

张龙, 宋淑然, 孙道宗, 等. 农用喷头雾滴粒径对液体黏度的响应 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(2): 102-109.
ZHANG Long, SONG Shuran, SUN Daozong, et al. Response of droplet diameter of agricultural spray nozzle to liquid viscosity[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(2): 102-109.

农用喷头雾滴粒径对液体黏度的响应

张 龙¹, 宋淑然^{1,2,3,4}, 孙道宗^{1,3,4}, 薛秀云^{1,2,4}, 代秋芳^{1,2,4}, 李 震^{1,2,3,4}

(1 华南农业大学 电子工程学院/人工智能学院, 广东 广州 510642; 2 国家柑橘产业技术体系机械化研究室, 广东 广州 510642; 3 广东省农情信息监测工程技术研究中心, 广东 广州 510642; 4 广东省山地果园机械创新工程技术研究中心, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】研究农药不同黏度对喷头雾化特性的影响, 为农业喷雾施药技术提供理论参考。【方法】配制不同质量分数的甘油溶液替代农药试剂进行研究, 将喷头喷雾区域网格化, 使用粒子动态分析仪测量喷雾区域不同位置处的雾滴参数, 利用 SPSS 分析轴心方向和径向雾滴粒径的分布规律。【结果】在喷头喷雾区域轴心方向上, 雾滴算术平均直径、雾滴体积平均直径及雾滴索尔特平均直径呈现出先变小然后逐渐变大的规律, 外界空气阻力的扰动作用使喷射出的液体表面形成一定模式的表面波, 随着距离增大波幅变大, 波峰被撕裂下来, 破碎成小雾滴, 而后在重力的作用下雾滴间发生碰撞聚合, 雾滴粒径逐渐变大; 喷头喷雾区域径向上, 雾滴近似于对称分布, 雾滴粒径呈现出中间小两边大的特点, 随着径向距离增大雾滴粒径逐渐增大; 通过 SPSS 分析得出, 轴心方向上, 轴心距离、液体黏度与雾滴粒径的相关系数分别为 0.531、0.795; 在喷雾区域径向上, 径向距离、液体黏度与雾滴粒径的相关系数分别为 0.932、0.328。【结论】在一定程度上, 黏度较大的液体具有一定的防止漂移效果; 液体黏度改变对轴心方向上雾滴粒径影响效果显著; 在喷头径向上, 距离的改变对雾滴粒径大小影响显著。

关键词: 喷头; 液体黏度; 雾滴粒径; 多普勒动态粒子分析仪 (PDA); 谱分析; 喷雾
中图分类号: S491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)02-0102-08

Response of droplet diameter of agricultural spray nozzle to liquid viscosity

ZHANG Long¹, SONG Shuran^{1,2,3,4}, SUN Daozong^{1,3,4}, XUE Xiuyun^{1,2,4}, DAI Qiufang^{1,2,4}, LI Zhen^{1,2,3,4}

(1 College of Electronic Engineering/College of Artificial Intelligence, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou 510642, China; 3 Guangdong Engineering Research Center for Moinitoring Agricultural Information, Guangzhou 510642, China; 4 Guangdong Engineering Technology Research Center for Creative Mountainous Orchard Machinery, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To study the effect of different viscosities of pesticides on the atomization characteristics of spray nozzles, and provide a theoretical reference for agricultural pesticide spray technology. 【Method】Different mass fractions of glycerol solution were configured to replace pesticide reagents for

收稿日期: 2020-06-05 网络首发时间: 2020-08-26 15:14:19
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20200826.1409.002.html>
作者简介: 张 龙 (1993—), 男, 硕士研究生, E-mail: 545692102@qq.com; 通信作者: 宋淑然 (1965—), 女, 教授, 博士, E-mail: songshuran@scau.edu.cn
基金项目: 国家自然科学基金 (31671591); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项资金 (2020KJ108); 广东省农业厅 2018 年省级乡村振兴战略专项资金 (粤财农 [2018]125 号); 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-27)

research. The spray area of the spray nozzle was gridded, and the phase Doppler anemometry was used to measure droplet parameters at different positions in the spray area. The statistical law of droplet size in the axial direction and radial direction was analyzed using SPSS. 【Result】 In the axis direction of the spray area of the nozzle, arithmetic mean diameter, volume mean diameter, and Sauter mean diameter showed the law of first becoming smaller and then gradually increasing. The disturbance of the external air resistance made a certain pattern of surface waves on the surface of the ejected liquid. As the distance increased, the amplitude of the waves became larger, and the wave crests were torn off and broken into small droplets. Then under the action of gravity, the droplets collided and aggregated, and the droplet size gradually increased. In the radial direction of the spray area of the nozzle, the droplets were approximately symmetrically distributed, and the size of the droplets was small in the middle and large on the two sides. With the increase of the radial distance, the size of the droplets gradually increased. SPSS analysis showed that in the axial direction of the spray area the correlation coefficients of axial distance, liquid viscosity with droplet size were 0.531 and 0.795 respectively. In the radial direction the correlation coefficients of radial distance, liquid viscosity with droplet size were 0.932 and 0.328 respectively. 【Conclusion】 To a certain extent, liquids with greater viscosity have a certain effect of preventing drift. The changes in liquid viscosity have a significant effect on the droplet size in the axial direction. In the axial direction of the nozzle, changes in distance have a significant effect on the droplet size.

