200.00	雾滴沉积密度Droplet deposition density	0.893	3	0.363	0.859	3	0.264
2.50	1.00	180.00	雾滴沉积密度Droplet deposition density	0.918	3	0.446	0.899	3	0.381
	1.50	200.00	雾滴沉积密度Droplet deposition density	0.987	3	0.780	0.855	3	0.253
	2.00	160.00	雾滴沉积密度Droplet deposition density	0.896	3	0.372	0.928	3	0.481
3.00	1.00	200.00	雾滴沉积密度Droplet deposition density	0.860	3	0.269	0.824	3	0.174
	1.50	180.00	雾滴沉积密度Droplet deposition density	0.787	3	0.085	0.993	3	0.838
	2.00	160.00	雾滴沉积密度Droplet deposition density	0.998	3	0.919	0.988	3	0.794

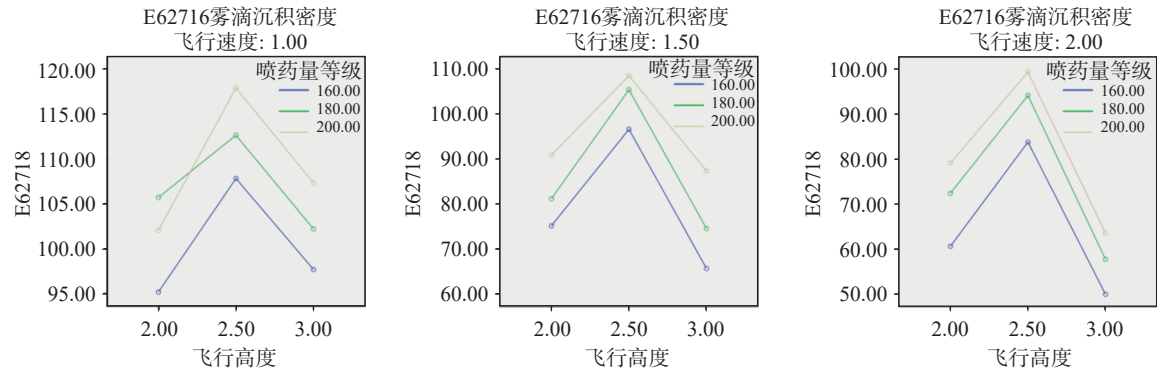
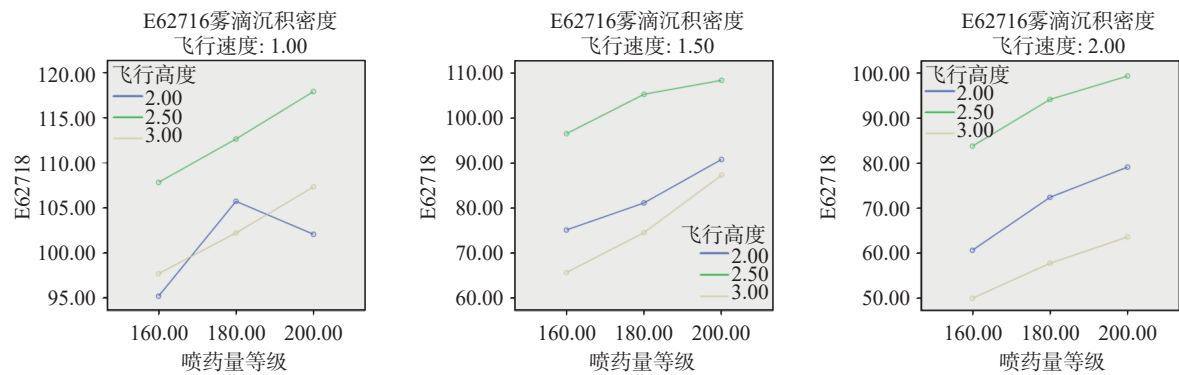


图 3 飞行高度×喷药量等级×飞行速度二维线画图 (依次飞行速度=1 m·s⁻¹, 1.5 m·s⁻¹, 2 m·s⁻¹)
Fig. 3 Two-dimension line drawing of Flight height × Spraying dose × Flight speed (speed=1 m·s⁻¹, 1.5 m·s⁻¹, 2 m·s⁻¹)



