

张建桃, 吴逢秋, 黄路生, 等. 植保无人机喷施筋菜叶面肥参数的优化[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(2): 284-292.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.02.029

植保无人机喷施筋菜叶面肥参数的优化

张建桃^{1,2,3}, 吴逢秋^{1,2}, 黄路生^{1,2}, 刘广彬^{1,2}, 文晟², 兰玉彬²

1. 华南农业大学数学与信息学院, 广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642; 3. 农业农村部华南热带智慧农业技术重点实验室, 广州 510642

摘要 为探究植保无人机喷施筋菜(*Acanthopanax trifoliatum*)叶面肥的可行性以及最佳作业参数组合, 使用极飞P20-2019款四旋翼植保无人机开展筋菜叶面肥喷雾试验, 设计3因素3水平正交试验, 考察喷施含量、飞行速度、作业高度对喷雾质量、筋菜产量及叶片品质的影响。结果显示, 飞行速度和作业高度对喷雾质量影响显著, 雾滴沉积密度与沉积量呈现极强正相关; 此外, 喷施含量、飞行速度、作业高度对筋菜产量、筋菜叶片品质的影响显著。喷施含量为推荐含量的5倍、飞行速度为1.0 m/s、作业高度为2.0 m时, 雾滴沉积密度为188.212个/cm², 雾滴沉积量为0.269 μg/cm²。此时, 植保无人机喷施筋菜叶面肥施肥效果最好, 相较空白对照组筋菜产量提高27.46%、筋菜叶绿素含量提高33.23%。研究表明, 使用植保无人机喷施高含量筋菜叶面肥可行。

关键词 筋菜; 植保无人机; 叶面肥; 叶绿素; 作业参数

中图分类号 S252.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)02-0284-09

筋菜(*Acanthopanax trifoliatum*), 学名白筋(*Eleutherococcus trifoliatum*(L.) S.Y.Hu), 药食两用, 具有止血^[1]、缓解高血糖^[2]等功能, 常被制成杀菌喷雾剂^[3], 其叶片的水提取物具有抗痴呆作用^[4]。随着筋菜的药用功能逐渐被挖掘, 筋菜逐渐走入了大众视野。广东省筋菜主要种植在江门市恩平市及其周边山区。2022年, 恩平市筋菜种植面积超过了530 hm², 年产量超过了6 000 t。恩平筋菜多被制成筋菜茶^[5], 在种植中农户一般期望提高筋菜产量, 以及增加筋菜叶片中的叶绿素含量, 从而提高筋菜品质。

叶面肥种类丰富, 具有肥效快、养分利用率高、环境污染小等优点^[6], 在农业种植中使用广泛。李皓轩等^[7]研究表明, 施用由长江大学研发的碳氧1号叶面肥提高了水稻生育后期剑叶的光合功能和抗氧化能力。徐茜等^[8]研究表明, 叶菜型甘薯喷施叶面肥作补充追肥能提高甘薯产量与叶绿素相对含量。目前, 江门市筋菜种植户多使用手动背负喷雾器进行叶面肥喷施, 工作效率低下, 每人每日喷雾作业面积仅为1.3~2.0 hm²^[9]。随着江门市筋菜种植面积逐渐增加, 当地劳动力老龄化、传统叶面肥喷雾方式效率

低的问题日益突出, 现有的叶面肥喷施方式已经不能满足筋菜生产的需求。

随着航空施药技术的发展, 植保无人机施药成为小麦、玉米、水稻、果树等作物及农林病虫害防治的首选方式^[10]。相较于传统喷雾方式, 无人机喷洒效率是传统人工作业的数十倍且能够节约大约90%的用水量^[11], 同时还具有人工成本低、操作简便^[12]、喷施均匀度更高^[13]的优点。目前, 使用植保无人机喷洒农药的相关技术与研究已经趋于成熟, 而叶面施肥相关研究仍停留在使用传统机械的阶段, 有关植保无人机喷施叶面肥后肥效的研究相对较少。搭载有施肥系统的植保无人机, 在低空中向作物茎叶表面直接喷洒肥料, 可以将施肥效率提升至人工施肥的12.5倍^[14]。植保无人机叶面施肥技术具有广阔的发展前景。

植保无人机航空施药的作业效果受雾滴沉积分布规律直接影响, 而雾滴沉积规律受飞行参数、作物冠层结构、外界环境温度及风速等因素相互耦合的影响, 且飞行高度、飞行速度对雾滴平均沉积量的影响显著^[15]。航空施药多采用超低量高浓度的作业方

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32271985); 广东省自然科学基金项目(2022A1515011008); 高等学校学科创新引智计划项目(D18019); 恩平市农村科技特派员项目; 广州市科技计划项目重点研发计划项目(2023B03J1362), 华南农业大学新农村发展研究院农业科技合作共建项目(2021XNYYKJHZGJ034); 广东省普通高校特色创新类项目(2019KZDZX1002)

张建桃, E-mail: zhangjiantao@yeah.net

式,航空喷雾的药液浓度是传统喷雾作业的 25~50 倍^[16],使用植保无人机喷施叶面肥时不能直接参考航空施药的药液浓度经验,喷施浓度过高,叶面肥会灼烧作物叶片^[17],进而影响作物产量;喷施浓度过低,则难以满足生产需求。

