

茶树叶片表面喷雾液滴斜撞击行为研究

刘冬梅^{1,2} 周宏平¹ 郑加强¹ 茹煜¹

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 金华职业技术学院机电工程学院, 金华 321017)

摘要: 在喷雾场景中, 茶树叶片具有不同倾斜方向, 且会受到不同方向喷雾液滴的撞击。为掌握液滴斜撞击茶树叶片时的撞击行为及影响机理, 提出了利用椭圆铺展面积来衡量斜撞击时液滴的铺展变化, 并推导出包含叶片倾角和撞击角的斜撞击液滴铺展及反弹数学预测模型。为验证理论准确性, 利用两台高速摄像机对喷雾液滴撞击茶树叶片的撞击过程及结果进行测试和分析。研究表明, 撞击角、初始直径、撞击速度对粘附液滴的铺展面积影响由大到小为撞击速度、初始直径、撞击角, 其中初始直径及撞击速度对液滴铺展面积有显著性影响, 且是极强正相关。对于细、中液滴, 撞击角对铺展面积无显著性影响; 对于粗大液滴, 撞击角有显著性影响, 建议采用 90° 撞击角。茶树叶片表面具有亲水性, 水滴撞击叶片表面时无反弹行为, 此结果与反弹预测模型结果吻合。对液滴飞溅的影响程度由大到小为初始直径、撞击速度、撞击角。初始直径及撞击速度对液滴飞溅有显著性影响, 液滴初始直径和撞击速度越大, 越容易发生飞溅, 撞击角对液滴飞溅无显著性影响。因茶树叶片表面比较光滑, 无长绒毛, 表面粗糙度较小, 飞溅临界值 K_{crit} 采用 108.4 较合适。

关键词: 喷雾; 液滴; 茶树叶片; 撞击行为; 铺展面积; 反弹预测模型

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)05-0096-08

Oblique Impact Behavior of Spray Droplets on Tea Tree Leaves Surface

LIU Dongmei^{1,2} ZHOU Hongping¹ ZHENG Jiaqiang¹ RU Yu¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Jinhua Polytechnic, Jinhua 321017, China)

Abstract: In the spray scene, the tea tree leaves have different tilt directions which are subjected to impact by different directions of spray droplets. In order to grasp the impact behavior and influence mechanism of the droplet impact on the tea tree leaves, the elliptical spreading area was used to measure the spreading variation of the droplet during the oblique impact, and a new type of oblique impact droplet spreading and rebound mathematical prediction model, including blade inclination angle and impact angle was derived. In order to verify the theoretical accuracy, two high-speed cameras were used to test and analyze the impact process and results of spray droplets striking tea leaves. The results showed that the impact angle, initial diameter and impact velocity on the spreading area of the adherent droplets were the impact velocity, initial diameter and impact angle. The initial diameter and impact velocity had a significant effect on the droplet spread area, and were highly positively correlated. For fine and medium droplets, the impact angle had no significant effect on the spreading area; for coarse droplets, the impact angle had a significant effect, and 90° impact angle was recommended. The surface of the tea tree leaves was hydrophilic, and there was no rebound behavior when the water droplets hit the surface of the leaf. The result was consistent with the rebound prediction model. The degree of influence on the droplet splatter was the initial diameter, the impact velocity, and the impact angle. The initial diameter and impact velocity had a significant effect on droplet splatter. The larger the initial diameter and impact velocity of the droplet were, the more likely it was to splash. The impact angle had no significant effect on droplet splatter. Because the surface of tea leaves was relatively smooth, no long fluff, and the surface roughness was small, the splash threshold K_{crit} was suitable to be 108.4.

Key words: spray; droplet; tea tree leaves; impact behavior; spreading areas; rebound prediction model

收稿日期: 2019-03-21 修回日期: 2019-04-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0600202)

作者简介: 刘冬梅(1983—),女,博士生,金华职业技术学院讲师,主要从事植保机械及技术研究, E-mail: ldm123ldm@126.com

通信作者: 周宏平(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事植保机械装备与技术研究, E-mail: hpzhou@njfu.edu.cn

0 引言

在农林病虫害喷雾施药中,为提高农药生物功效和减少环境污染,希望喷雾液滴尽可能多的持留在叶片表面。当喷雾液滴撞击植物叶片后,将产生粘附、破碎、反弹和飞溅等状态,其中,反弹和飞溅产生的二次液滴存在飘移及沉积到非靶标区域的风险^[1]。叶片表面的喷雾沉积量是由每个液滴最终结果即粘附、反弹、飞溅、再分配等决定^[2],因此,深入研究喷雾液滴在叶片表面撞击行为的内在机理,对提高农药喷雾效率,减小环境污染和减少经济损失具有重要意义。

在喷雾场景中,植物叶片具有不同的倾斜方向,且会受到不同方向喷雾液滴的撞击^[3]。对于液滴在植物叶片上的撞击行为,学者进行了大量的研究工作^[4-7]。通过数值模拟和试验研究发现液滴在不同润湿性叶片上的撞击行为不同,在易湿叶片表面上主要有粘附和飞溅,对难湿叶片表面的撞击主要有粘附、弹跳和飞溅^[4,8-12]。液滴在叶片上的撞击及运动行为与液滴的运动参数、靶标性质、农药配方和空气惯性等多个因素有关^[13-19]。理论研究上根据能量平衡及半经验公式建立了液滴在靶标叶片上最大扩展直径、反弹和飞溅数学模型^[20-27]。

