



液滴撞击大豆叶片表面研究

崔迎涛, 秦超彬, 张 志, 刘道奇, 董慧锋, 张开飞, 李 赫

(河南农业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要:为提高大豆植保机械施药过程中的农药利用率, 本文通过观察大豆叶片表面特征, 分析大豆叶片生物性状, 测量液滴在大豆叶片表面的接触角, 测试大豆叶片表面的粘附性, 进一步利用高速摄像机记录单液滴撞击大豆叶片过程。结果表明, 液滴撞击的动态压力会使得液滴嵌入叶表结构当中, 毛状结构亦能刺透并使液滴破裂, 影响液滴撞击过程的破碎规律。随着液滴撞击速度的增加, 液滴粒径大小为 2.25 mm 时, 液滴铺展直径表现为先增加后减少, 其中撞击速度 $1.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 撞击 We 数 55.57, 最大铺展直径为 3.94 mm, 当撞击速度 $\geq 1.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时液滴出现破碎喷溅, 随着撞击速度增加液滴破碎、喷溅、弹离叶片表面的数量迅速增加, 当撞击 We 数 > 32.83 时液滴撞击过程中出现不同程度的破碎、喷溅, 当撞击 We 数 < 32.83 时液滴未出现破碎现象。改变粒径大小, 随着粒径增大液滴铺展直径随之增加, 当液滴粒径 $< 2.19 \text{ mm}$ 时液滴撞击叶片表面后出现反弹, 当液滴 $\geq 2.19 \text{ mm}$ 时液滴撞击过程有反弹趋势, 但是撞击动能不足、叶片高粘附性等因素影响, 液滴未弹离叶片表面。因此, 当撞击速度在 $1.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 粒径 2.19 mm 时达到最佳值。

关键词:液滴; 高速摄像机; We 数; 铺展直径

Experimental Study on the Impact of Droplets on the Surface of Soybean Leaves

CUI Ying-tao, QIN Chao-bin, ZHANG Zhi, LIU Dao-qi, DONG Hui-feng, ZHANG Kai-fei, LI He

(Electromechanic Engineering College, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to improve the utilization rate of pesticides in soybean plant protection machinery, this paper analyzed the surface characteristics of soybean leaves, the biological characteristics of soybean leaves, measured the contact angle of droplets on the surface of soybean leaves, tested the adhesion of soybean leaf surface, and further utilized a high speed camera recorded the process by which a single droplet hit the soybean leaf. The results showed that the dynamic pressure of the droplet impact caused the droplet to be embedded in the leaf surface structure, and the hairy structure could also penetrated and ruptured the droplet, which affected the breaking law of the droplet impact process. With the increase of the droplet impact velocity and the droplet size of 2.25 mm, the diameter of the droplet spread increased firstly and then decreased. When the impact velocity was $1.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the impact number was 55.57, the maximum spreading diameter was 3.94 mm. When the impact velocity was $\geq 1.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the droplets appeared to be broken and splashed. As the impact velocity increased, the number of droplets breaks, splashes and bounces off the surface of the blade increased rapidly. When the number was > 32.83 , there were different degrees of crushing and splashing during the impact of the droplets. When the impact number was < 32.83 , the droplets did not break. The particle size was changed. As the particle size increased, the droplet spreading diameter increased. When the droplet size was $< 2.19 \text{ mm}$, the droplet rebounds after hitting the surface of the blade. When the droplet $\geq 2.19 \text{ mm}$, the droplet impact process had a rebound trend, but the impact of insufficient kinetic energy, high adhesion of the blade and other factors, the droplets did not bounce off the surface of the blade. Therefore, the optimum value was obtained when the impact velocity was $1.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the particle diameter was 2.19 mm.