植保无人机的飞行参数与喷施浓度既影响航空施药效果,也影响叶面肥的施用效果^[16-18]。采用植保无人机对蔬菜田喷施叶面肥时,应综合考虑飞行参数及施肥浓度对施肥效果的影响。目前关于植保无人机飞行参数、农药或叶面肥喷施浓度对蔬菜上的雾滴沉积分布的影响鲜见报道。本研究使用极飞 P20-2019 款四旋翼植保无人机开展蔬菜叶面肥喷施的可行性试验,探索最佳作业参数组合,以期为同类型植保无人机作物叶面施肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1)试验场地。供试蔬菜品种为“白梗蔬菜”,种植方式为以垄种植,垄基底宽×垄高×垄长×垄距为 0.9 m×1.0 m×30.0 m×0.5 m。试验地设在广东省江门市恩平市雪莊茶厂(112°16′49″E,22°9′38″N)。如图 1 所示,试验地的地势平坦,蔬菜长势均匀,株高 35~45 cm,土壤栽培及施肥管理水平一致。于 2023 年 6 月 27 日展开第 1 次大田试验,随后每间隔 10 d (叶面肥厂家推荐施肥间期)进行下次试验,共进行 3 次试验。3 次施肥时温度分别为(24±1)、(30±1)、(30±1)℃,风向风级分别为东北偏东风 3 级、北风 1~2 级、北风 1~2 级。



图 1 试验小区示意图

Fig. 1 Diagram of experiment plot

2)试剂和仪器。供试肥料:叶面生物酶肥,深圳市中荃科技有限公司生产,传统喷雾方式时推荐含量为清水与叶面肥质量比 600:1。植保无人机:广州极飞科技股份有限公司,P20-2019 款,四旋翼,长×宽×高×旋翼直径为 1 831 mm×1 831 mm×472 mm×812 mm,每组旋翼下方各有 1 只离心喷头,最大载药量为 10 L。试验用仪器:酶标仪,Bio Tek Synergy H1 全功能酶标仪;滤光片:200~700 nm,光

栅:250~900 nm,吸光值范围:0.000~4.000,精确度值:0.000 1。扫描仪,美国惠普公司。

1.2 试验方法

1)梯度含量设计。参考航空施药的超低容量高浓度特点,以及其他学者在植保无人机喷施叶面肥研究中设置叶面阻控剂质量分数分别为 24%、12%、8%^[18],本研究在设置叶面肥含量筛选试验中的梯度含量为:推荐含量的 10 倍、8 倍、5 倍、3 倍、1 倍,共 5 组含量,含量按顺序递减。

2)叶面肥含量筛选试验。该试验以作物不烧苗为定性指标,如表 1 所示为作物不烧苗、烧苗时的特征,并定义判定规则为:第 3 次喷雾 10 d 后,出现任一项烧苗表现则判定作物发生烧苗。使用喷雾器对试验植株进行均匀喷雾,共计叶面喷雾 3 次,每次间隔 10 d,每组含量喷施 3 株植株。

表 1 作物烧苗及不烧苗的表现

Table 1 Manifestations of crop burning and non-burning seedlings

判定对象 Decision object	不烧苗特征 Characteristics of healthy growth without fertilizer burn		烧苗特征 Characteristics of fertilizer burn
叶片 Leaf	颜色 Color	绿色 Green	黄色 Yellow
	边缘 Edge	舒展 Unfurled	卷曲 Furled
	质地 Texture	硬 Hard	软 Soft
茎 Stem	颜色 Color	绿色 Green	黄色 Yellow

3)试验处理设置。正交试验的 3 因素分别为:喷施含量(A)、飞行速度(B)、作业高度(C),本研究采用 L₉(3⁴)的正交表(表 2)。喷施含量(A)的 3 水平按叶面肥含量筛选试验结果设置,选择不会造成蔬菜烧苗的叶面肥含量进行无人机喷雾试验。

4)采样点。考虑到植保无人机有效喷幅为 3 m,

表 2 正交试验方案

Table 2 Orthogonal experiment scheme

处理 Treatment	A 喷施含量 Spray concentration	B 飞行速度/ (m/s) Flight speed	C 作业高度/ m Flight height	D 空列 Blank column
1	1(5 倍)	1(1.0)	1(2.0)	1
2	1(5 倍)	2(1.5)	2(1.0)	2
3	1(5 倍)	3(2.0)	3(2.5)	3
4	2(3 倍)	1(1.0)	2(1.0)	3
5	2(3 倍)	2(1.5)	3(2.5)	1
6	2(3 倍)	3(2.0)	1(2.0)	2
7	3(1 倍)	1(1.0)	3(2.5)	2
8	3(1 倍)	2(1.5)	1(2.0)	3
9	3(1 倍)	3(2.0)	2(1.0)	1

为避免各组间雾滴飘移相互影响,将每5垄筋菜划分为1组试验小区(图2),共计10组试验小区,两侧另设有2 m宽隔离带。第10组试验小区为空白对照组,在作业参数取中间水平时喷洒清水。3次作业

每组试验各飞行1次,将施肥流量设置为40 L/hm²,将雾滴体积中径预设200 μm。每个雾滴采集点布置3张水敏纸(图3),结果取3次飞行试验结果均值。

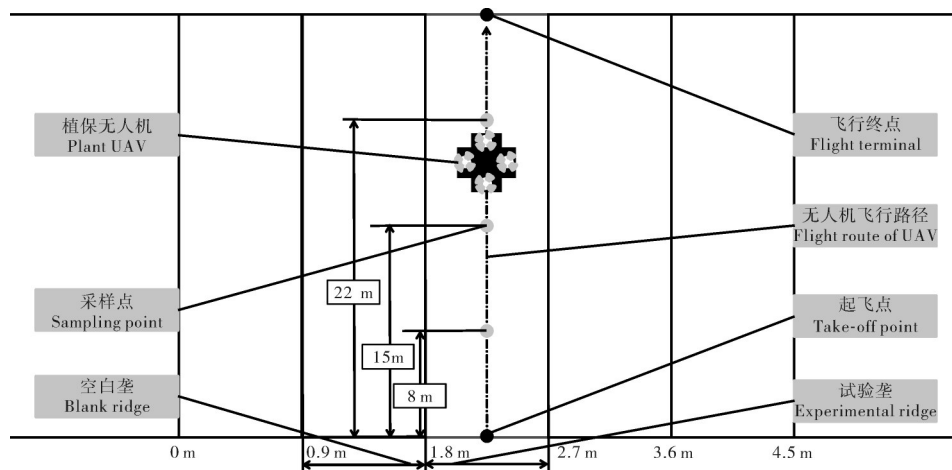
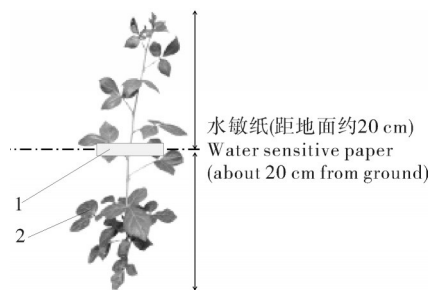