目前,液滴在植物叶片上撞击行为的研究多集中在水平叶片的正常撞击^[4-10],对于斜撞击研究较少,少量研究主要集中在修正斜撞击时液滴反弹和飞溅准则^[3,27]。对于斜撞击时液滴的铺展研究,部分文献利用水平叶片斜撞击来等同倾斜叶片的撞击铺展,或是在倾斜叶片上液滴铺展形状为椭圆时,理论上仍沿用液滴最大铺展直径来比较铺展大小,上述两种情况都忽略了椭圆短轴的动态变化,单纯考虑椭圆最大铺展直径已不能反映真实的铺展变化。基于此,本文在前人基础上,提出利用椭圆的铺展面积来衡量斜撞击时液滴的铺展变化,同时通过理论推导和试验分析,研究斜撞击时液滴的撞击行为及变化规律。在喷雾施药中,绝大部分液滴都是撞击在干燥的叶片表面^[3],本文以干燥茶树叶片为载体,对液滴在倾斜叶片上的撞击规律进行理论和试验研究,为茶园施药时喷施参数的优化提供依据,以提高我国茶树的喷雾效率。

1 数学模型

假设液滴在运动过程中能量保持守恒,因单个液滴体积小、质量轻,在数学模型中忽略液滴运动

过程中产生的势能^[20]。

1.1 倾斜叶片上液滴铺展面积数学模型

设液滴撞击叶片前瞬间为时间 a ,将此时液滴形状简化为球体,碰撞前瞬间液滴所具有的总冲击能为 E_a ,其包括动能 K_a 与表面能 S_a ^[20],计算公式为

$$E_a = K_a + S_a \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad K_a = \frac{1}{12} \rho \pi v^2 D^3 \quad (2)$$

$$S_a = S_{a,LV} = \pi D^2 \gamma_{LV} \quad (3)$$

式中 ρ ——液滴密度, kg/m³
 v ——液滴撞击前初始速度, m/s
 D ——撞击前液滴初始直径, m
 $S_{a,LV}$ —— a 时液滴与空气的表面能, J
 γ_{LV} ——液滴与空气的界面张力, N/m

设液滴最大铺展瞬间为时间 b ,假设液滴在倾斜叶面上铺展形状为椭圆柱体,液滴在最大扩展时椭圆长轴直径为 d_{\max} ,短轴直径为 d_{\min} 。引入无量纲参数 f ($0 < f \leq 1$),计算公式为

$$f = \frac{d_{\min}}{d_{\max}} = x(\beta) = y(\psi) \quad (4)$$

式中 β ——叶片与水平面倾角, ($^\circ$)
 ψ ——液滴运动方向与叶片的夹角, ($^\circ$)

当液滴到达最大铺展直径时,此时动能为零,液滴处于静止状态。最大铺展时液滴表面能为 S_b ,总冲击能为 E_b ,计算公式为

$$S_b = S_{b,LV} + S_{b,SL} - S_{b,SV} =$$

$$\left\{ \frac{1}{4} \pi f d_{\max}^2 (1 - \cos\theta) + \frac{2}{3} \frac{D^3}{d_{\max}} [(\pi - 2)f + 2] \right\} \gamma_{LV} \quad (5)$$

$$E_b = S_b \quad (6)$$

式中 $S_{b,LV}$ —— b 时液滴与空气表面能, J
 $S_{b,SL}$ ——固体与液体表面能, J
 $S_{b,SV}$ ——固体和空气表面能, J
 θ ——液滴在叶片的静态接触角, ($^\circ$)

根据从 a 到 b 阶段的能量守恒,得到

$$E_a = E_b + D_{a-b} \quad (7)$$

式中 D_{a-b} —— a 到 b 阶段粘性耗散能量, J

因粘性耗散主要与液滴粘度、固体表面性质有关,叶片倾斜度对粘性耗散影响可忽略不计,本文中 D_{a-b} 选用文献[20]水平叶面 D_{a-b} , 计算式为

$$\frac{D_{a-b}}{\pi D^2 \gamma_{LV}} = 0.2 \frac{We^{0.83}}{Re^{0.33}} \left(\frac{d_{\max}}{D} \right)^2 \quad (8)$$

式中 We ——液滴韦伯数
 Re ——液滴雷诺数

将式(3)、(6)、(8)代入式(7)得到液滴最大铺展系数 d_{\max}/D 的一元三次方程

$$\left[\frac{1}{4}(1 - \cos\theta)f + 0.2 \frac{We^{0.83}}{Re^{0.33}} \right] \left(\frac{d_{\max}}{D} \right)^3 - \left(1 + \frac{We}{12} \right) \frac{d_{\max}}{D} + \frac{2}{3\pi} [(\pi - 2)f + 2] = 0 \quad (9)$$

椭圆铺展面积 A 、韦伯数 We 、雷诺数 Re 计算式为

$$A = \frac{\pi d_{\max} d_{\min}}{4} = \frac{\pi d_{\max}^2 f}{4} \quad (10)$$

$$We = \frac{\rho v^2 D}{\sigma} \quad (11)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta_s} \quad (12)$$

式中 σ ——液滴表面张力, N/m

η_s ——液滴粘度, Pa·s

将式(10)~(12)代入式(9)得液滴在倾斜叶片上铺展面积 A 的求解方程

$$\left[\frac{2}{D^3 \sqrt{\pi^3 f}} (1 - \cos\theta) + 1.6 \frac{v^{1.33} \eta_s^{0.33} \sqrt{\rho}}{\sigma^{0.83} \sqrt{D^5 \pi^3 f^3}} \right] A^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{2}{D \sqrt{\pi f}} + \frac{(\rho v^2)^{0.83}}{6D^{1.7} \sigma^{0.83} \sqrt{\pi f}} \right) A^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3\pi} [(\pi - 2)f + 2] = 0 \quad (13)$$

