

## 无人旋翼机航空施药有效喷幅确定方法比较

宋坚利 刘杨 刘亚佳\* 何雄奎 李永娜 王昌陵 王士林

(中国农业大学 理学院,北京 100193)

**摘要** 针对无人旋翼机航空施药存在喷雾不均、施药效果差的问题,利用雾滴密度判定法、最小变异系数判定法和50%有效沉积判定法在静风条件下对单旋翼无人机航空施药时的喷雾幅宽和喷雾均匀性进行研究,结果表明:1)最小变异系数法得到的有效喷幅最小,仅为1.8 m,沉积分布均匀性最好,变异系数仅为2.1%;2)雾滴密度判定法得到的有效喷幅最大,为3.9 m,沉积分布均匀性也最差,变异系数为19.3%。3)通过最小变异系数判定法分析发现,药液沉积分布变异系数随着有效喷幅宽度的增加呈现先减小再增加的趋势,当有效喷幅超过一定值后,有效喷幅宽度与沉积分布变异系数成线性正相关。

**关键词** 无人机;航空施药;有效喷幅;沉积

中图分类号 S3 文章编号 1007-4333(2017)10-0126-07 文献标志码 A

## Effective spray swath width determination of aerial spraying using unmanned aerial vehicle

SONG Jianli, LIU Yang, LIU Yajia\*, HE Xiongkui, LI Yongna, WANG Changling, WANG Shilin

(College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** Unmanned aerial vehicle (UAV) could be an appropriate flying platform used to accomplish plant protection, and it had a wide range of application prospects in agricultural production. However, there were still no standards available for UAV aerial spraying at present. In this study, the spray swath width of a single rotor unmanned helicopter was measured under no wind condition. Effective spray swath width was determined by three different methods: Droplet density determinate method, minimum acceptable deposition coefficient variation (CV) values determinate method and 50% effective application rate determinate method. The results showed that the effective spray widths of the helicopter were different by these methods: 1) The effective spray width of minimum acceptable deposition CV values determinate method was 1.8 m, which was the minimum one with the best deposition distribution uniformity, and its CV was 2.1%; 2) 50% effective application rate determinate method is the following one; Droplet density determinate method had the biggest effective spray width, 3.9 m, with the worst deposition distribution uniformity; and its CV was 19.3%. 3) Along with the increase of effective spray swath width, deposition coefficient variation (CV) values increased at first and later decreased. When spraying swath width exceeded over a certain value, the effective spray swath width was linearly correlated with deposition CV values.

**Keywords** unmanned aerial vehicle; aerial spraying; effective spray swath width; deposition

目前应用无人机进行农药喷施<sup>[1]</sup>、杂草监测<sup>[2-3]</sup>、农情勘察<sup>[4]</sup>、病虫害防控<sup>[5]</sup>等在农业生产中具有较大的应用前景<sup>[6]</sup>。与有人机航空施药相比,无人旋翼机植保作业具有作业高度低,飘移少的优

点,同时,无人旋翼机的远距离遥控操作,提高了喷洒作业人员安全性<sup>[7]</sup>。在日本、韩国等户均耕地面积较小的国家,无人旋翼机用于植保作业的形式越来越被广大农户采纳。自2004年起,日本在水稻生