图2 试验小区采样点示意图

Fig.2 Diagram of sampling points location in the experiment plots



1:水敏纸 Water sensitive paper;2:筋菜 *Acanthopanax trifoliatum*.

图3 植株上采样点示意图

Fig.3 Diagram of sampling point on plants

1.3 调查内容及评价指标

1)喷雾质量。用水敏纸法获得的沉积量与实际沉积量变异系数在6%以内^[19];对雾滴个数计数的误差率范围为3.59%~12.65%^[20]。无人机喷雾试验结束后,使用雾滴分析软件ImageJ for Deposit对水敏纸扫描结果进行分析。使用夏皮罗-威尔克(S-W)检验考察雾滴沉积密度、雾滴沉积量数据分布是否符合正态分布,并进行Pearson相关性分析。

2)筋菜产量。筋菜双行定植,株距约40 cm,行距约70 cm,定植密度约为15 000株/hm²,平均每株叶数约为120张。根据五点取样法,以各点为中心分别框取1 m²内长势均匀的筋菜植株,在第3次施肥后10 d时,各处理在采样点范围内随机剪取1 kg叶片,并参考文献[21]计算筋菜产量。

$$Y = \frac{L \times D}{N} \quad (1)$$

式(1)中: L 为平均每株筋菜的叶片数量; D 为筋菜的定植密度,株/hm²; N 为1 kg筋菜样品的叶片数量; Y 为筋菜产量,kg/hm²。

筋菜产量相较于空白对照组的相对增减:

$$A_1 = \frac{Y_{1,i} - Y_{1,c}}{Y_{1,c}} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: $Y_{1,i}$ 为各处理筋菜产量, i 取处理序号; $Y_{1,c}$ 为空白对照组筋菜产量。

3)叶片品质。在第3次施肥后10 d时,各处理在采样点范围内随机剪取少许植株的第2对老叶,剪去叶脉后将叶片剪碎,经处理后使用分光光度法^[22]测定叶绿素含量。叶绿素含量计算公式如下:

$$C_{Chl} = \frac{(6.63D_{665\text{ nm}} + 18.08D_{649\text{ nm}}) \times V}{1000 \times m} \quad (3)$$

式(3)中: C_{Chl} 为叶绿素含量,mg/dm²; V 为提取液总体积,mL; m 为叶片鲜质量,g; $D_{649\text{ nm}}$ 为溶液在649 nm的吸光度; $D_{665\text{ nm}}$ 为溶液在665 nm的吸光度。

叶绿素含量相较于空白对照组的相对增减:

$$A_2 = \frac{Y_{2,i} - Y_{2,c}}{Y_{2,c}} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中: $Y_{2,i}$ 为各处理叶绿素含量,mg/dm², i 取处理序号; $Y_{2,c}$ 为空白对照组叶绿素含量,mg/dm²。

1.4 数据分析

使用IBM SPSS Statistics 26(SPSS 26)软件分别对筋菜产量较空白对照组的相对增减(A_1)、筋菜

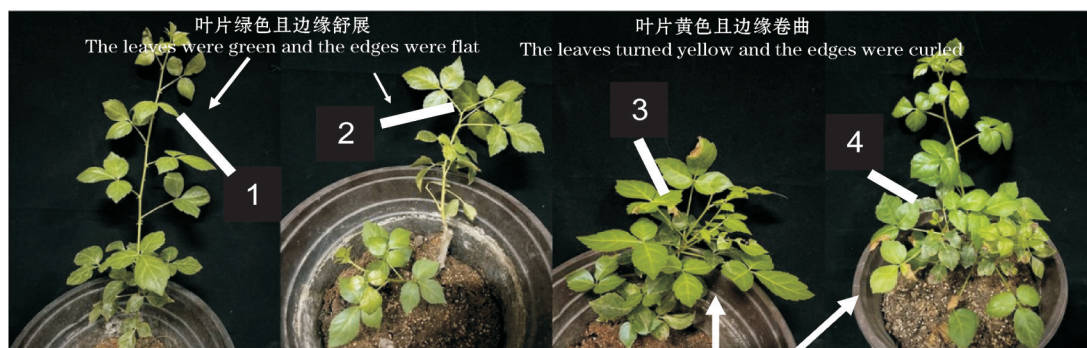
叶绿素含量较空白对照组的相对增减(A_2)进行极差和方差分析。

2 结果与分析

2.1 叶面肥含量对蕲菜的影响

试验结果表明,含量为推荐含量的1倍、3倍、5

倍时植株叶片呈绿色、边缘舒展且质地硬,各含量叶面肥均未造成蕲菜烧苗,可设为大田试验喷施含量的3倍水平;含量为推荐含量的8倍、10倍时植株叶片出现不同程度的颜色变枯黄、边缘变卷曲(图4),即该含量叶面肥会造成蕲菜烧苗,若用于大田试验可能造成不可挽回的损失。



1:3倍推荐含量 Experiment plant of 3 times; 2:5倍推荐含量 Experiment plant of 5 times; 3:8倍推荐含量 Experiment plant of 8 times; 4:10倍推荐含量 Experiment plant of 10 times.