1.2 倾斜叶片上液滴反弹数学预测模型

设液滴最大回缩瞬间为时间 c , 此时液滴能量为 E_c , 设液滴在弹跳瞬间 r 时具有的能量为 E_r , 当 $E_c > E_r$ 时, 多余能量使液滴恢复其球状和初始直径, 此时斜面上液滴尺寸和形状不再变化, 液滴瞬时静止, 开始反弹脱离叶片表面。在反弹前瞬间液滴是静止的, 此时液滴动能为零, 液滴总冲击能为 E_r , 表面能为 S_r ^[20], 计算公式为

$$S_r = S_{r,LV} = \pi D^2 \gamma_{LV} \quad (14)$$

$$E_r = S_r \quad (15)$$

式中 $S_{r,LV}$ —— r 时液滴与空气表面能, J

液滴反弹规则采用文献[20]提出的公式

$$E^* = \frac{E_c - E_r}{E_r} = \frac{E_b - D_{b-c} - E_r}{E_r} > 0 \quad (16)$$

式中 E^* ——相对剩余能量

D_{b-c} —— b 到 c 过程中消耗的能量, J

因叶片倾斜度对粘性耗散的影响可忽略, 文中 D_{b-c} 选用文献[20]水平叶面 D_{b-c} , 有

$$\frac{D_{b-c}}{E_r} = 0.12 \left(\frac{d_{\max}}{D} \right)^2 (1 - \cos\theta)^{0.63} \quad (17)$$

将式(6)、(15)、(17)代入式(16)得倾斜叶片上液滴反弹的预测模型

$$E^* = \frac{1}{4}(1 - \cos\theta)f \left(\frac{d_{\max}}{D} \right)^2 - 0.12 \left(\frac{d_{\max}}{D} \right)^{2.3} \cdot (1 - \cos\theta)^{0.63} + \frac{2}{3\pi d_{\max}} [(\pi - 2)f + 2] - 1 \quad (18)$$

2 材料与方法

2.1 试验装置

2.1.1 倾斜叶片上铺展椭圆短轴与长轴直径比测试系统

测试系统主要由图像采集系统、供液系统和靶标载物台组成, 如图1所示。图像采集系统包括1台高速摄像机、2台照明灯和计算机软件分析系统, 供液系统由微量取样器、接触角仪夹持装置组成。利用高速摄像机(VE0410型, 美国 Vision Research 公司)拍摄时要使镜头与靶标叶片所在平面平行, 以保证液滴在倾斜叶片上最大铺展时椭圆长轴和短轴直径为真实数据。试验时高速摄像机拍摄速度为10 000 f/s, 分辨率为1 024 像素 × 512 像素。镜头采用 Tokina 公司 AT-X M100 PRO D 型定焦镜头, 为使拍摄的画面清晰, 采用雷普曼(LIPPMANN)LED-1500型光源进行辅助照明。

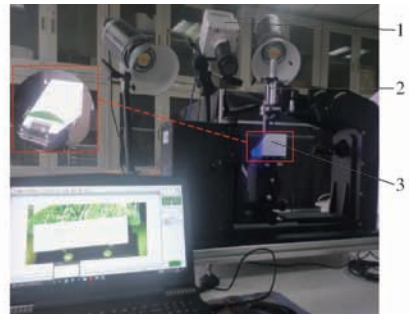


图1 椭圆短轴与长轴直径比测试系统

Fig. 1 Measuring system of diameter ratio of ellipse short axis to long axis

1. 图像采集系统 2. 供液系统 3. 靶标载物台

2.1.2 倾斜叶片上液滴撞击行为试验测量系统

测试液滴在倾斜叶片上撞击行为的试验系统主要由喷头雾化系统、图像采集系统、水平移动装置、塑料罩板和靶标载物台组成(图2)。喷头雾化系统包括喷头、泵、压力表、水管、水箱、喷头体, 图像采集系统由2台高速摄像机、2台照明灯和计算机软件分析系统组成。试验时2台高速摄像机(VE0410型、MR310型, 美国 Vision Research 公司)帧率为10 000 f/s, 分辨率为640 像素 × 480 像素, 镜头及光源型号与2.1.1节中采用的镜头和光源相同。在模拟农业喷雾时, 为控制靶标叶片上液滴数量, 在塑料罩板正对喷头位置开有宽1 cm、长8 cm的条型槽, 靶标叶片放置在条型槽正下方^[25]。本文为避免喷头未到条型槽上方时, 部分液滴飞入条型槽, 在条型槽四周布置吸水海绵以吸收干扰液滴。为避免喷雾液滴降落到高速摄像机上, 将塑料盖板小角度倾斜, 并在高速摄像机上用防水透明塑料薄膜进行防湿保护。

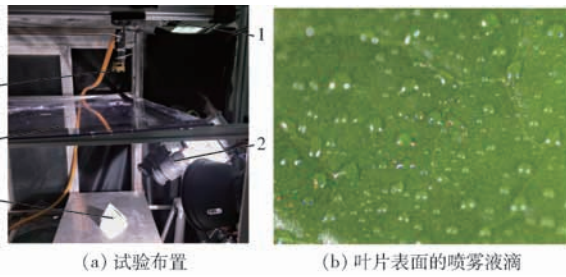


图2 液滴撞击行为测试系统

Fig. 2 Droplet impact behavior test system

1. 水平移动装置 2. 图像采集系统 3. 喷头雾化系统 4. 塑料罩板 5. 靶标载物台

2.2 试验方法

试验在室内进行,忽略风的影响,环境温度 $11 \sim 15^\circ\text{C}$,因试验所拍摄的撞击过程十分短暂,撞击过程中可忽略液体蒸发和植物叶面的吸收,假设系统是绝热环境^[10]。试验时靶标叶片为安吉白茶的成熟叶片,选取叶片若干,正面朝上平整固定于洁净的载玻片上,将载玻片放置于靶标载物台上。试验配备5种不同倾斜度的靶标载物台,其倾角分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 。水滴在靶标叶片上的静态接触角为 77.5° ($4 \mu\text{L}$ 液滴)。