Key words: nozzle; liquid viscosity; droplet size; phase Doppler anemometry(PDA); spectrum analysis; spray

近年来, 随着我国农业生产的快速发展, 对农业机械化的需求大幅增加, 推进农机装备技术改进, 研发适合国情、农民需要、先进适用的各类智能农机装备迫在眉睫。在农机装备智能领域, 高效喷雾施药技术的一个主要标准是农药在靶标上的沉积率远高于其在非目标物或区域中的沉积率。这也是最大程度地提高农药有效利用率, 同时消除农药对操作人员的危害以及降低环境污染的一个重要途径^[1-3]。然而, 我国在农业生产中对农药的有效利用率只有 30% 左右, 流失量较高^[4-5]。

农药雾化是农药以雾滴的形式分散到大气中, 形成雾状分散体系的过程, 其实质是喷雾液滴在外力的作用下实现比表面积的大幅度扩增^[6-8]。将农药药液雾化为雾滴的过程依靠喷头来实现^[9]。农药雾化程度直接影响农药漂移距离及沉积有效利用率。喷雾雾滴粒径分布是农药雾化程度的主要检测指标^[10-11]。较大雾滴能够在较长时间内保持动量, 到达靶标时间短, 漂移较小, 但雾滴过大又容易造成药液覆盖率降低、靶标附着性差和药液流失^[12-14]。较小的雾滴由于其质量小, 受到空气阻力影响大, 通常会由于动量不足而无法到达靶标^[15], 但小雾滴有助于增大药液覆盖率、提升雾滴覆盖的均匀性和增大药液在作物冠层的穿透性^[16]。

无论采用何种喷雾方式, 植保机械的作业质量

与雾滴直径大小都有直接关系^[17]。如果选择的雾滴大小合适, 可以用最小的药量, 以最小的环境污染达到最大控制病虫害的目的。如果实际的雾滴比需要的雾滴大, 所浪费的农药就会以雾滴直径三次方的速率增长^[18]。张瑞瑞等^[19]利用不同类型及浓度助剂分析比较空气诱导喷头 IDK120-025 和多量程平面喷头 LU120-015 的雾滴体积中径 (Volume median diameter, VMD) 及雾滴粒径相对分布跨度, 结果表明不同类型及浓度的助剂对不同喷头效果不同, 应根据所用喷头选择合适的助剂及配比浓度, 降低农药雾滴漂移。王潇楠等^[20]利用不同浓度抗蒸发助剂 Agrospred 730、防漂移助剂 Break-thru Vibrant、Silwet DRS-60、Greenwet 360 分析比较了不同喷头雾滴漂移潜在指数, 结果表明添加助剂浓度不同, 雾滴体积中径不同, 喷头潜在漂移指数不同。何玲等^[21]利用不同表面张力的溶液分析了喷雾助剂对水稻冠层有效沉积率的影响。唐青等^[22]利用不同气流条件对比分析了标准扇形喷头和空气诱导喷头的雾化特性。赵辉等^[23]研究了不同喷雾液动态表面张力下, 雾滴粒径的变化, 结果表明动态表面张力改变对雾滴粒径的影响增大。

液体黏度影响喷头雾化性能^[24], 本文配制不同黏度的喷雾液, 研究喷雾液黏度对农用喷头的喷雾雾滴粒径的影响, 以期对农药喷施技术及机械性能的提高提供理论支撑与试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本文选择乳油、可湿性粉剂、悬浮剂和水分散粒剂 4 种常见剂型的农药作为研究对象, 具体为: 体积分数为 15% 的吡虫灵乳油、质量分数为 10% 的吡虫啉可湿性粉剂、质量浓度为 240 g/L 的螺螨酯悬浮剂和质量分数为 70% 的啶虫脒水分散粒剂。按照农药剂型的使用说明把 4 种农药分别配制

成溶液, 利用黏度计测试 4 种药液的黏度, 获得不同剂型农药在使用配比下药液的黏度范围。据此, 用水与甘油配制喷雾液代替农药进行大量的喷雾试验研究, 避免用农药进行试验造成环境污染。同时利用甘油与水配制出不同黏度的喷雾液进行对比试验。