图4 叶面肥含量筛选试验植株

Fig.4 Experiment plants in the concentration screening

2.2 植保无人机蕲菜喷施叶面肥喷雾质量分析

1)雾滴沉积分布。如图5所示,在正交试验各处理下蕲菜叶片上雾滴沉积密度在53.8~195.4个/cm²,其中处理3得到最小雾滴沉积密度,处理1得到最大沉积密度,同时处理3的平均雾滴沉积密度最小(71.9个/cm²),处理1的平均雾滴沉积密度最大(188.2个/cm²)。处理5、处理9的平均雾滴沉积密度较小,小于100个/cm²,而处理6平均雾滴沉积密度为99.4个/cm²。与雾滴沉积密度分布规律相似,各处理的平均雾滴沉积量在0.1~0.3 μg/cm²,最小和最大值分别来自于处理3、处理1。处理4、处理8的平均沉积量较大,大于0.2 μg/cm²,且处理9与处理3雾滴沉积量差别不大。雾滴沉积分布结果显示,处理1的喷雾质量最好,处理3、处理9的喷雾质量最差。

2)雾滴沉积密度与沉积量相关性。雾滴沉积密度、雾滴沉积量符合正态分布规律(P 分别为0.117、0.761),可以采用Pearson相关性分析。雾滴沉积密度、雾滴沉积量之间存在显著相关关系,且相关性极强($P=0.000$,且相关系数绝对值 r 为0.810)。

3)极差分析与方差分析。运用极差分析,按照 R 值从小到大排列,得到3个因素对喷雾质量影响程度的次序:飞行速度>作业高度>喷施含量(表3)。雾滴沉积密度、雾滴沉积量在喷施含量为推荐含量的3倍时达到低值,并随着喷施含量的减小随之增大;飞

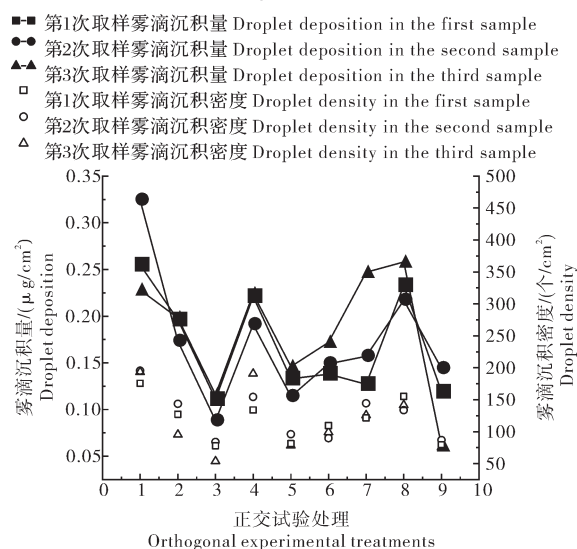


图5 蕲菜叶片的雾滴沉积分布

Fig.5 Droplet deposition distribution of *Acanthopanax trifoliatum* leaves

行速度越快,雾滴沉积密度和沉积量减小;随着作业高度越高,雾滴沉积密度和雾滴沉积量先增大后减小,在作业高度为2.0 m出现峰值后再下降。喷施含量为推荐含量的5倍、飞行速度为1.0 m/s、作业高度为2.0 m时喷雾质量最好。

为了弥补极差分析的不足,进一步研究喷施含量、飞行速度、作业高度等因素对喷雾质量的影响程度,对雾滴沉积密度和沉积量进行方差分析,结果如表4所示,就喷雾质量而言,飞行速度和作业高度对

表 3 雾滴沉积密度和沉积量极差分析

Table 3 Range analysis table of droplet density and droplet deposition

参数 Parameter	A 喷施含量 Spray concentration		B 飞行速度 Flight speed		C 作业高度 Flight height		D 误差 Error	
	沉积密度/ (个/cm ²)	沉积量/ (μg/cm ²)	沉积密度/ (个/cm ²)	沉积量/ (μg/cm ²)	沉积密度/ (个/cm ²)	沉积量/ (μg/cm ²)	沉积密度/ (个/cm ²)	沉积量/ (μg/cm ²)
	Droplet density	Droplet deposition	Droplet density	Droplet deposition	Droplet density	Droplet deposition	Droplet density	Droplet deposition
k_1	127.365	0.188	159.485	0.219	143.684	0.219	118.009	0.169
k_2	114.776	0.165	116.876	0.185	120.793	0.170	117.313	0.173
k_3	118.190	0.174	83.970	0.122	95.854	0.138	125.009	0.184
极差 Range	12.588	0.022	75.515	0.097	47.830	0.082	7.697	0.015
主次因素 Primary and secondary factors	$B>C>A>D$							
最优组合 Optimal combination	$A_1B_1C_1$							

注: k_1 、 k_2 、 k_3 表示在3因素3水平下雾滴沉积密度和沉积量的平均值。Note: k_1 、 k_2 、 k_3 represent the average values of droplet density and droplet deposition across three factors and three levels.