2.2.1 椭圆短轴与长轴直径比测试方法

试验介质为可溶性荧光示踪剂(Rh-B)水溶液(质量分数为0.1%),在 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 倾斜角下分别利用 $10 \mu\text{L}$ 微量进样器挤压出0.5、1.5、2.5 μL 的液滴,轻微抖动进样器使液滴降落在靶标叶片上,同时用 $50 \mu\text{L}$ 微量进样器挤压出可自由降落的液滴,上述每种液滴重复3次,用高速摄像机捕捉液滴的铺展变化。用Image J软件量取每种处理下椭圆最大铺展时椭圆短轴与长轴直径,获得相应处理下的椭圆短长轴直径比,取12组数据平均值作为每个倾斜度下椭圆液滴的短长轴直径比值,假设液滴运动参数及叶片性质对椭圆长轴及短轴的影响一致。

2.2.2 倾斜叶片上液滴撞击行为测试方法

试验喷头选用植保喷雾常用的气吸扇形喷头AIXR11002、广角扇形喷头TT11002、标准扇形喷头ST11002,喷雾压力为0.3 MPa,喷头移动速度为6 cm/s。在喷雾高度为50 cm时,AIXR11002、TT11002、ST11002喷头的体积中径(VMD)依次为357.5、276.6、160.8 μm 。试验介质为普通自来水,喷雾高度设为距离靶标30、40、50 cm,在每挡高度下,设有 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 共5种倾斜角,在每种倾斜角下,分别用3种不同喷头做喷雾试验,共45个处理,每个处理重复3次,以获得不同速度和粒径的液滴。每次测试前,利用文献[8]中已知尺寸的

不锈钢阶梯块对图像采集系统进行标定。每次试验随机选取成熟靶标叶片放置于载物台上,用照明灯对靶标补光,以获得清晰图像。拍摄结束后,根据拍摄照片将清晰液滴按照不同撞击行为分类记录,并利用高速摄像机自带的TEMA软件对每帧图像上的液滴位置进行追踪,计算液滴撞击靶标前的初始速度 v ,同时利用Image J软件测量这些液滴的初始直径 D 及最大扩展时椭圆长轴直径 d_{max} ^[25]。因实际液滴在撞击叶片前不完全是球形,假设液滴为轴对称的椭圆形,使用椭圆公式计算初始直径^[8],计算公式为

$$D = \sqrt{D_L D_S} \quad (19)$$

式中 D_L ——椭圆长轴直径,mm

D_S ——椭圆短轴直径,mm

3 结果与分析

液滴撞击茶树叶片表面后,根据高速摄像机拍摄到的图像观察到,液滴出现粘附、后退破碎、飞溅3种现象,未出现反弹行为。撞击行为中以粘附为主,有少量破碎和飞溅。小液滴只发生粘附行为,对于大液滴,在高速和小撞击角度下容易出现破碎和飞溅现象。因后退破碎过程中,液滴只是由大液滴变为小液滴,没有液滴损失,且破碎小液滴铺展过程与正常粘附液滴铺展过程一致,故后续研究中不对破碎作针对性分析,将其视为广义粘附。

3.1 斜撞击液滴的粘附铺展

喷雾液滴滞留和分布直接影响农药的生物功效,为最大化喷雾滞留,液滴应该在首次碰撞叶片时粘附在植物靶标上^[28]。文中斜撞击喷雾试验时,因喷头处于竖直状态,当雾化液滴竖直向下运动时,此时叶片倾角 β 和撞击角 ψ 关系为 $\beta + \psi = 90^\circ$,因叶片倾角是叶片自然属性,本文研究旨在为喷施参数提供指导,故后续忽略倾角 β ,只研究撞击角 ψ 对液滴撞击行为的影响。液滴在茶树叶片上的粘附铺展,与液滴撞击靶标前的运动参数、植物表面特性、药液性质密切相关。温度为 15°C 时水的表面张力 σ 为0.0735 N/m,粘度 η_s 为 $1.1404 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,密度 ρ 为 10^3 kg/m^3 ,液滴在撞击角为 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° 时,相应的椭圆短长轴直径比 f 为1、0.911、0.867、0.810、0.781,将各参数代入式(13),得到 D 、 v 及撞击角 ψ 对铺展面积的理论影响,如图3所示。为验证理论推导的准确性,对试验中获得的粘附液滴运动参数进行统计分析,以探索斜撞击时液滴铺展面积的变化规律,如表1所示。

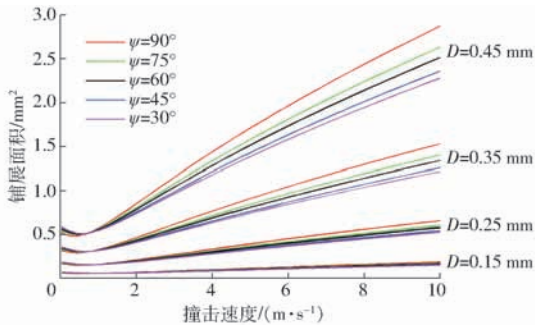


图3 铺展面积随不同初始直径、撞击速度、撞击角的变化曲线

Fig.3 Variation curves of spread area with different initial diameters, impact speeds and impact angles

3.1.1 液滴初始直径、撞击速度及撞击角对铺展面积的影响

根据表1数据,利用SPSS软件独立样本 t 检验来分析不同初始直径、撞击速度、撞击角的液滴铺展面积均值的差异显著性,检验结果如表2所示。由表2可看出,初始直径、撞击速度平均值相等性 t 检验的 P 值均小于0.001,而撞击角的 P 值为0.637,大于0.05,说明在5%显著性水平下,不同初始直径、撞击速度的液滴铺展面积均值具有显著性差异,而不同撞击角的液滴铺展面积均值无显著性差异。初始直径、撞击速度和撞击角对铺展面积影响程度如表3所示,在主效应检验中,初始直径、撞击速度的 P 值均小于0.001,而撞击角 P 值为0.107,大于0.05,说明初始直径、撞击速度对液滴铺展面积有显著性影响,撞击角对液滴铺展面积无显著性影响。根据效应量的度量值偏 E_{in} 平方值判断,撞击速度偏 E_{in} 平方值最大且通过了显著性检验,初始直径偏 E_{in} 平方值次之且通过了显著性检验,撞击角偏 E_{in} 平方值最小且未通过显著性检验。因此,试验中初始直径、撞击速度、撞击角对液滴铺展面积影响程度从大到小依次为撞击速度、初始直径、撞击角,即撞击速度对雾滴铺展面积影响最显著,其次是初始直径,撞击角无显著性影响,试验数据分析结果与图3的理论结果吻合。