收稿日期:2016-09-23

基金项目:粮经作物产业技术体系北京市创新团队资助项目

第一作者:宋坚利,副教授,博士,主要从事植保机械与施药技术研究,E-mail:songjianli170@163.com

通讯作者:刘亚佳,副教授,博士,主要从事农业机械化研究,E-mail:liuyajia@cau.edu.cn

产中的农用无人机使用量已经超过有人驾驶直升机。目前,用于农林植保的无人旋翼机以 Yamaha Rmax 系列为主。

我国自 2008 年开始发展无人旋翼机施药技术,经过前期研发测试阶段,已有多种机型被大面积推广应用。我国对于无人机航空施药的研究,目前主要集中在 2 方面:一是关键部件设计,如新型雾化喷头设计<sup>[8]</sup>、远程控制低量喷雾系统设计<sup>[9]</sup>、农药变量喷洒系统设计<sup>[10-11]</sup>和小型无人直升机的农药离心雾化系统设计<sup>[12-13]</sup>等;二是对施药效果的研究。薛新宇等<sup>[14-15]</sup>测试了 N-3 型无人直升机对稻飞虱和稻纵卷叶螟的防治效果,并测试了 2 种常规药剂在无人机低量高浓度的施药方式下对水稻品质的影响;高圆圆等<sup>[16-17]</sup>进行了小型无人机施药防治小麦和玉米害虫的防治效果研究;秦维彩等<sup>[18]</sup>测试了无人机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响;张京等<sup>[19]</sup>测试了无人机喷雾参数对水稻冠层中雾滴沉积的影响。现阶段植保无人旋翼机的农药喷洒系统还不成熟,但基本能够达到病虫害防治要求。由于缺乏相关行业标准,实际作业中飞行参数(飞行高度、飞行速度、飞行路线规划)和喷雾参数(施药量、喷头喷量、雾滴粒径)的选择大多依靠企业自行确定,存在喷雾不均、药害严重、防治效果差等问题。与喷杆喷雾机相似,无人旋翼机的有效喷幅能够显

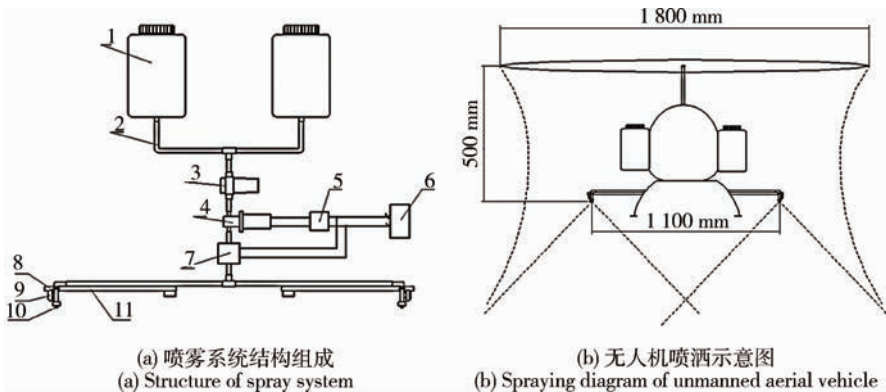
著影响喷施过程中的雾滴沉积分布均匀性,是确定作业飞行参数和喷雾参数的重要参考依据。

雾滴密度判定法、最小变异系数判定法和 50% 有效沉积判定法是目前判定无人机有效喷幅的 3 种测试方法,本研究采用 3 种方法对无人旋翼机的有效喷幅进行测定,比较 3 种有效喷幅下的雾滴沉积分布均匀性,以期为植保无人旋翼机有效喷幅测定标准的制定提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 油动单旋翼无人机喷雾系统与系统参数

试验所用无人旋翼机为安阳全丰航空植保科技有限公司研制的 3WQF80-10 型油动单旋翼无人直升机。系统参数为:最大载药量 10 L,旋翼直径 1.8 m,起飞质量 35 kg,主旋翼转速 1350 r/min,飞行速度 0~15 m/s,作业高度 2~6 m,手动遥控飞行,可配置飞控系统实现定高定速、一键悬停。喷雾系统结构见图 1。药箱通过管路与过滤器、液泵、喷雾控制器、喷头体依次连接,喷头体固定在喷杆上。液泵控制器能够控制液泵开闭以及液泵转速,以调整流量。喷雾控制器能够控制喷头的开闭。喷雾系统采用 2 个扇形雾喷头喷雾作业,喷头间距 1.1 m,固定在起落架上主旋翼正下方,距离旋翼高度 0.5 m。