表 4 雾滴沉积密度和沉积量方差分析

Table 4 ANOVA for droplet density and droplet deposition

参数 Parameter	A 喷施含量 Spray concentration		B 飞行速度 Flight speed		C 作业高度 Flight height		D 误差 Error	
	沉积密度/ (个/cm ²)	沉积量/(μg/cm ²)	沉积密度/ (个/cm ²)	沉积量/(μg/cm ²)	沉积密度/ (个/cm ²)	沉积量/(μg/cm ²)	沉积密度/ (个/cm ²)	沉积量/(μg/cm ²)
	Droplet den- sity	Droplet deposition	Droplet den- sity	Droplet deposition	Droplet den- sity	Droplet deposition	Droplet den- sity	Droplet deposition
离差平方和 Sum of squares of deviations	254.290	0.001	8 600.840	0.015	3 433.658	0.010	108.724	0.000
自由度 Degree of freedom	2	2	2	2	2	2	2	2
均方 Mean square	127.145	0.000	4 300.420	0.007	1 716.829	0.005	54.362	0.000
F	2.339	2.083	79.107	39.906	31.581	27.693	/	
P	0.300	0.324	0.012	0.024	0.031	0.035	/	

喷雾质量的影响显著,喷施含量对喷雾质量的影响不显著。

2.3 植保无人机喷施叶面肥对筋菜产量、叶片品质的影响

1)筋菜产量。如图6所示,处理1~处理3产量均较空白对照组增加了15%以上,这3个处理的叶面肥喷施含量均为推荐含量的5倍,其中处理1的产量增加量最大(4 225.7 kg/hm²),较空白对照组增加27.46%,其次是处理2(3 248.57 kg/hm²),而处理9的产量增加量最小(484.5 kg/hm²),较空白对照组增加3.15%。

2)叶片品质。如图7所示,各处理叶绿素含量增加量的平均值为19.8 kg/hm²,其中处理1的叶绿素含量增加量最大(35.8 mg/dm²),较空白对照组增加33.23%,处理5与处理7~处理9的增加量均小于平均值,处理7~处理9的叶面肥喷施含量均为推荐含

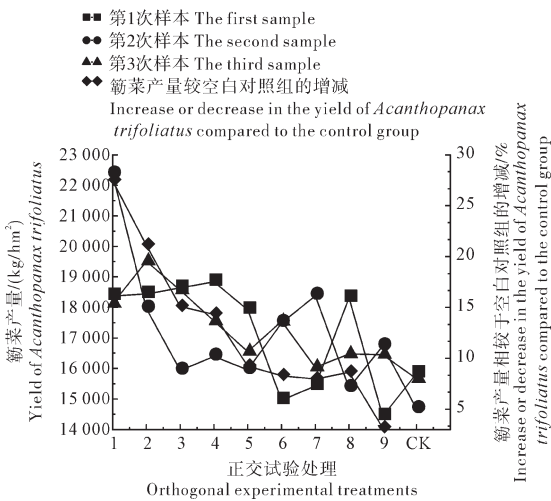


图 6 正交试验各处理的筋菜产量及其较空白对照组的相对增减

Fig.6 Yield and A_1 of each treatment in the orthogonal experiment

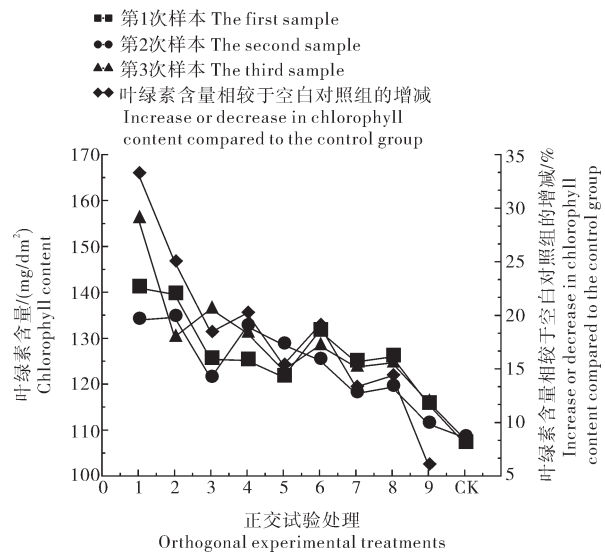


图 7 正交试验各处理的叶绿素含量及其较空白对照组的相对增减

Fig.7 Chl and A₂ of each treatment in the orthogonal experiment

表 5 苋菜产量和叶绿素含量分别较空白对照组的相对增减极差分析

Table 5 Range analysis table of yield and the content of chlorophyll

参数 Parameter	A 喷施含量 Spray concentration		B 飞行速度 Flight speed		C 作业高度 Flight height		D 误差 Error	
	产量/ (kg/hm ²) Yield	叶绿素 含量/ (mg/dm ²) Chlorophyll content	产量/ (kg/hm ²) Yield	叶绿素 含量/ (mg/dm ²) Chlorophyll content	产量/ (kg/hm ²) Yield	叶绿素 含量/ (mg/dm ²) Chlorophyll content	产量/ (kg/hm ²) Yield	叶绿素 含量/ (mg/dm ²) Chlorophyll content
k ₁	21.219	25.550	16.582	22.243	14.792	22.221	13.278	18.211
k ₂	10.616	18.212	12.989	18.240	12.861	17.084	12.453	19.129
k ₃	6.579	11.237	8.843	14.517	10.760	15.694	12.683	17.659
极差 Range	14.639	14.312	7.739	7.726	4.032	6.527	0.836	1.470
主次因素 Primary and secondary factors	A>B>C>D							
最优组合 Optimal combination	A ₁ B ₁ C ₁							

注:k₁、k₂、k₃表示在3因素3水平下苋菜产量、苋菜叶绿素含量分别较空白对照组相对增减的平均值。Note:k₁、k₂、k₃ represent the average alue of A₁ and A₂ across three factors and three levels.