试验喷头为东莞市沙鸥喷雾系统有限公司生产的实心锥喷头, 喷嘴直径为 0.8 mm。

1.2 试验仪器

试验所用的主要仪器有: 丹麦 DANTEC 公司生产的多普勒动态粒子分析仪 (Phase Doppler anemometry, 简称 PDA), 粒子测量范围为 1~10 000 μm, 测量误差为 1%; 上海方瑞仪器有限公司生产的 NDJ-8T 数字旋转黏度计, 测量范围为 1~2 000 cp, 测量误差为±1%, 重复误差为±0.5%, 仪器均满足相关参数测量要求。

试验环境温度对液体黏度的测试有一定程度的影响, 在液体黏度测试过程中, 环境温度是动态变化的。为此, 本文在每次试验前, 均多次测量环境温度, 并使用 NDJ-8T 型数字旋转黏度计多次对同一个样品进行黏度测试, 保证测量结果的稳定性和可信性。

1.3 雾滴参数定义

本文主要对雾滴的 3 个指标参数进行了测量

和分析, 它们分别是:

算术平均直径 (Arithmetic mean diameter, D_{10}): 指取样雾滴群的直径之和与雾滴群个数之和的比值,

$$D_{10} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i;$$

(1)

体积平均直径 (Volume mean diameter, D_{30}): 指取样雾滴群平均体积所对应的直径,

$$D_{30} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^3 \right]^{\frac{1}{3}};$$

(2)

索尔特平均直径 (Sauter mean diameter, D_{32}): 表明雾滴粒径对表面积的加权平均,

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^2};$$

(3)

在上述雾滴参数描述中, D_i 是指雾滴尺寸等级 i 的直径, N_i 是指选择的雾滴尺寸等级 i 的个数, n_i 是指每个尺寸等级中的雾滴数, N 是雾滴总数。

1.4 试验设计

液体的黏度和温度有极密切的关系, 通常温度升高, 黏度降低。本文测试液体黏度是在环境温度为 (25±0.5) °C 的前提下进行的。

1.4.1 4 种常用于防治木虱的农药黏度范围测试 为了揭示农药黏度对喷头雾滴参数的影响, 根据农药使用说明的配比要求, 配制了 4 种柑橘病虫害防治中常用的农药溶液, 利用黏度计分别测量其黏度值, 每隔 2 min 读取 1 次黏度值, 共读取 3 次, 取平均值作为最终黏度值, 结果如表 1 所示。4 种农药溶液黏度的平均最小值为 1.25 cp, 平均最大值为 1.80 cp。

表 1 4 种常见农药的黏度
Table 1 Viscosities of four common pesticides

农药类型 Pesticide type	配比 Proportion	测试黏度/cp Test viscosity			
		第1次 The 1st time	第2次 The 2nd time	第3次 The 3rd time	平均值 Average
螺螨酯 Spirodiclofen	1 : 4 000	1.69	1.61	1.62	1.64
吡虫灵 Pyridaben	1 : 2 200	1.81	1.80	1.80	1.80
啶虫脒 Acetamiprid	1 : 25 000	1.26	1.24	1.24	1.25
吡虫啉 Imidacloprid	1 : 3 400	1.49	1.50	1.51	1.50

1.4.2 替代试剂不同黏度甘油的配置 由于甘油与水能够以任意比例互溶, 且纯甘油黏度较大, 本文采用纯甘油与水以一定的比例混合, 配制 4 种不同质量分数的甘油溶液, 结果如表 2 所示。随着甘

油质量分数的增大, 溶液的黏度也逐渐变大, 黏度范围能够涵盖常用的农药溶液黏度。

1.4.3 雾滴参数的采样点设定 喷雾液黏度对喷头雾化性能的影响试验包括: 不同喷雾液黏度下对

表 2 不同质量分数甘油溶液的黏度

Table 2 Viscosities of different mass fractions of glycerin solution

序号 Number	w(甘油)/% Glycerin mass fraction	测试黏度/cp Test viscosity			
		第1次 The 1st time	第2次 The 2nd time	第3次 The 3rd time	平均值 Average
1	0	1.10	1.11	1.11	1.10
2	12.5	1.29	1.31	1.30	1.30
3	22.5	1.62	1.63	1.63	1.63
4	32.5	2.18	2.20	2.19	2.19
5	42.5	2.99	2.98	3.00	2.99

喷头轴心线方向上雾滴参数的测定, 以及不同喷雾液黏度下对喷头径向 (轴心方向高度一定时) 雾滴参数的测定。喷雾试验时, 喷头轴心方向垂直地面, 喷雾压力为 0.9 MPa。

前期试验中, 为了能够设置合适的喷头喷雾区域采样点, 在喷雾压力为 1.0 MPa 条件下, 测量了喷头的雾锥角, 结果为 44.14°, 由此, 利用预试验测得的雾锥角正切值的结果, 可以确定喷雾区域的边界位置, 从而确定雾滴采样点的范围。