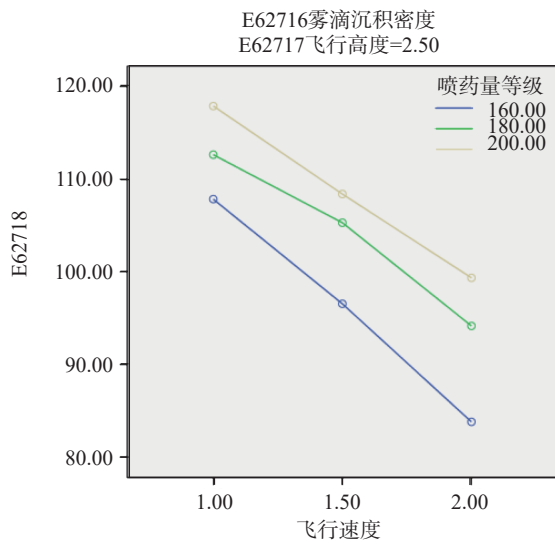


图 5 飞行速度×喷药量等级×飞行高度二维线画图
(飞行高度=2.5 m)

Fig. 5 Two-dimension line graph of Flight speed×Spraying dose ×
Flight height (high=2.5 m)

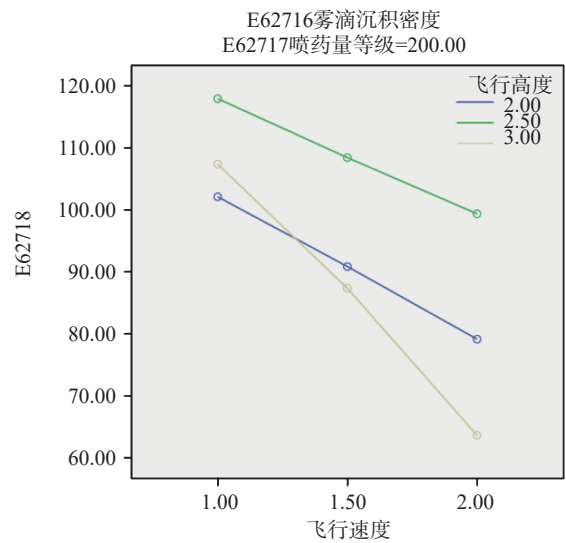


图 6 飞行速度×飞行高度×喷药量等级二维线画图
(喷药量=200 ml·min⁻¹)

Fig. 6 Two-dimension line graph of Flight speed×Flight height×
Spraying dose (dose=200 ml·min⁻¹)

行统计检验 (见 表 7)。由 表 7 可知, 在 speed × high ×dose 行 (即飞行速度×飞行高度×喷药量等级), 由于显著性水平小于 0.05, 所以三因素的交互作用具有统计学意义, $F(8, 27) = 3.259$, $P = 0.010$ 。

2.3.3 简单两因素交互作用分析

由于三因素交互作用有意义, 即其中两个自变量的交互作用在第三个因变量的不同水平对因变量的影响不同。所以可逐一进行简单两因素交互作用

分析。仅以飞行速度的不同水平, 分析高度与喷药量是否对雾滴沉积密度有影响。通过 SPSS 分析, 结果见 表 8。

如 表 8 所示, 由于飞行速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $0.01 \leq P < 0.05$ (采用 Bonferroni 法校正), 说明在飞行速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 飞行高度与喷药量有简单两因素交互作用, $F(4, 27) = 3.260$, $P = 0.026$; 飞行速度为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 飞行高度与喷药量也有简单两

表 7 三因素间统计检验

Tab. 7 Statistical test among three factors

来源 Source	第 III 类平方和 Type III sum of squares	自由度 Freedom
--------------	---------------------------------------	----------------

因素交互作用, $F(4, 27) = 4.119$, $P = 0.010$; 而在速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $P > 0.05$, 高度与剂量无简单两因素交互作用, $F(4, 27) = 0.860$, $P = 0.501$ 。进一步验证直观分析结论的可靠性。