3.1.2 撞击角对不同粒径液滴铺展面积影响的差异性

由图3的理论结果可看出,撞击角对中小粒径液滴的影响不显著,在初始直径 $D=0.15$ mm时,不同撞击角的铺展曲线几乎重合,当液滴直径逐渐增大,可看出撞击角对大液滴的影响程度也相应增大。为验证理论推导的准确性,利用表1数据分析撞击角在不同液滴直径的情况下对铺展面积的影响趋势,分析结果如表4所示。由表4可看出,在中小液滴范围内($D \leq 0.3$ mm),撞击角对铺展面积影响的

表1 粘附液滴运动参数

Tab.1 Adhesion droplet motion parameters

撞击角/ (°)	测点	初始直径/ mm	撞击速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	铺展面积/ mm^2
90	1	0.259	2.728 0	0.162
	2	0.272	2.459 1	0.171
	3	0.325	2.567 6	0.202
	4	0.330	1.425 2	0.156
	5	0.371	2.072 0	0.277
	6	0.389	5.989 3	0.478
	7	0.412	6.358 6	1.161
	8	0.409	5.991 5	0.745
	9	0.442	1.423 8	0.403
	10	0.513	6.435 2	1.781
	11	0.563	7.245 9	1.350
	12	0.576	7.724 7	2.162
75	1	0.292	0.978 0	0.098
	2	0.292	2.982 8	0.243
	3	0.314	3.218 1	0.258
	4	0.327	4.142 7	0.292
	5	0.331	1.034 9	0.209
	6	0.348	1.756 6	0.238
	7	0.365	7.079 1	0.456
	8	0.381	4.870 3	0.476
	9	0.396	5.851 4	0.489
	10	0.440	4.262 3	0.951
	11	0.440	4.885 5	1.046
	12	0.500	1.534 7	0.476
60	1	0.249	1.316 1	0.124
	2	0.326	1.154 7	0.177
	3	0.331	1.121 2	0.121
	4	0.337	1.968 3	0.300
	5	0.337	3.982 5	0.319
	6	0.391	2.575 5	0.545
	7	0.396	1.110 4	0.173
	8	0.415	3.157 2	0.645
	9	0.419	1.398 0	0.219
	10	0.465	2.376 9	0.661
	11	0.504	1.516 2	0.460
	12	0.524	1.480 1	0.471
45	1	0.270	1.851 0	0.098
	2	0.281	2.573 6	0.166
	3	0.295	1.452 0	0.137
	4	0.340	1.066 1	0.141
	5	0.343	3.106 9	0.287
	6	0.399	3.557 1	0.205
	7	0.405	4.878 6	0.730
	8	0.412	0.717 0	0.180
	9	0.417	2.890 2	0.166
	10	0.454	1.216 3	0.401
	11	0.463	3.933 8	0.577
	12	0.555	2.600 5	0.869
30	1	0.272	2.429 0	0.190
	2	0.281	1.517 5	0.104
	3	0.385	1.441 0	0.485
	4	0.391	1.297 5	0.472
	5	0.406	4.140 7	0.936
	6	0.411	1.749 7	0.224
	7	0.428	1.503 3	0.551
	8	0.436	4.683 4	1.135
	9	0.456	3.800 6	1.507
	10	0.455	1.456 8	0.550
	11	0.520	1.358 7	0.545
	12	0.533	1.393 2	0.379

表2 初始直径 D 、撞击速度 v 、撞击角 ψ 的铺展面积均值 t 检验

Tab.2 Independent samples test of spreading area of initial diameter, impact velocity and impact angle

		平均值相等性的 t 检验				
		t	自由度	P (双侧检验)	均值差值	标准误差差值
A 方差未齐	D 分割点 0.3 mm	6.459	53.740	<0.001	0.411403	0.063690
	v 分割点 3 m/s	4.402	24.096	<0.001	0.513686	0.116686
A 方差齐性	ψ 分割点 60°	0.475	58	0.637	0.053952	0.113700

表3 多因素主体间效应的检验

Tab.3 Tests of within-subjects effects of multifactor

来源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F	P	偏 E_{in} 平方值
校正模型	8.276	6	1.379	28.519	<0.001	0.764
截距	1.822	1	1.822	37.672	<0.001	0.415
撞击角	0.388	4	0.097	2.003	0.107	0.131
初始直径	2.125	1	2.125	43.929	<0.001	0.453
撞击速度	2.286	1	2.286	47.259	<0.001	0.471
误差	2.563	53	0.048			
总计	25.373	60				
校正总计	10.839	59				

P 值为 0.919, 大于 0.05, 即影响无显著性; 在大液滴范围 ($D > 0.3$ mm), 撞击角对铺展面积影响 P 值为 0.045, 小于 0.05, 说明撞击角对铺展面积有显著性影响。虽然整体上撞击角对铺展面积无显著性影响, 但当采用粗液滴喷雾作业时, 结合理论分析曲线, 建议采用 90° 的撞击角进行喷施。