Keywords: Droplet; High speed camera; We number; Spread diameter

大豆作为我国重要的农业经济作物, 历年来的产量却不容乐观, 为此越来越多的大豆科研工作者都在努力研究改进措施, 比如改善耕作模式, 高产新品种的选育与推广, 合理施肥, 加强田间管理等来提高大豆的产量。近年来, 大豆的病虫害愈来愈严重, 已成为大豆进一步提高产量的主要限制因素之一。针对病虫害的防治, 植保机械施药已然成为中坚力量。植保机械施药大大提高了作业效率, 但是, 农药利用率低下, 同时造成大量的水土污染^[1-3]。

液滴与植物叶片的碰撞行为在自然界中普遍存在。在植保施药过程中, 雾滴在叶片上沉积量是检验农药利用率的重要指标^[4-5]。为探究植保施药过程中液滴撞击植物叶片的运动特性, 从液滴撞击叶片行为的不同因素着手的研究结果表明喷雾粒径是喷雾质量至关重要的一个因素, 也是影响农药喷洒效果的关键因素^[6]。在液滴撞击叶片表面研究中贾卫东等^[7]总结出液滴在沉积过程中粒径和撞击角度相同情况下, 撞击速度越高, 最大铺展比

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-04-PS23)。

第一作者简介: 崔迎涛 (1994 -), 男, 硕士, 主要从事农业机械化研究。E-mail: 673688124@qq.com。

通讯作者: 李赫 (1972 -), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业机械化研究。E-mail: chungbuk@163.com。

越大。与沉积于叶片表面的液滴相比较,液滴收缩破碎后合计最终铺展比大大提高。与破碎不均匀的液滴相比,破碎较为均匀的液滴其合计最终铺展比明显增大;Boukhalfa 等^[8]提出液滴的滑落行为会影响农药残留,在施药过程中增加附着力通常视为提高利用率的标准,而液滴弹跳和破碎认为对喷雾不利于农药液滴残留;Nairn 等^[9]了解到叶表毛状结构引起小液滴破碎分裂增加,并确定毛状结构叶片粘附的基本原理,将有助于提高毛状结构叶片的喷雾效果;Song 等^[10]认为超过 50% 的农药不能有效利用在疏水或超疏水的植株叶片上,添加微量的多孔表面活性剂有效地抑制了液滴弹跳和飞溅等行为。Maher 等^[11]使用高速成像技术,研究了液滴下落冲击和叶片表面沉积形成的耦合动力学,并研发了一个物理模型来预测液滴的能量耗散,为有效提高农药利用率提供了重要理论基础。

本文从液滴与叶片之间的关系微观的探讨液滴的运动规律,利用超景深显微镜观察叶片表面形貌、接触角、粘附力的基础实验中结合高速图像采集系统对液滴撞击行为进行记录并随着时间变化分析液滴撞击叶片铺展过程,在不同粒径大小和撞击速度下,对液滴撞击叶片的过程进行记录,研究液滴撞击植物叶片的动态过程,以期能够对植保机械喷雾研究和提高农药利用率有进一步的指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 叶片 采用黄淮海地区生长周期 60 d 的大豆品种商豆 1310 的植株叶片。

1.1.2 仪器设备 超景深显微镜 (VHX-600E; 日本 Keyence 公司);OCA25 视频光学接触角测量仪 (德国 Dataphysics 公司);DCAT21 动态接触角测量仪 (德国 Dataphysics 公司);YMJ—B 植物活体叶面积仪 (杭州绿博仪器有限公司);单道移液器 (北京虹湖联合化工产品有限公司)。

1.1.3 试验装置 液滴撞击大豆叶片过程的实验装置如图 1 搭建连接:CP-2200 型号注射泵 (北京思路高医疗科技有限公司)可产生相对均匀的粒径大小的液滴,以及配套使用的 20 mL 注射器和 30 号针头 (内径 0.14 mm,外径 0.32 mm,针长 13 mm);采用 CEL-TCX250 型号双光纤高亮氙灯光源 (北京中教金源科技有限公司)、GC-PX100BAC 型号高速摄像机 (日本 JVC 有限公司)及配套的图像采集系统准确的记录液滴撞击大豆叶片的运动过程,从不同的方位拍摄记录撞击过程;使用 JA3003N 型号电子天平 (上海精科天美仪器有限公司)称量液滴的质量;可旋转的工作台及可调控高度的试验台架,创