3 讨 论

本研究通过叶面肥含量筛选试验筛选出不会造成作物烧苗的叶面肥含量范围,并在该含量范围基础上设计正交试验,筛选出适合无人机喷施的叶面肥含量及最佳飞行速度和作业高度。叶面肥含量筛选试验结果表明,采用传统喷雾方式喷施推荐含量8倍、10倍的叶面肥,对植株产生了烧苗现象,若直接按照航空施药经验,喷施推荐含量8倍、10倍甚至25~50倍的叶面肥势必会影响作物产量和品质与喷施目的相悖。在无人机喷雾的9个处理中,按照传统

量的1倍,可见在大田试验中使用推荐含量进行无人机喷雾喷施效果一般。在飞行速度水平相同的情况下,处理6的喷施含量小于处理3,但叶绿素含量增加量高于处理3的增加量,可能是由于处理6作业高度较低,叶片上的雾滴沉积量较大,因此叶绿素含量更高。

3)极差与方差分析。极差分析结果(表5)显示,喷施含量、飞行速度、作业高度3个因素对苋菜产量、苋菜叶片品质的影响程度次序为:喷施含量>飞行速度>作业高度。随着喷施含量升高,苋菜产量、苋菜叶片品质逐渐提高;飞行速度加快,苋菜产量、叶片品质下降;随着作业高度升高,苋菜产量、叶片品质先提高后下降,在作业高度为2.0 m时出现峰值。得到最佳作业参数组合:喷施含量为推荐含量的5倍、飞行速度为1.0 m/s、作业高度为2.0 m。方差分析结果(表6)显示,叶面肥喷施含量、无人机飞行速度和作业高度对苋菜产量、叶片品质的影响显著。

喷雾方式推荐含量喷施的处理7~处理9,较其他高含量处理来说叶片叶绿素含量增加量较少,尤其是处理9仅增加6.05%。而高含量的叶面肥处理对苋菜产量和品质的影响更大,研究结果同样证明了在无人机喷雾前进行含量筛选的必要性。

虽然目前植保无人机叶面施肥相关研究屈指可数,但能推断出叶面肥喷施含量对喷施效果的影响不容忽视。在无人机叶面喷施梯度微肥研究中,喷施含量对籽粒铁、锌、硒元素含量产生显著影响^[11]。本研究极差分析结果表明,喷施含量对产量、叶绿素

表 6 筋菜产量和叶绿素含量分别较空白对照组的相对增减方差分析
Table 6 ANOVA for yield and the content of chlorophyll

参数 Parameter	A 喷施含量 Spray concentration		B 飞行速度 Flight speed		C 作业高度 Flight height		D 误差 Error	
	产量/ (kg/hm ²)	叶绿素 含量/ (mg/dm ²)	产量/ (kg/hm ²)	叶绿素 含量/ (mg/dm ²)	产量/ (kg/hm ²)	叶绿素 含量/ (mg/dm ²)	产量/ (kg/hm ²)	叶绿素 含量/ (mg/dm ²)
	Yield	Chlorophyll content	Yield	Chlorophyll content	Yield	Chlorophyll content	Yield	Chlorophyll content
离差平方和 Sum of squares of deviations	343.021	307.330	89.984	89.568	24.400	70.917	1.089	3.307
自由度 Degree of freedom	2	2	2	2	2	2	2	2
均方 Mean square	171.511	153.665	44.992	44.784	12.200	35.459	0.545	1.653
F	314.929	92.934	82.615	27.085	22.402	21.445	/	/
P	0.003	0.011	0.012	0.036	0.043	0.045	/	/

含量的影响程度大于飞行速度、作业高度;方差结果表明,喷施含量对产量、叶绿素含量的影响显著。

从喷雾质量结果来看,植保无人机叶面施肥雾滴沉积分布规律与飞行速度、作业高度的规律与航空施药相似,飞行速度、作业高度对喷雾质量影响显著,且喷施含量为推荐含量的 5 倍、飞行速度为 1.0 m/s、作业高度为 2.0 m 时增产提质的效果最好。分析认为,筋菜柔弱铺散且平均高度约 40 cm,当无人机作业高度较低时(1.0 m),无人机下压风力强,使得植株易倒伏,从而造成雾滴流失并影响沉积;当作业高度较高时(2.5 m),筋菜上方垂直风场减弱,雾滴受侧风影响发生飘逸并影响沉积,因此,作业高度为 2.0 m 时作业效果最佳。同时,研究表明,P20 型植保无人机在速度慢时植株摆动剧烈,在速度快时植株摆动幅度小,但冠层扰动区域位置不稳定,不利于抑制雾滴飘移^[23]。

随着喷施含量增加(推荐含量的 1 倍、3 倍、5 倍),雾滴沉积密度、雾滴沉积量先减小后增大,喷施含量对喷雾质量的影响并不显著($P>0.05$),但对筋菜产量和品质的影响显著。在航空施药研究中,在药液中添加助剂可以改变其理化性质,降低药液的表面张力、降低雾滴在作物表面的接触角^[24]、提高雾滴沉积量^[25]。因此,在后续研究中应当对梯度含量下叶面肥理化性质的变化及其影响进行研究。试验结果表明,筋菜产量、筋菜叶片品质随各因素水平变化的趋势与喷雾质量相似,而本研究尚未进行喷雾质量、筋菜产量与叶片品质的相关性分析,在后续的工作中应该厘清喷雾质量、产量、叶绿素含量之间关联的内在机制。

综上可知,叶面肥含量是影响植保无人机叶面施肥的重要因素,在使用植保无人机进行叶面施肥

前有必要进行含量筛选,而选择飞行参数时可以参考航空施药研究成果。采用植保无人机喷施高含量筋菜叶面肥具有可行性,选择本研究中所用的叶面肥时,喷施含量为推荐含量的 5 倍、飞行速度为 1.0 m/s、作业高度为 2.0 m 时增产提质的效果最好,后续研究应该进一步厘清梯度含量下叶面肥理化性质的变化,以及喷雾质量与产量、叶片品质的关联关系。

参 考 文 献 References

[1] CHEN Z F, CHENG S P, LIN H Q, et al. Antibacterial, anti-inflammatory, analgesic, and hemostatic activities of *Acanthopanax trifoliatum* (L.) Merr [J]. Food science & nutrition, 2021, 9(4): 2191-2202.