3.2 斜撞击液滴的飞溅

3.2.1 液滴撞击角、初始直径及撞击速度对飞溅的影响

液滴撞击叶片表面后, 有少量飞溅行为, 其呈现形式主要有圆周方向冠状飞溅、向某个方向喷射一

表4 不同尺寸液滴的主体效应检验

Tab.4 Tests of within-subjects effects of different size droplets

分类	源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F	P	偏 E_{in} 平方值
$D \leq 0.3$ mm	校正模型	0.003	4	0.001	0.216	0.919	0.147
	截距	0.194	1	0.194	58.604	0.001	0.921
	撞击角	0.003	4	0.001	0.216	0.919	0.147
	错误	0.017	5	0.003			
	总计	0.242	10				
	校正总计	0.019	9				
$D > 0.3$ mm	校正模型	1.795	4	0.449	2.651	0.045	0.191
	截距	15.684	1	15.684	92.687	<0.001	0.673
	撞击角	1.795	4	0.449	2.651	0.045	0.191
	错误	7.615	45	0.169			
	总计	25.131	50				
	校正总计	9.409	49				

个或多个液滴。为研究影响飞溅的因素, 本文提取试验中不同撞击角下发生飞溅的液滴参数, 如表5所示。

将表1粘附铺展液滴与表5飞溅液滴组合, 如图4所示。为检验液滴初始直径、撞击速度、撞击角与飞溅行为的相关性, 对图4组合数据进行 Kendall 非参数相关性分析, 检验结果为, 初始直径、撞击速度的 P 值均小于 0.001, 而撞击角的 P 值为 0.563, 大于 0.05, 说明初始直径、撞击速度与飞溅有相关性, 而撞击角对于飞溅无相关性, 故在飞溅行为中不考虑撞击角的影响。从图4可看出, 随着初始直径及撞击速度增大, 液滴发生飞溅概率增大, 对组合数据进行二元逻辑回归分析, 结果如表6所示。由表6可看出, 初始直径及撞击速度对飞溅的影响具

有显著性, 其 P 值均小于 0.05, 根据回归系数 $\text{Exp}(B)$ 值, D 或 v 每增加一个单位, D 发生不飞溅的概率与飞溅概率的比值小于 0.001, 而 v 发生不飞溅的概率是飞溅概率的 0.381 倍, 可见初始直径 D 对飞溅的影响程度大于撞击速度 v 。

3.2.2 飞溅临界值 K_{crit} 及飞溅临界曲线

FORSTER 等^[23]提出, 对于亲水叶片, 根据 20% 丙酮水溶液在靶标叶片上静态接触角 $CA_{20\% \text{ acetone}}$ 计算 K_{crit} , 其中 $K_{\text{crit}} = -0.584(CA_{20\% \text{ acetone}}) + 147$, 本文测得 20% 丙酮水溶液在茶树叶片上静态接触角为 66.08° ($4 \mu\text{L}$ 液滴), 得 $K_{\text{crit}} = 108.4$ 。由液滴的粘附和飞溅分布可看出, $K_{\text{crit}} = 108.4$ 的飞溅临界曲线比 MUNDO 等^[21-22]提出的 $K_{\text{crit}} = 57.7$ 飞溅曲线能更好地预测液滴的粘附和飞溅区间, $K_{\text{crit}} = 57.7$ 飞溅

表5 飞溅液滴运动参数

Tab.5 Motion parameters of splash droplets

撞击角/(°)	测点	初始直径/mm	撞击速度/(m·s ⁻¹)
30	1	0.505	7.745 1
	2	0.623	5.455 5
	3	0.662	5.559 1
	4	0.660	6.724 4
	5	0.659	10.229 0
	6	0.729	8.401 7
	7	0.737	8.613 2
	8	0.725	7.767 2
45	1	0.665	7.958 4
	2	0.681	8.185 5
	3	0.638	8.249 0
	4	0.570	9.051 3
	5	0.772	8.194 7
	6	0.458	6.835 8
	7	0.775	9.097 7
	8	0.626	7.292 3
60	1	0.639	9.287 0
	2	0.616	6.840 6
	3	0.596	6.744 3
	4	0.530	5.567 9
	5	0.671	8.986 6
	6	0.666	9.249 3
75	1	0.781	9.897 0
	2	0.750	9.735 8
	3	0.632	8.144 4
	4	0.891	10.335 0
	5	0.450	7.599 9
	6	0.524	10.648 0
90	1	1.116	9.597 4
	2	0.971	10.171 0
	3	0.776	8.970 9
	4	0.923	9.972 3
	5	0.727	6.729 6
	6	0.629	7.060 3

表6 初始直径D及撞击速度v对飞溅的二元逻辑分析

Tab.6 Binary logic analysis of splash by D and v

	偏回归系数	标准误差	卡方值	自由度	P	Exp(B)值
D	19.612	7.073	7.688	1	0.006	<0.001
v	-0.965	0.426	5.131	1	0.024	0.381
变量	16.333	4.321	14.290	1	<0.001	12 394 046.670

$K_{crit} = 108.4$ 的飞溅临界曲线上方,有3个粘附液滴,因试验叶片采用的是未清洗真实叶片,叶片表面性质对液滴撞击有一定影响,当液滴撞击位置有短绒毛及灰尘时,都会在一定程度上阻止飞溅。

3.3 斜撞击液滴的反弹

根据反弹预测模型公式(18)可知,椭圆短长轴直径比 f 越大,液滴反弹的概率越大。当液滴撞击水平叶片时,撞击角度为 90° ,液滴的铺展形状为圆形,此时 $f=1$,液滴反弹的几率最大。将 $f=1$,接触角 45° 、 77.5° 、 90° 、 135° 代入反弹模型(18),得到4条反弹曲线,结果如图5所示。由图5可看出,静态接触角为 77.5° 时,液滴反弹曲线的 E^* 值全部在零线下方,即 $E^* < 0$,因液滴反弹的条件是 $E^* > 0$,故水滴在茶树叶片上撞击时理论上无反弹行为。喷雾试验时,没有液滴发生反弹,试验结果与理论一致。