1. 药箱;2. 管路;3. 过滤器;4. 液泵;5. 液泵控制器;6. 电池;7. 喷雾控制器;8. 喷头体;9. 防滴阀;10. 喷头;11. 喷杆

1. Tank;2. Tube;3. Filter;4. Pump;5. Pump controller;6. Battery;7. Spraying controller;8. Nozzle body;9. Anti-drip valve;10. Nozzle;11. Boom

图 1 3WQF80-10 型油动单旋翼无人机喷雾系统

Fig. 1 3WQF80-10 unmanned aerial vehicle-based spraying system

### 1.2 有效喷幅确定方法

本研究中有有效喷幅的确定方法有 3 种,分别是雾滴密度判定法、50% 有效沉积判定法和最小变异系数判定法。

1) 雾滴密度判定法。参考茹煜等<sup>[20]</sup>的方法,将雾滴沉积密度达到 15 滴/cm<sup>2</sup> 以上的范围计作有效喷幅宽度。

2) 50% 有效沉积判定法。依据 ASAE 标准

S341.3<sup>[21]</sup>,将单喷幅中沉积量为最大沉积量1/2的两点间距定义为有效喷幅。

3)最小变异系数判定法。依据ASAE标准S341.3<sup>[21]</sup>,根据单喷幅宽度设定不同间距作为有效喷幅宽度,通过计算分别模拟3个喷幅的叠加药液沉积情况,并对中间第2个喷幅中的叠加沉积量计算平均值得到沉积变异系数,系数最小值所对应的间距即为有效喷幅。

### 1.3 单喷幅测定

#### 1.3.1 试验方法

根据有效喷幅确定方法,需要首先测试无人机的单个喷雾幅宽,为消除外界气流对雾滴沉降运动的影响,无人机单喷幅测定在静风条件下进行。测试机型为装配有定高定速飞控系统的3WQF80-10型油动单旋翼无人机,设定飞行高度3.5 m,飞行速度4 m/s,喷雾系统装配2个LU120-02喷头(LECHLER,德国),喷雾压力0.2 MPa。地面布点见图2;喷幅测试区域长100 m,在中间区域水平布置23个间距0.3 m的Mylar片(5 cm×10 cm)和水敏纸(2.6 cm×7.6 cm)作为靶标测试沉积量与雾滴沉积状态,为消除无人机下洗气流地面卷扬造成的误差,设置靶标距地高度1 m,因此测试作业高度为2.5 m;无人机由起飞点起飞,达到预定高度后开始飞行并喷雾,在到达测试起始线前使飞行速度达到设定速度,测试起始线距离起飞点20 m,无人机通过测试停止线后减速并停止喷雾,降落到降落点。测试重复3次。喷雾药液为质量浓度约2.5 g/L的柠檬黄(上海染料研究所有限公司)水溶液,试验后收集母液测定实际喷施浓度。

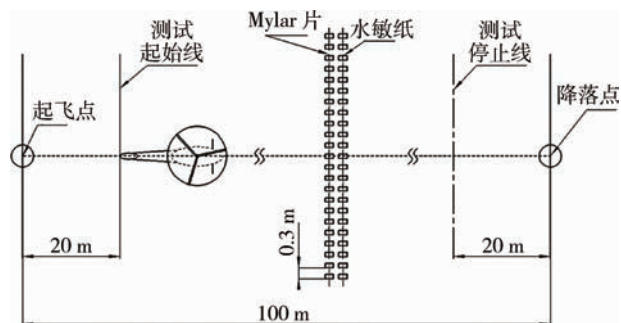


图2 喷幅测试布点示意图

Fig.2 Spray swath test diagram

#### 1.3.2 样品处理

喷雾结束后,将Mylar片和水敏纸收集在自封

袋中待处理。Mylar片用去离子水洗脱,使用722分光光度计(上海精密科学仪器有限公司,中国)测定洗脱液吸光值,根据式(1)计算单位面积药液沉积量。

$$D_x = \frac{1\ 000A_xV_x}{A_0NM} \quad (1)$$

式中: $D_x$ 为单位面积药液沉积量, $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ;  $A_x$ 为洗脱液吸光值; $V_x$ 为洗脱所用去离子水体积,mL;  $A_0$ 为母液吸光值; $N$ 为母液稀释倍数; $M$ 为Mylar片面积, $\text{cm}^2$ 。