造更有利的试验环境,更加精确的记录说明液滴撞击大豆叶片的过程^[12-16]。

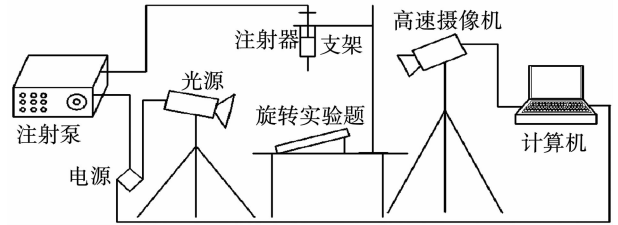


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

1.2 试验设计

采用单液滴撞击大豆表面更加清晰地阐释液滴与大豆叶片之间的关系。液滴撞击叶片过程通过注射泵调节不同的速率并驱动供液装置产生相对均匀的单个液滴,实现不同粒径大小的液滴撞击大豆叶片;选定液滴撞击叶片高度的间隔为 20 mm,液滴撞击高度分别设为 50, 70, 90, 110, 130, 150 mm;注射速率 20 mL·h⁻¹,对应的撞击速度为 0.89, 1.03, 1.25, 1.34, 1.43, 1.55 m·s⁻¹;液滴的粒径大小调节注射泵流量 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 mL·h⁻¹;变换高速摄像机的角度 0°、45°、90°全方位拍摄记录^[17-19]。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 大豆叶片表面特征测量

(1)大豆叶片面积测量:叶面积测量将选取的长势良好的大豆植株叶片进行试验^[14],使用植物活体叶面积仪测量,测得大豆叶片面积范围:48.04 ~ 72.49 cm²;

(2)大豆叶片表面特征:使用光学显微镜观察,移动样本叶片的位置,调节放大倍数成像进行观察实验并保存图像;

(3)接触角的测量:可控制不同体积的液滴滴落到样本叶片上的不同位置、更换不同叶片、改变不同滴落高度、样本叶片的不同倾斜角度,在不同条件下记录接触角的测量值;

(4)大豆叶片粘附性的测量:利用动态接触角测量仪采用座滴法^[14-17,20,22],将样本叶片固定于载玻片并放置到可升降工作台,使用单道移液器控制液滴大小,不同体积的液滴在大豆叶片的粘附性测量。

1.3.2 液滴撞击叶片过程的记录 利用双光纤光源调节适当的亮度配合高速摄影仪以 5 000 帧·s⁻¹ 的速度拍摄,图像分辨率 1 280 × 1 000,截取保存液滴撞击叶片的全过程视频图像。

1.3.3 液滴撞击叶片的动态过程研究 本试验使用液滴为蒸馏水,蒸馏水表面张力随温度升高而减小,实验室温度 20 ± 0.5℃,表面张力 σ 为 72.7 × 10⁻³ N·m⁻¹,动力粘度 μ 为 1.002 × 10⁻³ Pa·s^[12-16,20-22]。

改变液滴的粒径大小调节注射泵流量 10,20,30,40,50,60,70,80 mL·h⁻¹ 对应的液滴粒径见表 1。当注射速率超过 80 mL·h⁻¹ 时会出现成串连续液滴不便观察单液滴撞击过程。

表 1 不同注射速率对应的液滴粒径

Table 1 The droplet size corresponding to different injection rates		
注射速率 Injection rate/(mL·h ⁻¹)	10 个液滴质量 10 droplet quality/mg	液滴粒径 Droplet size/mm
10	0.062	2.28
20	0.060	2.25
30	0.058	2.23
40	0.055	2.19
50	0.051	2.13
60	0.046	2.06
70	0.040	1.97
80	0.036	1.91

1.4 数据分析

试验数据均以标准球体根据公式(1)求得液滴粒径大小^[13],采用称量法,在不同注射速率下待该装置均匀产生液滴时,连续收集 10 滴称量,求得液滴质量^[20];液滴撞击速度根据公式(2)、(3)由液滴连续成像中的相对位置除以时间间隔得出,由此根据公式(4)计算液滴撞击叶片的 We 数^[7]。

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \tag{1}$$

$$u = \frac{x}{t} \tag{2}$$

$$t = \frac{\text{帧数}}{5\,000} \tag{3}$$

$$We = \frac{\rho u^2 d}{\sigma} \tag{4}$$

式(1)中:V—液滴体积;R—液滴半径。
式(2)(3)中:u—撞击速度;x—撞击高度;t—下落时间。
式(4)中:ρ—液体密度;u—撞击速度;d—液滴粒径;σ—液体表面张力。