[2] LIN Y Z, PAN J H, LIU Y, et al. *Acanthopanax trifoliatum* (L.) Merr polysaccharides ameliorates hyperglycemia by regulating hepatic glycogen metabolism in type 2 diabetic mice [J/OL]. Frontiers in nutrition, 2023, 10: 1111287 [2024-01-02]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1111287>.

[3] 黄俊生, 郑德和, 黄晓慧, 等. 白筋消炎喷雾剂的研制 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (32): 14155-14156. HUANG J S, ZHENG D H, HUANG X H, et al. Development of antiphlogistic spray with *Acanthopanax trifoliatum* (L.) Merr [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2008, 36 (32): 14155-14156 (in Chinese with English abstract).

[4] SITHISARN P, ROJSANGA P, JARIKASEM S, et al. Ameliorative effects of *Acanthopanax trifoliatum* on cognitive and emotional deficits in olfactory bulbectomized mice: an animal model of depression and cognitive deficits [J/OL]. Evidence-based complementary and alternative medicine, 2013, 2013: 701956 [2024-01-02]. <https://doi.org/10.1155/2013/701956>.

[5] 郭蒙, 黄绍敏, 石慧丽, 等. 超声辅助提取筋菜茶绿原酸的工艺优化 [J]. 茶叶通讯, 2020, 47 (3): 472-477. GUO M, HUANG S M, SHI H L, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of chlorogenic acid from *Acanthopanax trifoliatum*

- atus tea[J].Journal of tea communication, 2020, 47(3): 472-477(in Chinese with English abstract).
- [6] 李小明,龙惊惊,周悦,等.叶面肥的应用及研究进展[J].安徽农业科学, 2017, 45(3): 127-130.LI X M, LONG J J, ZHOU Y, et al.Application and research progress of foliar fertilizer[J].Journal of Anhui agricultural sciences, 2017, 45(3): 127-130(in Chinese with English abstract).
- [7] 李皓轩,朱杰,周勇,等.叶面肥与穗肥互作对稻虾共作水稻抽穗后光合特性、产量性状及稻米品质的影响[J].南方农业学报, 2023, 54(4): 1095-1105.LI H X, ZHU J, ZHOU Y, et al.Effects of foliar fertilizer and panicle fertilizer interaction on photosynthetic characteristics, yield traits and rice quality of rice-shrimp co-cropping after rice panicle pumping[J].Journal of southern agriculture, 2023, 54(4): 1095-1105(in Chinese with English abstract).
- [8] 徐茜,曾新宇,肖波,等.叶面肥对叶菜型甘薯茎尖产量和品质的影响[J].作物杂志, 2023(3): 183-187.XU Q, ZENG X Y, XIAO B, et al.Effects of foliar fertilizer on yield and quality of shoot tip in leaf-vegetable sweet potato[J].Crops, 2023(3): 183-187(in Chinese with English abstract).
- [9] 何雄奎.中国植保机械与施药技术研究进展[J].农药学报, 2019, 21(S1): 921-930.HE X K. Research progress of plant protection machinery and pesticide application technology in China[J].Chinese journal of pesticide science, 2019, 21(S1): 921-930(in Chinese with English abstract).
- [10] 胡红岩,任相亮,姜伟丽,等.植保无人机棉田喷洒农药沉积分布研究[J].华中农业大学学报, 2018, 37(5): 59-64.HU H Y, REN X L, JIANG W L, et al.Pesticide spray distribution of plant protection UAV in cotton field[J].Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(5): 59-64(in Chinese with English abstract).
- [11] 李文宗,李春萍,梁鑫,等.无人机叶面喷施梯度微肥对不同品种冬小麦籽粒矿质元素的影响[J].生物技术通报, 2021, 37(9): 152-160.LI W Z, LI C P, LIANG X, et al.Effects of foliar gradient micro-fertilizer sprayed by UAV on the grain mineral elements of different winter wheat varieties[J].Biotechnology bulletin, 2021, 37(9): 152-160(in Chinese with English abstract).
- [12] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等.中国农业航空施药技术研究进展与展望[J].农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.ZHANG D Y, LAN Y B, CHEN L P, et al.Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J].Transactions of the CSAM, 2014, 45(10): 53-59(in Chinese with English abstract).
- [13] 孙乐鑫,陈兵,赵静,等.无人机施药技术在农业生产中的应用研究现状及展望[J].江苏农业科学, 2022, 50(15): 31-42.SUN L X, CHEN B, ZHAO J, et al.Research status and prospect on application of UAV spray technology in agricultural production[J].Jiangsu agricultural sciences, 2022, 50(15): 31-42(in Chinese with English abstract).
- [14] 任万军,吴振元,李蒙良,等.水稻无人机撒肥系统设计与试验[J].农业机械学报, 2021, 52(3): 88-98.REN W J, WU Z Y, LI M L, et al.Design and experiment of UAV fertilization spreader system for rice[J].Transactions of the CSAM, 2021, 52(3): 88-98(in Chinese with English abstract).
- [15] 陈盛德,兰玉彬,李继宇,等.小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J].农业工程学报, 2016, 32(17): 40-46.CHEN S D, LAN Y B, LI J Y, et al.Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy[J].Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 40-46(in Chinese with English abstract).
- [16] 薛新宇,屠康,兰玉彬,等.无人机高浓度施药对水稻品质的影响[J].农业机械学报, 2013, 44(12): 94-98.XUE X Y, TU K, LAN Y B, et al.Effects of pesticides aerial applications on rice quality[J].Transactions of the CSAM, 2013, 44(12): 94-98(in Chinese with English abstract).
- [17] 杜海萌,韦还和,余清源,等.水稻叶面肥研究的应用进展与展望[J].作物杂志, 2022(3): 33-38.DU H M, WEI H H, YU Q Y, et al. Application progress and prospect of rice foliar fertilizer[J].Crops, 2022(3): 33-38(in Chinese with English abstract).
- [18] 隆志方,黄蕊,王继红,等.植保无人机喷施锌锰型水稻降Cd叶面阻控剂的飞行参数研究[J].农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1869-1876.LONG Z F, HUANG R, WANG J H, et al. Effects of flight parameters of plant protection unmanned aerial vehicles (UAVs) on rice cadmium reduction via spraying of zinc-manganese leaf inhibitor[J].Journal of agro-environment science, 2021, 40(9): 1869-1876(in Chinese with English abstract).
- [19] 陈旭阳,茹煜,刘彬.雾滴粒径及沉积量测试方法分析及比较[J].农机化研究, 2021, 43(10): 132-136.CHEN X Y, RU Y, LIU B. Analysis and comparison of test methods for droplet size and deposition[J].Journal of agricultural mechanization research, 2021, 43(10): 132-136(in Chinese with English abstract).
- [20] 亢洁,刘港,郭国法.基于ImagePy的水敏纸图像预处理及液滴参数测量[J].科学技术与工程, 2021, 21(13): 5405-5414.KANG J, LIU G, GUO G F. Image preprocessing and droplet parameter measurement of water-sensitive paper based on ImagePy[J].Science technology and engineering, 2021, 21(13): 5405-5414(in Chinese with English abstract).
- [21] 李金珠,朱家贤,周瑞甫,等.谈常用的几种水稻测产方法[J].生物学教学, 1960(1): 32-34.LI J Z, ZHU J X, ZHOU R F, et al. Discussion on several commonly used methods of rice yield measurement[J].Biology teaching, 1960(1): 32-34(in Chinese).
- [22] 胡秉芬,黄华梨,季元祖,等.分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度[J].草业科学, 2018, 35(8): 1965-1974.HU B F, HUANG H L, JI Y Z, et al.Evaluation of the optimum concentration of chlorophyll extract for determination of