对水敏纸采用DepositScan软件(美国USDA)扫描分析获得雾滴谱、单位面积沉积雾滴数、覆盖率等参数。

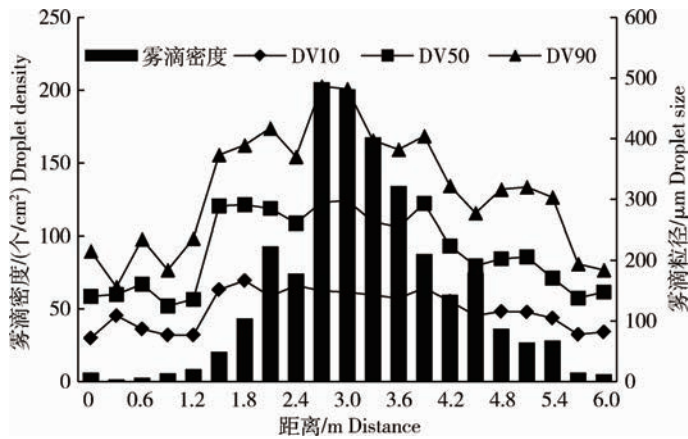
#### 1.4 雾滴粒径测试

由于通过DepositScan软件对水敏纸进行数据处理也能得到雾滴沉积量,在试验过程中为了减少实验工作量,多使用水敏纸作为靶标测定有效喷幅。为了对比水敏纸所获得的雾滴粒径数据与实测雾滴粒径数据差异,验证水敏纸测定雾滴沉积量、计算有效喷幅宽度的可行性,试验对LU120-02喷头的雾滴粒径进行了测试。测试在中国农业大学药械与施药技术研究中心进行,使用Malvern Spraytec激光粒度仪进行雾滴粒径测定,喷雾压力0.2 MPa,测试范围为距离喷头正下方50 cm处的喷雾截面,测试介质为纯净水,测试温度24℃,相对湿度62%,试验重复3次,计算雾滴粒径平均值。

## 2 结果与分析

图3示出水敏纸通过图像处理所得到的雾滴粒径与雾滴密度,由于左右两端水敏纸没有雾滴沉积,因此只分析中间21个点的数。根据雾滴密度确定法的有效喷幅判定方法得到3WQF80-10型油动单旋翼无人直升机的有效喷幅为3.9 m。由图3可知,有效喷幅中间位置的雾滴密度最大,可以达到200个/ $\text{cm}^2$ ,有效喷幅两侧边缘位置雾滴密度约为20个/ $\text{cm}^2$ 。

为验证该判定方法的可行性,根据确定的喷幅模拟计算了3个喷幅叠加所得的雾滴沉积密度情况(图4),通过对第2个喷幅中的叠加雾滴密度计算可知,喷幅范围内平均雾滴密度为94个/ $\text{cm}^2$ ,雾滴密度变异系数为63.6%。在沉积区域中,雾滴密度分布呈现明显的尖峰情况。虽然雾滴沉积密度均大于15个/ $\text{cm}^2$ 这个判断指标,但是喷幅中心位置的



DV10, DV50, DV90 表示累积体积分数为 10%、50%、90% 时对应的雾滴粒径,  $\mu\text{m}$ , 即小于此粒径的雾滴体积分数分别占全部雾滴总体积的 10%、50% 和 90%。

DV10, DV50 and DV90 values indicate that 10%, 50% and 90%, respectively, of the spray volume was contained in droplets that were smaller than these values.