轴心方向上雾滴采样点设定: 为研究不同黏度对喷头轴心方向上雾滴粒径的影响, 建立以喷头处为原点、水平向左方向为 x 、垂直向里方向为 y 、垂直向下方向为 z 的笛卡尔坐标系, 在喷头雾化区域轴心方向上, 从喷头 $z=0$ cm 处开始, 每隔 2 cm 利用 PDA 分别测量轴心方向上雾滴参数。

径向雾滴采样点设定: 为研究黏度对喷头径向雾滴粒径的影响, 在轴心方向上分别选取 $z=30$ cm, $z=40$ cm 处的水平面, 测量所对应径向上的雾滴粒径; 在 $z=30$ cm 处 x 选取 $-8\sim 8$ cm 之间; 在 $z=40$ cm 处, x 选取 $-10\sim 10$ cm 之间, 其中径向 (x 方向) 采样点间隔均为 1 cm, 利用 PDA 分别测量每个采样点上的雾滴参数。

1.4.4 数据处理 运用统计分析软件 SPSS16.0 对轴心距离、液体黏度以及雾滴粒径的相关性进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 轴心方向上雾滴粒径分布特性

从喷头开始, 每隔 2 cm, 测量喷头轴心方向上的雾滴参数, 结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 在轴心方向上距离喷头 1~6 cm 的区间内, 雾滴粒径变小趋势明显, 分析原因可能是: 在一定的压力下, 射流以连续液体的形式从喷头高速流出, 受到外界气体的扰动作用, 液体表面会产生不稳定的波动, 当液体流速较大时, 液体表面的波幅将快速变大, 最终波峰被撕裂下来, 形成较大雾滴。随着射出距离变大, 这种表面波的波幅

将逐渐扩大, 使液体分裂成大颗粒液滴, 液滴直径超过了一定的阈值, 在周围空气切应力的作用下, 它们将进一步碎裂成更细小的液滴, 故在距离喷头 1~6 cm 的区间内呈现出变小的趋势。

Rayleigh 理论导出了形成黏性射流最大不稳定性的比值, 即有一个最小的扰动波长($\lambda_{\min}$)和最有可能导致射流破裂成为液滴的扰动波长(λ_{opt}), 喷头出口附近的初始扰动波长小于 $\lambda_{\min}$ 时, 受表面张力作用, 射流的扰动渐缓; 当初始扰动波长大于 $\lambda_{\min}$ 时, 扰动波振幅增大, 并最终导致射流破裂, 对于非黏性流体^[25]

$$\lambda_{\min} = \pi d, \tag{4}$$

$$\lambda_{\text{opt}} = \sqrt{2}\pi d, \tag{5}$$

对于黏性流体

$$\lambda_{\min} = \pi d, \tag{6}$$

$$\lambda_{\text{opt}} = \sqrt{2}\pi d \left(1 + \frac{3u_1}{\sqrt{\rho_1\sigma_1d}} \right)^{1/2}, \tag{7}$$

式中: u_1 为液体的黏度, ρ_1 为液体的密度, σ_1 为液体的表面张力, d 为射流直径。由此可见, 黏性流体的 $\lambda_{\min}$ 与非黏性流体相同, 但其 λ_{opt} 却比非黏性流体大得多。

试验表明, 在相同的喷雾条件下, 对于不同黏度的喷雾液, 液体密度 ρ_1 、液体表面张力 σ_1 、射流直径 d 变化不大, 影响扰动波长 λ_{opt} 变化的主要因素在于喷雾液的黏度, 即喷雾液黏度越大, 越有可能导致射流破裂成为液滴的扰动波长 λ_{opt} 也越大, 亦需要更多的能量才能完成从射流破碎成雾滴的过程。由表 3 可以发现, 喷雾液黏度越大, 相同位置处雾滴粒径随着喷雾液黏度的增加而变大, 其原因可能是: 喷雾液黏度越大, 喷雾液越难以发生雾化, 相同喷射压力下, 雾化黏度大的喷雾液需要更多的能量, 因此导致黏度较大的喷雾液, 雾滴碎裂不够细小, 最终形成颗粒较大的液滴。