- chlorophyll content by spectrophotometry[J].Pratacultural science, 2018, 35(8): 1965-1974 (in Chinese with English abstract).
- [23] 田志伟,薛新宇,徐阳,等.植保无人机下洗气流对作物冠层作用规律研究[J].农业机械学报,2021,52(1):40-48.TIAN Z W,XUE X Y,XU Y,et al.Effect of plant protection UAVs downwash on crop canopy [J]. Transactions of the CSAM, 2021,52(1):40-48(in Chinese with English abstract).
- [24] 兰玉彬,单常峰,王庆雨,等.不同喷雾助剂在植保无人机喷施作业中对雾滴沉积特性的影响[J].农业工程学报,2021,37(16):31-38.LAN Y B,SHAN C F,WANG Q Y,et al.Effects of different spray additives on droplet deposition characteristics during plant protection UAV spraying operations [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(16): 31-38 (in Chinese with English abstract).
- [25] 胡红岩,陈宇楠,宋贤鹏,等.喷雾量及助剂对棉花苗期植保无人飞机作业效果的影响[J].农药学学报,2022,24(4):825-833.HU H Y,CHEN Y N,SONG X P,et al.Influence of the spray volumes and adjuvants on operational efficacy of plant protection unmanned aerial vehicle at the seedling stage of cotton[J].Chinese journal of pesticide science,2022,24(4):825-833(in Chinese with English abstract).

Optimizing parameters for spraying foliar fertilizer on *Acanthopanax trifoliatum* with unmanned aerial vehicle

ZHANG Jiantao^{1,2,3}, WU Fengqiu^{1,2}, HUANG Lusheng^{1,2}, LIU Guangbin^{1,2}, WEN Sheng², LAN Yubin²

1.College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2.National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology, Guangzhou 510642, China;

3.Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Smart Agricultural Technology in Tropical South China, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract The XAG P20-2019 quadcopter UVA was used to spray foliar fertilizer on *Acanthopanax trifoliatum* to study the feasibility and optimal combination of working parameters for spraying foliar fertilizer on *Acanthopanax trifoliatum* with unmanned aerial vehicle (UAV). The orthogonal experiment with three factors and three levels was designed to investigate the effects of the concentration of spraying, the speed of flight and the height of working on the quality of spraying, the yield of *Acanthopanax trifoliatum* and the quality of leaf. The results showed that the speed of flight and the height of working had significant effects on the quality of spraying, and the density of droplet deposition had a strong positive correlation with the amount of droplet deposition. The effects of the concentration of spraying, the speed of flight and the height of working on the yield and quality of leaf in *Acanthopanax trifoliatum* were significant. The density and the amount of droplet deposition was 188.212/cm² and 0.269 μg/cm² when the concentration of spraying, the speed of flight and the height of working was 5 times the concentration recommended, 1.0 m/s and 2.0 m. At this time, the effect of spraying foliar fertilizer on *Acanthopanax trifoliatum* with UAV was the best, with a 27.46% increase in the yield of *Acanthopanax trifoliatum* and a 33.23% increase in the content of chlorophyll in *Acanthopanax trifoliatum* compared with that of the control. It is indicated that it is feasible to use UAV to spray foliar fertilizer with high concentration on *Acanthopanax trifoliatum*. It will provide references for using the same type of UVA to spray foliar fertilizer.

Keywords *Acanthopanax trifoliatum*; unmanned aerial vehicle (UAV); foliar fertilizer; chlorophyll; working parameters

(责任编辑:陆文昌)