图 3 水敏纸处理所得雾滴粒径与雾滴密度

Fig. 3 Droplet size and droplet density on water sensitive papers

雾滴密度  $205 \text{ 个}/\text{cm}^2$  要远高于喷幅两侧  $34 \text{ 个}/\text{cm}^2$ , 如果在防治作业中雾滴密度是影响药效的重要因素之一, 那  $34 \sim 205 \text{ 个}/\text{cm}^2$  的雾滴沉积密度分布区间可能会造成在喷幅中的农药药效有显著区别。

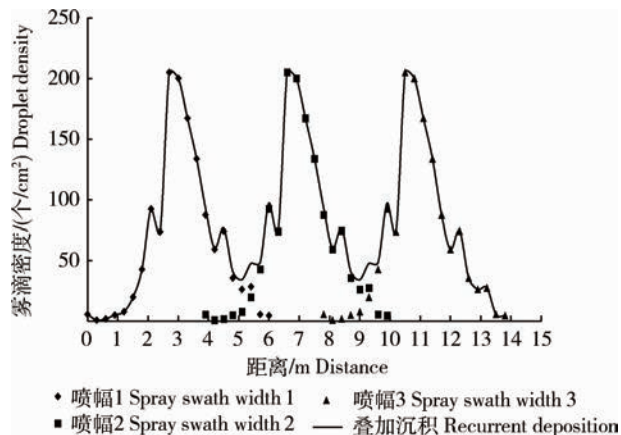


图 4 3.9 m 有效喷幅下 3 个喷幅叠加的雾滴沉积密度  
Fig. 4 Droplet density complementing 3 spraying swath

采用 LU120-02 喷头, 雾滴累计体积分数分别达到 10%、50%、90% 时, 激光粒度仪测量得到的雾滴粒径 (DV10, DV50, DV90) 为:  $86$ 、 $163$  和  $287 \mu\text{m}$ 。对比图 3 中由水敏纸得到的数据可以发现, 在有效喷幅  $3.9 \text{ m}$  范围内, 水敏纸所得的 DV50 ( $>200 \mu\text{m}$ ) 远大于激光粒度仪测量值 ( $163 \mu\text{m}$ ); 在有效喷幅范围外、雾滴密度较小时所得的雾滴粒径

( $144 \mu\text{m}$ ) 略小于激光粒度仪测得数据。分析原因可能是, 在有效喷幅范围内, 雾滴密度大存在雾滴叠加现象, 通过图像处理时将叠加的多个雾滴作为一个大雾滴进行处理, 因此在雾滴密度较大时所得的雾滴粒径较大; 由于无人机作业时雾滴运动时间长, 挥发作用减小了雾滴粒径, 因此雾滴密度较小时, 所得的雾滴粒径数据也会变小。综合分析可知, 采用水敏纸法进行沉积测试时, 图像处理结果得到的雾滴粒径以及根据雾滴粒径推算的药液沉积量同实际沉积量存在偏差, 因此不建议采用水敏纸的图像数据计算雾滴沉积量, 而采用 Mylar 片作为靶标进行测定。

图 5 示出使用 Mylar 片作为靶标测得的雾滴沉积量与喷幅的关系。可见, 单喷幅的最大沉积量为

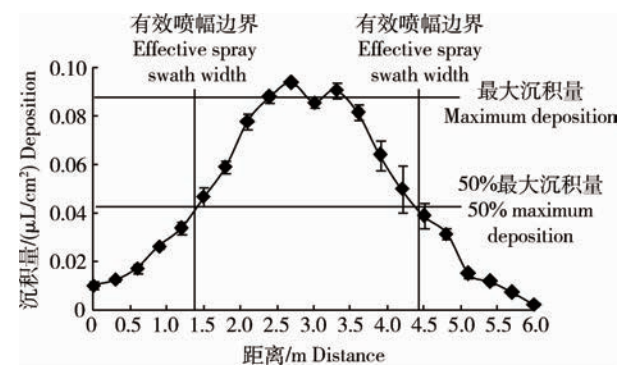


图 5 单个喷幅药液沉积量

Fig. 5 Deposition of single spraying swath



0.09  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ , 根据 50% 有效沉积判定法的计算方法, 沉积量大于 0.045  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$  的喷雾区域即为有效喷幅宽度, 由此确定 3WQF80-10 型油动单旋翼无人直升机的有效喷幅为 3 m。根据确定的有效喷幅模拟计算 3 个喷幅叠加所得的药液沉积情况, 对第 2 个喷幅中的叠加沉积计算得到, 有效喷幅范围内平均药液沉积量为 0.071  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ , 沉积量变异系数为 7.4%。