在轴心方向上距离喷头 8~40 cm 的区间内, 不同轴心距离下的雾滴粒径呈现出从近喷头处到远

表 3 不同黏度下轴心方向上雾滴参数¹⁾

Table 3 Droplet parameters in the axis direction under different viscosities

μm

轴心距离/cm	1.10 cp			1.30 cp			1.63 cp			2.19 cp			2.99 cp		
Axis distance	D ₁₀	D ₃₀	D ₃₂	D ₁₀	D ₃₀	D ₃₂	D ₁₀	D ₃₀	D ₃₂	D ₁₀	D ₃₀	D ₃₂	D ₁₀	D ₃₀	D ₃₂
2	147.5	173.3	193.9	91.3	117.8	141.5	96.2	123.7	152.1	41.7	68.4	43.6	54.6	88.5	143.7
4	34.0	71.7	141.0	30.6	46.3	74.0	36.1	68.2	121.1	39.5	41.5	47.8	45.5	49.7	52.9
6	27.6	28.3	29.9	29.7	36.2	47.7	30.7	47.5	80.0	43.3	45.6	51.8	53.0	58.3	63.1
8	31.5	33.6	35.8	33.2	35.8	38.0	30.8	35.2	39.1	47.9	50.0	54.3	55.1	61.3	67.2
10	33.7	35.6	38.2	34.9	38.0	41.1	35.7	38.2	43.1	49.6	52.1	59.1	62.4	68.3	75.7
12	34.2	37.2	40.8	36.7	40.2	43.9	37.7	40.8	46.2	54.2	56.2	62.4	65.8	72.6	80.2
14	35.1	38.4	42.3	37.9	42.4	46.3	38.4	41.1	46.4	55.5	58.4	66.6	68.3	75.5	82.1
16	36.7	40.1	44.5	39.1	43.9	48.6	39.8	43.6	51.2	58.8	63.0	70.8	70.6	76.8	84.5
18	37.5	42.6	46.2	40.5	45.7	51.1	40.4	45.6	52.8	62.0	65.9	76.4	73.4	82.2	91.3
20	38.4	43.9	48.7	41.5	46.7	53.6	42.1	48.2	56.0	64.7	69.6	80.7	74.3	82.2	90.3
22	40.0	45.1	52.0	43.5	49.1	55.9	43.6	51.8	60.2	66.6	73.8	81.0	79.3	88.1	96.9
24	40.1	46.7	53.2	44.2	50.8	59.0	45.0	52.1	60.5	66.1	73.0	88.7	81.3	90.0	98.9
26	41.6	47.6	55.2	45.4	53.6	61.9	46.9	55.0	65.8	70.8	79.8	102.4	84.6	94.7	105.5
28	42.3	49.5	57.4	47.5	55.6	65.0	47.8	57.0	68.5	78.8	90.3	99.4	86.3	96.6	107.4
30	43.3	51.5	61.2	47.5	56.6	65.5	47.8	59.4	72.4	74.9	85.9	101.1	86.9	98.8	113.2
32	44.9	52.5	61.5	48.6	58.0	68.7	49.8	62.4	76.1	75.8	87.1	112.6	82.6	97.7	114.5
34	44.5	53.2	63.6	49.8	60.6	72.0	50.9	64.3	79.0	82.5	97.0	112.9	87.5	100.4	115.3
36	46.2	55.4	65.8	51.7	63.1	75	52.9	67.3	83.3	75.9	88.4	103.1	90.6	104.3	120.7
38	47.2	57.8	69.6	53.7	65.6	80.1	54.6	69.1	86.6	79.7	93.8	111.2	91.8	106.5	123.7
40	49.7	61.2	75.2	54.8	66.9	81.3	54.9	70.8	87.7	84.3	97.8	114.4	92.0	107.6	118.6

1) D₁₀: 算术平均直径; D₃₀: 体积平均直径; D₃₂: 索尔特平均直径

1) D₁₀: Arithmetic mean diameter; D₃₀: Volume mean diameter; D₃₂: Sauter mean diameter

喷头处逐渐变大的规律，其原因可能是：在喷头的轴心方向上，作用于雾滴的力主要是重力和空气阻力，当雾滴受到重力影响时，会加速下降，雾滴发生聚合碰撞，使雾滴粒径逐渐变大，形成了大雾滴。

2.2 轴心雾滴粒径的统计分析

为了明确轴心距离、液体黏度与雾滴粒径之间的内在联系，更好地揭示影响雾滴粒径分布规律的主要原因，本文运用统计分析软件 SPSS 对轴心距离、液体黏度以及雾滴粒径进行相关性统计分析。

通过判断 2 个数据集是否在一条直线上来推断 2 个数据集的线性相关性，其计算公式为：

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}, \quad (8)$$

式中，N 为 2 个数据集样本个数， x_i 表示 x 数据集中某一样本 (i) 的样本值， y_i 表示 y 数据集中样本 i 的样本值，r 值反映了 2 个变量线性相关性的强弱程度，r 值越大说明两者相关性越强，据此，利用软件做出了液体黏度、轴心距离与雾滴粒径三者之间的 Pearson 相关系数 (表 4)。