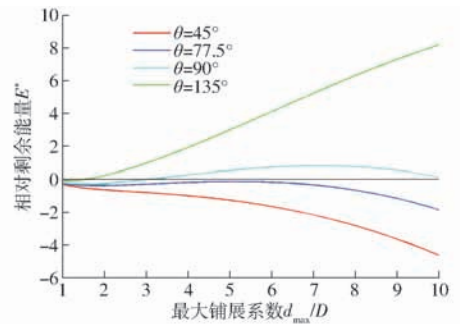


图5 液滴反弹临界曲线

Fig.5 Droplet bounce critical curves

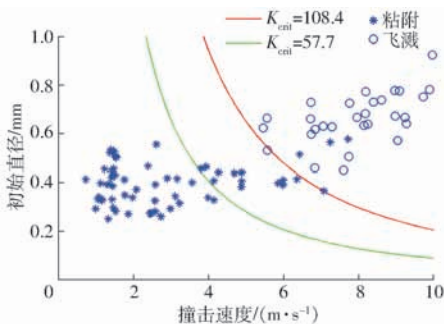


图4 液滴飞溅临界曲线

Fig.4 Droplet splash critical curves

临界曲线偏低,将很多粘附液滴包含在飞溅区域。因茶树叶片表面只有短绒毛,表面较光滑,表面粗糙度较小^[19,29],而飞溅临界值随表面粗糙度的减小而增大,故茶树实际飞溅临界值 K_{crit} 大于 57.7。在

4 结论

(1)液滴斜撞击茶树叶片表面时,呈现粘附、后退破碎、飞溅3种撞击行为,无反弹现象。

(2)初始直径及撞击速度对粘附液滴的铺展面积有显著性影响,且是极强正相关。对于细、中液滴,撞击角对铺展面积无显著性影响;对于粗大液滴,撞击角有显著性影响,建议采用 90° 撞击角。撞击角、初始直径、撞击速度对粘附液滴的铺展面积影响由大到小依次为撞击速度、初始直径、撞击角。

(3)茶树叶片表面比较光滑,无长绒毛,飞溅临界值 $K_{crit} = 108.4$ 能较准确地预测液滴的飞溅情况, $K_{crit} = 57.7$ 偏小,其相应的飞溅曲线偏低。

(4)撞击角、初始直径、撞击速度对液滴飞溅的

影响由大到小依次为初始直径、撞击速度、撞击角。液滴初始直径及撞击速度对液滴飞溅有显著性影响,液滴初始直径和撞击速度越大,越容易发生飞溅,撞击角对液滴飞溅无显著性影响。

(5)对于液滴在表面粗糙度较低的亲水叶片上

的斜撞击,将撞击角或靶标倾斜角纳入液滴粘附、反弹预测模型中,以液滴铺展面积代替斜撞击时最大铺展直径,通过试验验证,数学模型具有较好的准确性,为研究斜撞击时液滴撞击行为提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] DORR G J, KEMPTHORNE D M, MAYO L C, et al. Towards a model of spray-canopy interactions: interception, shatter, bounce and retention of droplets on horizontal leaves[J]. *Ecological Modelling*, 2014,290(C):94-101.
- [2] NAIRN J J, FORSTER W A, LEEUWEN R M. 'Universal' spray droplet adhesion model-accounting for hairy leaves[J]. *Weed Research*, 2013,53(6):407-417.
- [3] DORR G J, WANG S S, MAYO L C, et al. Impaction of spray droplets on leaves: influence of formulation and leaf character on shatter, bounce and adhesion[J]. *Experiments in Fluids*, 2015,56(7):1-17.
- [4] DELELE M A, NUYTTENS D, DUGA A T, et al. Predicting the dynamic impact behavior of spray droplets on flat plant surfaces[J]. *Soft Matter*, 2016,12(34):7195-7211.
- [5] MASSINON M, COCK N D, FORSTER W A, et al. Spray droplet impaction outcomes for different plant species and spray formulations[J]. *Crop Protection*, 2017,99:65-75.
- [6] BOUKHALFA H H, MASSINON M, BELHAMRA M, et al. Contribution of spray droplet pinning fragmentation to canopy retention[J]. *Crop Protection*, 2014,56:91-97.
- [7] ZWERTVAEGHER I K, VERHAEGHE M, BRUSSELMAN E, et al. The impact and retention of spray droplets on a horizontal hydrophobic surface[J]. *Biosystems Engineering*, 2014,126(39):82-91.
- [8] 董祥. 植保机械喷头雾滴撞击植物叶面过程试验测试及仿真研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2013.
DONG Xiang. System aticin vestigation of 3-dimentional spray droplet impaction on leaf surfaces[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2013. (in Chinese)
- [9] DONG X, ZHU H P, YANG X J. Characterization of droplet impact and deposit formation on leaf surfaces[J]. *Pest Management Science*, 2015,71(2):302-308.
- [10] 贾卫东,朱和平,董祥,等. 喷雾液滴撞击大豆叶片表面研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2013,44(12):87-93.
JIA Weidong, ZHU Heping, DONG Xiang, et al. Impact of spray droplet on soybean leaf surface[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2013,44(12):87-93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.015. (in Chinese)
- [11] KWON D, HUH H K, SANG J L. Wettability and impact dynamics of water droplets on rice (*Oryza sativa* L.) leaves[J]. *Experiments in Fluids*, 2014,55(3):1691.
- [12] AHMAD S, TANG H, YAO H. Oblique impact of two successive droplets on a flat surface[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2018,119:433-445.
- [13] RAMAN K A, JAIMAN R K, LEE T S, et al. Dynamics of simultaneously impinging drops on a dry surface: role of impact velocity and air inertia[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2017,486(C):265-276.
- [14] RAMAN K A, JAIMAN R K, LEE T S, et al. Lattice Boltzmann simulations of droplet impact onto surfaces with varying wettabilities[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2016,95:336-354.
- [15] ABOUD D G K, ANNE-MARIE K. Splashing threshold of oblique droplet impacts on surfaces of various wettability[J]. *Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids*, 2015,31(36):10100-10111.
- [16] LIN H, ZHOU H P, XU L Y, et al. Effect of surfactant concentration on the spreading properties of pesticide droplets on Eucalyptus leaves[J]. *Biosystems Engineering*, 2016,143:42-49.
- [17] DAMATO T C, CARRASCO L D M, CARMONA-RIBEIRO A M, et al. The interactions between surfactants and the epicuticular wax on soybean or weed leaves: maximal crop protection with minimal wax solubilization[J]. *Crop Protection*, 2017,91:57-65.
- [18] MAYO L C, MCCUE S W, MORONEY T J, et al. Simulating droplet motion on virtual leaf surfaces[J]. *Royal Society Open Science*, 2015,2(5):140528.
- [19] ZHU L, GE J R, QI Y Y, et al. Droplet impingement behavior analysis on the leaf surface of *Shu-ChaZao* under different pesticide formulations[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2018,144:16-25.
- [20] MAO T, KUHN D C S, TRAN H. Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces[J]. *Aiche Journal*, 1997,43(9):2169-2179.
- [21] MUNDO C, TROPEA C, SOMMERFELD M. Numerical and experimental investigation of spray characteristics in the vicinity of a rigid wall[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 1997,15(1):80-86.