2 结果与分析

2.1 大豆叶片及其表面特征

液滴撞击叶片过程处不仅取决于液滴本身特性,与叶片表面形貌,表面粗糙度等有关,超景深显微镜观察大豆叶片表面特征见图 2,观察到大豆叶片表面覆盖有大量具有一定刚度的圆锥形毛状结构且叶脉纹路不规则排布,毛状结构密度分布不均匀,长度不一,多集中于叶片的叶脉上,倾斜状且不规则分布,且叶片粗糙表面含有蜡质结构、表面气孔及表面凸起部分(图 2a 和 b)测量大豆叶片不同位置、不同叶片表面的毛状结构的长度、直径,测量多组数据得出该毛状结构平均长度 665.01 μm,直径 28.45 μm(图 2c 和 d)。

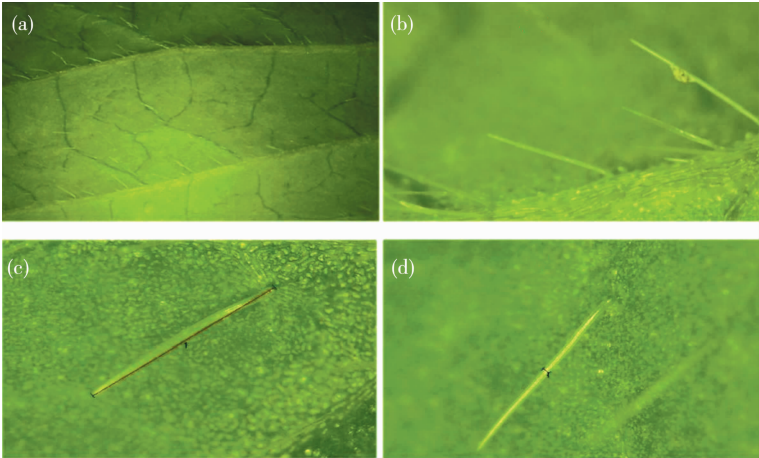


图 2 大豆叶片表面特征

Fig. 2 Surface characteristics of soybean leaves

液滴在样本叶片接触角如图 3,控制液滴体积,连续测量出多组数据,得出大豆叶片正面平均接触角 129°,背面的平均接触角 120°,在不同条件下该测量值未呈现显著变化,该品种大豆叶片接触角相对稳定。

由图 4 可知液滴在样本叶片上的粘附过程,验证液滴在样本叶片表面粘附性。使用单道移液器

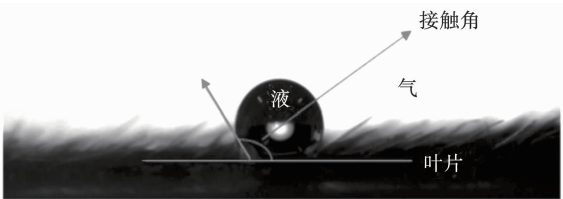


图 3 大豆叶片接触角

Fig. 3 Soybean leaf contact angle

将液滴转移到工作台上方金属环集液处,上升工作台至金属环距离为 25 mm 处,使用 SCAT 软件将自动升起工作台样本叶片上升并与液滴充分接触如图 4-a;自动降下工作台液滴发生形变,此时粘附值继续升高见图 4-b;由图 4-c 可见,液滴分成两个液滴,一部分粘附于样本叶片上,另一部分留在金属环上。由图 5 可知 1,2,4 μL 的液滴粘附过程,其中