从表 4 可以看出，当轴心距离为 4~40 cm 时，也就是采用样本为 4~40 cm 区间内雾滴粒径数据，其轴心距离、液体黏度与雾滴粒径的 Pearson 相关系数 (r) 分别为 0.531、0.795，可见液体黏度与雾滴粒径之间的相关性更强，接近于极强相关，显著性值较高 (当显著性值小于 0.05 时认为显著)，据此可得出，在距离喷嘴 4~40 cm 区间内，雾滴粒径的大小受到液体黏度的影响较大，同时轴心距离也是影响雾滴粒径变化的主要因素；当轴心距离为 0~40 cm 时，其轴心距离、液体黏度与雾滴粒径的 Pearson 相关系数分别为 0.287、0.586，可见当计算范围包含 0~4 cm 区间时，液体黏度与雾滴粒径大小的相关性为中等程度相关，而轴心距离与雾滴粒径大小的相关性为弱相关，这说明雾滴粒径在区间 0~4 cm 与区间 4~40 cm 内变化趋势不统一，故而三者之间的相关性有所降低，结合表 3 不难发现，在雾滴粒径为 0~4 cm 区间内，喷雾液由喷嘴喷出后，在切应力的作用下撕裂成液膜，大雾滴变为小雾滴，这刚好与雾滴在 4~40 cm 区间内的变化相反，因此相关性有所降低。

综合考虑可以发现，雾滴从喷嘴喷出后液体黏

表 4 轴心雾滴粒径的 Pearson 相关分析

Table 4 Pearson correlation analysis of axial droplet size

控制变量 Control variable	参数 Parameter	项目 Item	轴心距离为4~40 cm			轴心距离为0~40 cm		
			Axis distance of 4~40 cm			Axis distance of 0~40 cm		
			轴心距离	液体黏度	雾滴粒径	轴心距离	液体黏度	雾滴粒径
			Axis distance	Liquid viscosity	Droplet size	Axis distance	Liquid viscosity	Droplet size
无 None	轴心距离 Axis distance	相关系数(r) ¹⁾	1.000	0.000	0.531	1.000	0.000	0.287
		显著性(双侧)		1.000	0.000		1.000	0.004
		Significance (bilateral)						
	液体黏度 Liquid viscosity	df	0	93	93	0	98	98
		相关系数(r) ¹⁾	0.000	1.000	0.795	0.000	1.000	0.586
		显著性(双侧)	1.000		0.000	1.000		0.000
		Significance (bilateral)						
	雾滴粒径 Droplet size	df	93	0	93	98	0	98
		相关系数(r) ¹⁾	0.531	0.795	1.000	0.287	0.586	1.000
雾滴粒径 Droplet size	轴心距离 Axis distance	Correlation coefficient						
		显著性(双侧)	0.000	0.000		0.004	0.000	
		Significance (bilateral)						
	液体黏度 Liquid viscosity	df	93	93	0	98	98	0
		相关系数(r) ¹⁾	1.000	−0.821		1.000	−0.217	
		显著性(双侧)		0.000			0.031	
		Significance (bilateral)						
	雾滴粒径 Droplet size	df	0	93		0	97	
		相关系数(r) ¹⁾	−0.821	1.000		−0.217	1.000	
		显著性(双侧)	0.000			0.031		
		Significance (bilateral)						
	雾滴粒径 Droplet size	df	92	0		97	0	

1) $1.0 \geq r > 0.8$ 表示极强相关, $0.8 \geq r > 0.6$ 表示强相关, $0.6 \geq r > 0.4$ 表示中等程度相关, $0.4 \geq r > 0.2$ 表示弱相关, $0.2 \geq r \geq 0$ 表示无相关

1) $1.0 \geq r > 0.8$ indicates very strong correlation, $0.8 \geq r > 0.6$ indicates strong correlation, $0.6 \geq r > 0.4$ indicates moderate correlation, $0.4 \geq r > 0.2$ indicates weak correlation, $0.2 \geq r \geq 0$ indicates no correlation

度对雾滴粒径的影响大于轴心距离对雾滴粒径的影响。

2.3 径向雾滴粒径分布

为了了解不同喷雾液黏度对喷头径向雾滴参数的影响 (为便于分析, 取 $z=30$ cm 处分析), 绘制出如图 1 所示的雾滴体积平均直径 D_{30} 随径向距离变化三维图。

由图 1 可以看出, 在相同喷雾液黏度下, 雾滴粒径随着径向距离增大而增大, 轴心位置始终保持着最小的雾滴粒径, 径向左右两边雾滴粒径近似于对称分布; 不同喷雾液黏度下, 液体黏度越大, 相同位置雾滴体积平均直径越大。