51 - 56.

LIU Deying, WANG Jialiang, LIN Xiangze, et al. Automatic identification method for *Sogatella furcifera* based on convolutional neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 51 - 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180506&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.006. (in Chinese)

- [20] HAFIZ G, QAISAR A, FATIMA G. Insect classification using image processing and Bayesian network[J]. Journal of Entomology and Zoology Studies, 2017, 5(6): 1079 - 1082.
- [21] 杨国国, 鲍一丹, 刘子毅. 基于图像显著性分析与卷积神经网络的茶园害虫定位与识别[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 156 - 162.
YANG Guoguo, BAO Yidan, LIU Ziyi. Localization and recognition of pests in tea plantation based on image saliency analysis and convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 156 - 162. (in Chinese)
- [22] ROTHER C, KOLMOGOROV V, BLAKE A. GrabCut: interactive foreground extraction using iterated graph cuts[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2004, 23(3): 309 - 314.
- [23] 肖志云, 刘洪. 小波域马铃薯典型虫害图像特征选择与识别[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 24 - 31.
XIAO Zhiyun, LIU Hong. Features selection and recognition of potato typical insect pest images in wavelet domain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 24 - 31. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170903&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.003. (in Chinese)
- [24] 潘春华, 肖德琴, 林探宇, 等. 基于 SVM 和区域生长结合算法的南方主要蔬菜害虫分类识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 192 - 199.
PAN Chunhua, XIAO Deqin, LIN Tanyu, et al. Classification and recognition for major vegetable pests in Southern China using SVM and region growing algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 192 - 199. (in Chinese)
- [25] 田晔, 秦运宏, 纪艳, 等. 佳木斯市双拥公园主要害虫种类及其综合防治[J]. 生物灾害科学, 2017, 40(2): 108 - 111
TIAN Ye, QIN Yunhong, JI Yan, et al. Main pests at Shuangyong Park in Jiamusi City and comprehensive prevention[J]. Biological Disaster Science, 2017, 40(2): 108 - 111 (in Chinese)
- [26] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770 - 778.
- [27] MACKAY D J C. A practical Bayesian framework for backpropagation networks[J]. Neural Computation, 2014, 4(3): 448 - 472.
- [28] 马浚诚, 杜克明, 郑飞翔, 等. 基于卷积神经网络的温室黄瓜病害识别系统[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 186 - 192.
MA Juncheng, DU Keming, ZHENG Feixiang, et al. Disease recognition system for greenhouse cucumbers based on deep convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 186 - 192. (in Chinese)

(上接第 103 页)

- [22] MUNDO C, SOMMERFELD M, TROPEA C. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(2): 151 - 173.
- [23] FORSTER W A, MERCER G. Process-driven models for spray droplet shatter, adhesion or bounce[C]//9th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals, The Netherlands, 2010.
- [24] 张文君. 农药雾滴雾化与在玉米植株上的沉积特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
ZHANG Wenjun. The study of pesticide droplets atomization and deposit characteristics in corn leaves[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [25] 王双双. 雾化过程与棉花冠层结构对雾滴沉积的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
WANG Shuangshuang. Studying the influence of spray atomization process and cotton canopy structure on the droplet deposition [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [26] DORR G J, FORSTER W A, MAYO L C, et al. Spray retention on whole plants: modelling, simulations and experiments [J]. Crop Protection, 2016, 88: 118 - 130.
- [27] 丁维龙, 金梦杰, 罗临风, 等. 基于虚拟模型的雾滴与叶片的交互行为分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 40 - 48.
DING Weilong, JIN Mengjie, LUO Linfeng, et al. Behavior analysis of spray droplet interacting with plant leaves based on virtual model[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 40 - 48. (in Chinese)
- [28] MASSINON M, LEBEAU F. Review of physicochemical processes involved in agrochemical spray retention[J]. Biotechnologie Agronomie, Société et Environnement, 2013, 17(3): 494 - 504.
- [29] 黄晓敏, 冯花, 郭雅玲. 茶树叶片显微结构及扫描电镜研究进展[J]. 福建茶叶, 2011, 33(5): 2 - 4.
HUANG Xiaomin, FENG Hua, GUO Yaling. Advances in microstructure and scanning electron microscopy of tea leaves[J]. Tea in Fujian, 2011, 33(5): 2 - 4. (in Chinese)