根据最小变异系数判定法的计算方法, 设定

3WQF80-10 型油动单旋翼无人直升机有效喷幅宽度分别为 1.2、1.8、2.4、3.0、3.6、4.2、4.8、5.4、6.0 m, 通过计算有效幅宽下的平均叠加沉积量和方差, 得到每个喷幅宽度下的雾滴最小变异系数(表 1)。根据 ASAE 标准 S341.3 规定的最小变异系数法确定有效喷幅的方法, 沉积量变异系数最小值为 2.1%, 此时的喷幅即为有效喷幅 1.8 m。

图 6 示出不同有效喷幅宽度下的沉积量变异系数曲线图。可见, 当喷幅 > 1.8 m 时, 随着喷幅增加,

表 1 有效喷幅宽度与喷雾沉积分布

Table 1 Effective swath width and spraying deposition uniform

参数 Parameter	有效喷幅/m Effective swath width								
	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0
平均沉积量/ $(\mu\text{L}/\text{cm}^2)$ Average deposition	0.203	0.154	0.117	0.094	0.078	0.066	0.057	0.051	0.046
标准差 SD	0.005	0.003	0.007	0.007	0.012	0.019	0.025	0.028	0.031
变异系数/% CV	2.3	2.1	6.0	7.4	15.7	28.8	42.7	55.8	67.8

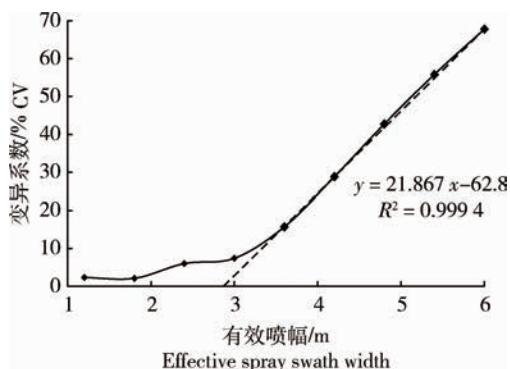


图 6 不同有效喷幅的沉积量变异系数

Fig. 6 Coefficient variation (CV) value of effective spraying swath

沉积量变异系数随之增加, 并且在 3.6 m 后呈现线性正相关( $R^2 = 0.9994$ )。

表 2 示出 3 种方法确定的有效喷幅值以及所对应的变异系数值, 可见, 3 种方法所得的有效喷幅有显著区别, 最小变异系数判定法确定的有效喷幅最小, 其次是 50% 有效沉积判定法, 雾滴密度判定法确定的最大。对比 3 种方法可知, 雾滴密度判定法处理最方便, 可以最短时间内得出结果, 并且能够直观的观测到沉积雾滴的分布情况, 但是由于雾滴叠加情况存在, 通过图像处理方法得到的沉积量与实际沉积量有很大偏差, 不能够得到施药区域中的实际沉积量分布情况。此外, 在实际作业时, 根据气象

表 2 3 种判定方法有效喷幅对比

Table 2 Effective spray swath width determined by three different rules

判定方法 Determination rule	有效喷幅/m Effective spray swath width	沉积量变异系数/% CV value of deposition
雾滴密度判定法 Droplet density determinate method	3.9	19.3
50% 有效沉积判定法 50% effective application rate determinate method	3.0	7.4
最小变异系数判定法 Minimum acceptable deposition CV values determinate method	1.8	2.1