奥内佐格的研究表明, 射流破碎后的液滴尺寸主要取决于喷口直径、液体的密度、黏性力和表面

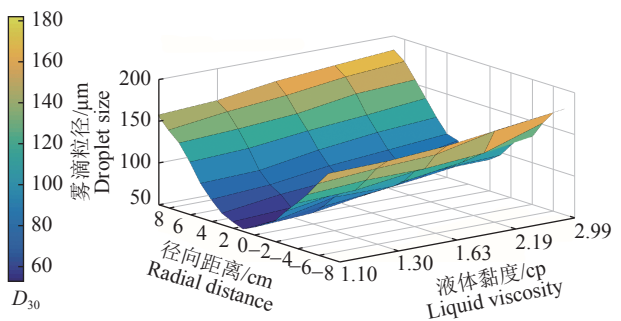


图 1 $z=30$ cm 处径向雾滴体积平均直径 (D_{30}) 变化

Fig. 1 Change of radial droplet D_{30} at $z=30$ cm

张力, 并且整理出了无因次准数 Z 来进行描述, Z 为射流破碎后的雾滴大小的无因次准数, 它与液体的

密度、黏性力和表面张力间存在一定的关系^[25], 如下式所示:

$$Z = \frac{u_1}{\sqrt{\rho_1 \sigma_1 d_0}}, \tag{9}$$

式中: u_1 表示液体黏度, ρ_1 表示液体密度, σ_1 表示表面张力, d_0 表示射流起始直径。

在相同试验条件下, 对于不同黏度的喷雾液, 其液体密度、表面张力、射流直径变化不大, 故液体

的黏度是雾化过程中液体破碎的主要因素, 黏性在射流表面扰动波增长的过程中起阻尼作用, 黏性越小阻力越小, Z 越小, 故雾滴粒径越小。

2.4 径向雾滴粒径的统计分析

为了更好地阐释雾滴粒径在径向上的分布规律, 明确雾滴粒径在径向上与径向距离、液体黏度之间的内在制约因素, 对径向距离、雾滴粒径以及液体黏度之间进行了 Pearson 相关分析, 结果如表 5 所示。

表 5 径向雾滴粒径的 Pearson 相关分析¹⁾
Table 5 Pearson correlation analysis of radial droplet size

控制变量	参数	项目	径向距离	液体黏度	雾滴粒径
Control variable	Parameter	Item	Radial distance	Liquid viscosity	Droplet size
无 None	径向距离 Radial distance	相关系数(r) ¹⁾ Correlation coefficient	1.000	0.000	0.932
		显著性(双侧) Significance (bilateral)		1.000	0.000
		df	0	53	53
	液体黏度 Liquid viscosity	相关系数(r) ¹⁾ Correlation coefficient	0.000	1.000	0.328
		显著性(双侧) Significance (bilateral)	1.000		0.014
		df	53	0	53
雾滴粒径 Droplet size	雾滴粒径 Droplet size	相关系数(r) ¹⁾ Correlation coefficient	0.932	0.328	1.000
		显著性(双侧) Significance (bilateral)	0.000	0.014	
		df	53	53	0
	径向距离 Radial distance	相关系数(r) ¹⁾ Correlation coefficient	1.000	-0.893	
		显著性(双侧) Significance (bilateral)		0.000	
		df	0	52	
	液体黏度 Liquid viscosity	相关系数(r) ¹⁾ Correlation coefficient	-0.893	1.000	
		显著性(双侧) Significance (bilateral)	0.000		
		df	52	0	

1)1.0≥r>0.8表示极强相关, 0.8≥r>0.6表示强相关, 0.6≥r>0.4表示中等程度相关, 0.4≥r>0.2表示弱相关, 0.2≥r≥0表示无相关

1)1.0≥r>0.8 indicates very strong correlation, 0.8≥r>0.6 indicates strong correlation, 0.6≥r>0.4 indicates moderate correlation, 0.4≥r>0.2 indicates weak correlation, 0.2≥r≥0 indicates no correlation

由表 5 可以看出, 在径向上, 雾滴粒径与径向距离的相关系数为 0.932, 具有极强相关性, 且显著性值为 0.000, 小于 0.05, 故认为雾滴粒径与径向距离之间显著性高; 雾滴粒径与液体黏度的相关系数为 0.328, 表现为弱相关, 且显著性值为 0.014, 小于 0.05, 则认为雾滴粒径与液体黏度之间联系较径向距离弱。

由表 4 和表 5 可以发现, 在喷头喷雾区域中, 在轴心方向上雾滴粒径分布受液体黏度影响较大, 二者相关系数为 0.795, 同时, 在轴心方向上, 雾滴粒径也会受到轴心距离的影响, 相关系数为 0.531, 较液体黏度影响相对较弱; 在喷头径向上, 雾滴粒径与径向距离相关系数为 0.932, 表现出极强相关性, 意味着径向位置不同时, 雾滴粒径变化明显, 由