3 结论

(1) 利用无人机喷药时, 植株上层部位将得到更好的药效作用。影响植株上层雾滴沉积密度的主要因素是飞行速度, 按主次顺序排: 飞行速度>喷药量>飞行高度; 影响植株下层雾滴沉积密度的主要因素也是飞行速度, 按主次顺序排: 飞行速度>飞行高度>喷药量。说明飞行速度是影响喷药效果的主要因素, 飞行高度对下层喷药效果影响较上层更明显, 而喷药量对上层喷药效果比下层更好。

(2) 通过箱式图判断, A_1 至 A_9 9 个处理均无离群值存在, 即数据中无异常值。经 Shapiro-Wilk 检验, 9 个处理的 P 值均大于 0.05, 数据均服从正态分布。经直观结果分析, 在飞行速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 喷药量与飞行高度交互作用存在, 且飞行高度与喷药量较佳组合是飞行高度 2.5 m, 喷药量

$200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在飞行速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 喷药量与飞行高度无统计学意义。说明在飞行速度达到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 飞行速度才是主要因素。在飞行高度为 2.5 m 时, 飞行速度与喷药量较佳组合是飞行速度 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 喷药量 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 在喷药量等级为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 飞行速度与飞行高度较佳组合是飞行速度 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 飞行高度 2.5 m。

(3) 经三因素交互作用分析, 飞行速度、飞行高度、喷药量等级 3 因素对雾滴沉积密度的影响上存在三因素交互作用, $F(8, 27) = 3.259$, $P = 0.010$ 。简单两因素交互作用分析, 在飞行速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 飞行高度与喷药量的简单两因素交互作用存在。而在速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $P > 0.05$, 高度与剂量无简单两因素交互作用。

综合以上结论, 可得: 无人机飞行速度、飞行高度、喷药量等级 3 因素对喷药效果存在三因素交互作用, 同时, 要实现无人机喷药效果较佳, 较佳组合为: 飞行高度 2.5 m, 飞行速度 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 喷药量等级为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

参考文献

- [1] 林羽, 刘斌琼. 论无人机在农业喷药领域的应用[J]. 农业开发与装备, 2018(9): 56+59.
- [2] 高圆圆, 张玉涛, 张宁, 等. 小型无人机低空喷洒在小麦田的雾滴沉积分布及对小麦吸浆虫的防治效果初探[J]. 作物杂志, 2013(2): 139-142.
- [3] 舒勤静, 陈乾锦, 池国胜, 等. 植保无人机喷药技术在光泽县烟叶生产中的应用[J]. 农业科学, 2020(6): 391-394.
- [4] 李嘉泓, 顾沛雯, 张龙. 极飞 2017P20 型植保无人机防治葡萄霜霉病飞控参数及防效研究[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(7): 82-83+100.
- [5] 许真珠, 黄莺. 基于无人机技术的水稻精准喷药系统研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 238-241+247.
- [6] 景春华. 夏黑葡萄无公害栽培技术[J]. 果农之友, 2018(12): 11-12.
- [7] 王金星, 王震, 张茜, 等. 低量低空小型植保无人机变量喷药参数优化试验[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 215-219.
- [8]

Summary for “无人机飞行高度、速度和喷药量对篱架式葡萄园喷药效果的影响分析”

Analysis on the Spraying Effect of UAV Flight Height, Flight Speed and Spraying Dose on Trellis-type Vineyard

CHEN Haiyou

People's Government of Wuxian Town, Tong'an District, Xiamen 361100, China

Abstract In this paper, the unmanned aerial vehicle (UAV) was used to spray pesticide on trellis-type vineyard. Taking the droplet deposition density as an index, the effects of UAV flight height, flight speed and spraying dose on the spraying effect were studied by orthogonal test design. Through the analysis of three interactive factors, it was concluded that flight speed, flight height and spraying amount had interactive effects on the spraying effect. At the same time, when the flying height was 2.5m, the flying speed was 1m/s, the spraying dose was 200ml/min, the spraying effect was better.

Key words Unmanned aerial vehicle (UAV); Spraying effect; Flight height; Flight speed; Spraying dose

doi: [10.12172/202112100001](https://doi.org/10.12172/202112100001)