条件、防治对象以及选用农药不同,需要更换不同类型的喷头,因此产生的雾滴粒径也随之改变,如果还是按照 15 个/cm<sup>2</sup> 这个判断标准,势必会得出错误的有效喷幅,从而影响施药效果。50%有效沉积判定法与最小变异系数判定法所需要的工作量类似,但 50%有效沉积判定法计算量较小。最小变异系数判定法需要模拟计算多个有效喷幅的沉积量变异系数,通过此方法可以发现不同喷幅时的沉积量分布情况。因为当无人机航空作业时喷幅越小,“几”字型飞行的往返次数越多,操作手的作业强度越大,作业效率越低,因此实际作业时,并不能一味的为了获得高的沉积分布均匀性而减小有效喷幅,需要在沉积分布均匀性与作业效率之间权衡。

### 3 结 论

1) 由于雾滴叠加和雾滴运动过程中的挥发作用,水敏纸图像处理结果得到的雾滴粒径与实际沉积量存在偏差,因此不建议采用水敏纸的图像数据结果作为最小变异系数法和 50%沉积判定法的沉积量计算依据。

2) 采用雾滴密度判定法、50%有效沉积判定法、最小变异系数判定法得到的单旋翼无人机的有效喷幅不同,最小变异系数法得到的有效喷幅最小,沉积分布均匀性最好,其次是 50%有效沉积判定法,雾滴密度判定法得到的有效喷幅最大,沉积分布均匀性最差。

3) 通过最小变异系数判定法分析发现,药液沉积分布变异系数随着有效喷幅宽度的增加呈现先减小再增加的趋势,在超过一定值(3.6 m)后,有效喷幅宽度与沉积分布变异系数成线性正相关,沉积分布均匀性降低。

4) 综合分析 3 种有效喷幅的判定方法,考虑旋翼无人机喷雾过程中的雾滴沉积分布特性和工作效率需求,建议采用 50%有效沉积判定法确定有效喷幅。

### 参考文献 References

[1] Bruno S F, Fausto G C, Pessin G, Ueyama J, Freitas H, Colombo A. The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks for spraying pesticides [J]. *Journal of Systems Architecture*, 2014, 60(4): 393-404

[2] Pérez-Ortiz M, Peña J M, Gutiérrez P A, Torres-Sánchez J C. A semi-supervised system for weed mapping in sunflower crops

using unmanned aerial vehicles and a crop row detection method[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 37: 533-544

[3] Garcia-Ruiz F J, Wulfsohn D, Rasmussen J. Sugar beet (*Beta vulgaris* L) and thistle (*Cirsium arvensis* L) discrimination based on field spectral data[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 139: 1-15

[4] Sankaran S, Khot L R, Espinoza C Z, Jarolmasjed S, Sathuvali V R, Vandemark G J. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review [J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70: 112-123

[5] Donald E A, David G, Schmale III, Elson J S, Maria N, Carmen J N. Tracking the potato late blight pathogen in the atmosphere using unmanned aerial vehicles and Lagrangian modeling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(2): 251-260

[6] Bae Y, Koo Y M. Flight attitudes and spray patterns of a rollo-balanced agricultural unmanned helicopter [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, 29(5): 675-682

[7] 何勇, 张艳超. 农用无人机现状与发展趋势[J]. *现代农机*, 2014(1): 1-5

He Y, Zhang Y C. The current situation and development tendency on agricultural plant protection UAV [J]. *Modern Agricultural Machinery*, 2014(1): 1-5 (in Chinese)

[8] 茹煜, 金兰, 周宏平, 贾志成. 航空施药旋转液力雾化喷头性能试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 50-55

Ru Y, Jin L, Zhou H P, Jia Z C. Performance experiment of rotary hydraulic atomizing nozzle for aerial spraying application [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(3): 50-55 (in Chinese)

[9] 茹煜, 贾志成, 范庆妮, 车军. 无人直升机远程控制喷雾系统[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(6): 47-52