图 1 可以看出, 当径向位置变大时, 雾滴粒径增加明显; 在径向上, 雾滴粒径与液体黏度相关系数为 0.328, 表现为弱相关性。

3 结论

本文研究了不同喷雾液黏度下, 喷头的喷雾区域中垂直 (轴心) 与水平 (径向) 方向上喷雾雾滴粒径变化规律, 得出以下结论:

- 1) 喷雾液黏度越大, 喷头所喷出雾滴的粒径也越大。随着黏度的增大, 轴心方向上的雾滴粒径先变大后变小, 喷雾液黏度越大, 雾滴越难以雾化; 在径向上, 喷雾区域的边界处雾滴粒径大于内部雾滴粒径;
- 2) 根据 Pearson 相关分析得出, 轴心方向上, 雾滴粒径的大小分布受液体黏度影响较大, 相关系数

为 0.795; 而在径向上, 雾滴粒径大小分布受到径向距离影响较大, 相关系数为 0.932;

3) 试验分析得出添加不同浓度的甘油溶液均可对雾滴粒径产生较大影响, 因此应根据喷施的实际情况选择合适的浓度配比, 适当提高喷雾液黏度, 有助于达到降低农药雾滴漂移、增加雾滴穿透性的目的。

参考文献:

[1] 许晏铭, 刘建河, 李星光. 液体物性对静电喷雾雾化性能的研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 45(7): 793-798.

[2] MANSOUR A, CHIGIER N. Air-blast atomization of non-Newtonian liquids[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1995, 58(2): 161-194.

[3] DAI X, XU Y, ZHENG J, et al. Analysis of the variability of pesticide concentration downstream of inline mixers for direct nozzle injection systems[J]. Biosystems Engineering, 2019, 180(13): 59-69.

[4] 范力更. 我国植保机械和施药技术的现状、问题及对策[J]. 农业开发与装备, 2018, 8(2): 15-21.

[5] 任少伟, 杨传民, 陈国营, 等. 大豆蛋白液喷雾场粒度分布变化[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 46-52.

[6] 吴亚垒, 祁力钧, 张亚, 等. 基于驻波与 ZigBee 实时监测雾滴蒸发系统设计 with 试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 128-135.

[7] 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.

[8] 王沛, 祁力钧, 李慧, 等. 植物叶片表面结构对雾滴沉积的影响分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 75-79.

[9] 兰玉彬, 张海艳, 文晟, 等. 静电喷嘴雾化特性与沉积效果试验分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 130-139.

[10] 张慧春, GARY D, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 53-57.

[11] 张京, 宋坚利, 何雄奎, 等. 扇形雾喷头雾化过程中雾滴运动特性[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 66-69.

[12] 张慧春, 郑加强, 周宏平, 等. 农药喷施过程中雾滴沉积分布与脱靶飘移研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 114-122.

[13] AUNG N Z, YANG Q, CHEN M, et al. CFD analysis of flow forces and energy loss characteristics in a flapper-nozzle pilot valve with different null clearances[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 83(45): 284-295.

[14] DE DOMENICO F, ROLLAND E O, HOCHGREB S. A generalised model for acoustic and entropic transfer function of nozzles with losses[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 440(43): 212-230.

[15] 文晟, 兰玉彬, 张建桃, 等. 农用无人机超低容量旋流喷嘴的雾化特性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 85-93.

[16] 王果, 龚燕, 张晓, 等. 不同施药机具在玉米田间的雾滴沉积分布试验[J]. 农机化研究, 2017(6): 177-182.

[17] 朱增强, 王冉冉. 烟雾机喷嘴雾化仿真研究[J]. 装备制造技术, 2018(7): 51-54.

[18] 祁力钧, 傅泽田. 不同条件下喷雾分布试验研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 113-117.

[19] 张瑞瑞, 张真, 徐刚, 等. 喷雾助剂类型及浓度对喷头雾化效果影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 36-43.

[20] 王潇楠, 何雄奎, 宋坚利, 等. 助剂类型及浓度对不同喷头雾滴飘移的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 49-55.

[21] 何玲, 王国宾, 胡韬, 等. 喷雾助剂及施液量对植保无人机喷雾雾滴在水稻冠层沉积分布的影响[J]. 植物保护学报, 2017, 44(6): 1046-1052.

[22] 唐青, 陈立平, 张瑞瑞, 等. 高速气流条件下标准扇形喷头和空气诱导喷头雾化特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 121-128.

[23] 赵辉, 宋坚利, 曾爱军, 等. 喷雾液动态表面张力与雾滴粒径关系[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 74-79.

[24] 肖丽萍, 刘木华, ZHU HEPING, 等. 喷嘴喷施不同生物农药雾滴特性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 100-106.

[25] LEE C H, REITZ R D. An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(2): 229-244.

【责任编辑 李晓卉】