Ru Y, Jia Z C, Fan Q N, Che J. Remote control spraying system based on unmanned helicopter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(6): 47-52 (in Chinese)

[10] 徐兴, 徐胜, 刘永鑫, 陈佳森, 蔡仲勋, 余展韶. 小型无人机机载农药变量喷洒系统设计[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(9): 207-210

Xu X, Xu S, Liu Y X, Chen J S, Cai Z X, Yu Z S. Variable pesticide spraying system design based on small UAV [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(9): 207-210 (in Chinese)

[11] Zhu H, Lan Y B, Wu W F, Hoffmann W C, Huang Y B, Xue X Y, Liang J, Brad F. Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2010, 7(3): 276-283

[12] 范庆妮. 小型无人直升机农药雾化系统的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011

Fan Q N. The research on the pesticide spray system using for the mini unmanned helicopter [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011 (in Chinese)

- [13] 周立新,薛新宇,孙竹,秦维彩,张宋超,孔伟. 无人直升机农药喷洒系统的设计及应用[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(12): 396-398  
Zhou L X, Xue X Y, Sun Z, Qin W C, Zhang S C, Kong W. Design and application of pesticide spraying system for UAV [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2013, 41(12): 396-398 (in Chinese)
- [14] 薛新宇,秦维彩,孙竹,张宋超,周立新,吴萍. N-3型无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响[J]. 植物保护学报, 2013, 40(3): 273-278  
Xue X Y, Qin W C, Sun Z, Zhang S C, Zhou L X, Wu P. Effects of N-3 UAV spraying methods on the efficiency of insecticides against planthoppers and *Cnaphalocrocis medinalis* [J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2013, 40(3): 273-278 (in Chinese)
- [15] 薛新宇,屠康,兰玉斌,秦维彩,张玲. 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, 79  
Xue X Y, Tu K, Lan Y B, Qin W C, Zhang L. Effects of pesticides aerial applications on rice quality [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(6): 94-98, 79 (in Chinese)
- [16] 高圆圆,张玉涛,张宁,牛亮,郑万文,袁会珠. 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  
Gao Y Y, Zhang Y T, Zhang N, Niu L, Zheng W W, Yuan H Z. Primary studies on spray droplets distribution and control effects of aerial spraying using unmanned aerial vehicle (UAV) against wheat midge [J]. *Crops*, 2013, (2): 139-142 (in Chinese)
- [17] 高圆圆,张玉涛,赵西城,李学辉,杨代斌,袁会珠. 小型无人机低空喷洒在玉米田的雾滴沉积分布及对玉米螟的防治效果初探[J]. 植物保护, 2013, 39(2): 152-157  
Gao Y Y, Zhang Y T, Zhao Y C, Li X H, Yang D B, Yuan H Z. Primary studies on spray droplet distribution and control effects of aerial spraying using unmanned aerial vehicle (UAV) against the corn borer [J]. *Plant Protection*, 2013, 39(2): 152-157 (in Chinese)
- [18] 秦维彩,薛新宇,周立新,张宋超,孙竹,孔伟,王宝坤. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 50-56  
Qin W C, Xue X Y, Zhou L X, Zhang S C, Sun Z, Kong W, Wang B K. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5): 50-56 (in Chinese)
- [19] 张京,何雄奎,宋坚利,曾爱军,刘亚佳,李学锋. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 94-96  
Zhang J, He X K, Song J L, Zeng A J, Liu Y J, Li X F. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(6): 94-96 (in Chinese)
- [20] 茹煜,周宏平,贾志成,吴小伟. 航空静电喷雾系统的设计及应用[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2011, 35(1): 91-94  
Ru Y, Zhou H P, Jia Z C, Wu X W. Design and application of electrostatic spraying system [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2011, 35(1): 91-94 (in Chinese)
- [21] ASAE S341. 3 FEB04—Procedure for measuring distribution uniformity and calibrating granular broadcast spreaders [S]. USA: American Society of Agricultural and Biological, 2004

责任编辑:刘迎春