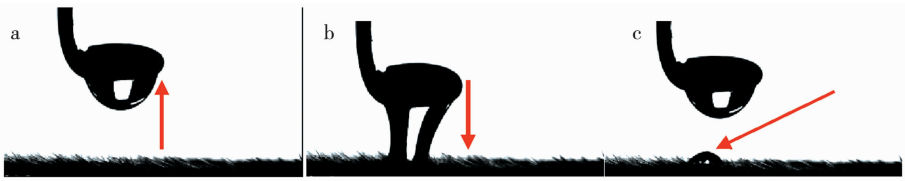


图 4 液滴粘附过程

Fig. 4 Droplet adhesion process

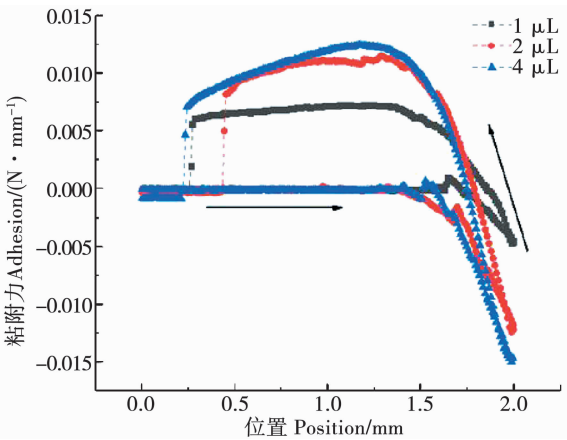


图 5 液滴粘附变化曲线图

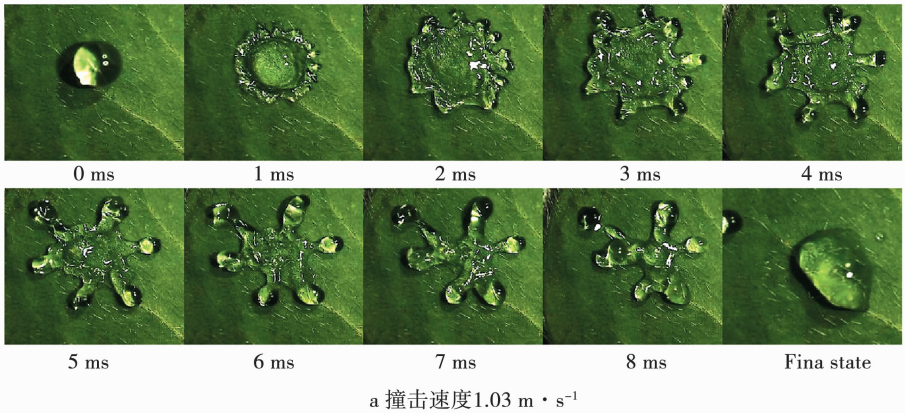
Fig. 5 Droplet adhesion curve

2.2 不同撞击速度液滴的铺展过程

为了更加清晰地揭示不同撞击速度下液滴在叶片上的铺展过程,通过调节撞击高度改变撞击速度,本组数据采用拍摄角度为 90°,即高速摄像机垂直于样本叶片。不同撞击速度液滴撞击大豆叶片表面的最大铺展、回撤破碎、最终状态 3 视频截图如图 6 所示。由表 2、图 6a、图 8 可知当撞击速度为 1.03 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,撞击 We 数 32.83,0 ~ 3 ms 是液滴撞

0 ~ 1.5 mm 时自动升降台承载样本叶片上升至接触液滴阶段,1.5 ~ 2.0 mm 处,样本叶片继续上升至与液滴充分接触挤压,此阶段粘附力为负值,并且在 20 mm 时升降台停止上升;2.00 ~ 1.25 mm 时自动升降台承载样本叶片下降,此时粘附值迅速上升并达到峰值;1.25 ~ 0.25 mm 时样本叶片仍下降,但液滴尚未分离;0.25 ~ 0 mm 时液滴与样本叶片分离。

击叶片铺展至最大直径为 3.84 mm,4 ~ 7 ms 是液滴回撤阶段,此时液滴撞击动能增加出现液滴分裂现象。8 ms 液滴继续收缩并分裂出 1 个小液滴;由图 6b 可知,当撞击速度为 1.34 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,撞击 We 数 55.57,0 ~ 3 ms 是液滴撞击叶片铺展至最大直径为 3.94 mm,4 ~ 5 ms 液滴回撤阶段,由于撞击高度增加液滴破碎有增多趋势,6 ~ 8 ms 液滴分裂破碎出 10 个液滴,其中 3 个液滴弹出叶面;由图 6c 可知,当撞击速度为 1.55 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,撞击 We 数 74.36,0 ~ 3 ms 时液滴撞击叶片铺展至最大直径为 3.85 mm,但是 2 ms 液滴就已经出现破碎分裂现象,4 ~ 8 ms 液滴回撤过程液滴破碎分裂 31 个液滴,其中 21 个液滴破碎弹离叶面。根据这 3 组和图 8 可以得出,在液滴撞击叶片速度越高最终液滴残留量越少,但是液滴最大铺展直径随速度的上升先增大后减小。由图 7 和 8 可知,当速度 > 1.34 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,液滴最大铺展出现减小趋势,随着撞击速度的增加,撞击 We 数随之增加,液滴破碎逐渐增多,弹离叶片的液滴也逐渐增多(表 2),随着撞击高度的增加液滴撞击动能也在增加导致液滴出现破碎分裂现象。



a 撞击速度 1.03 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

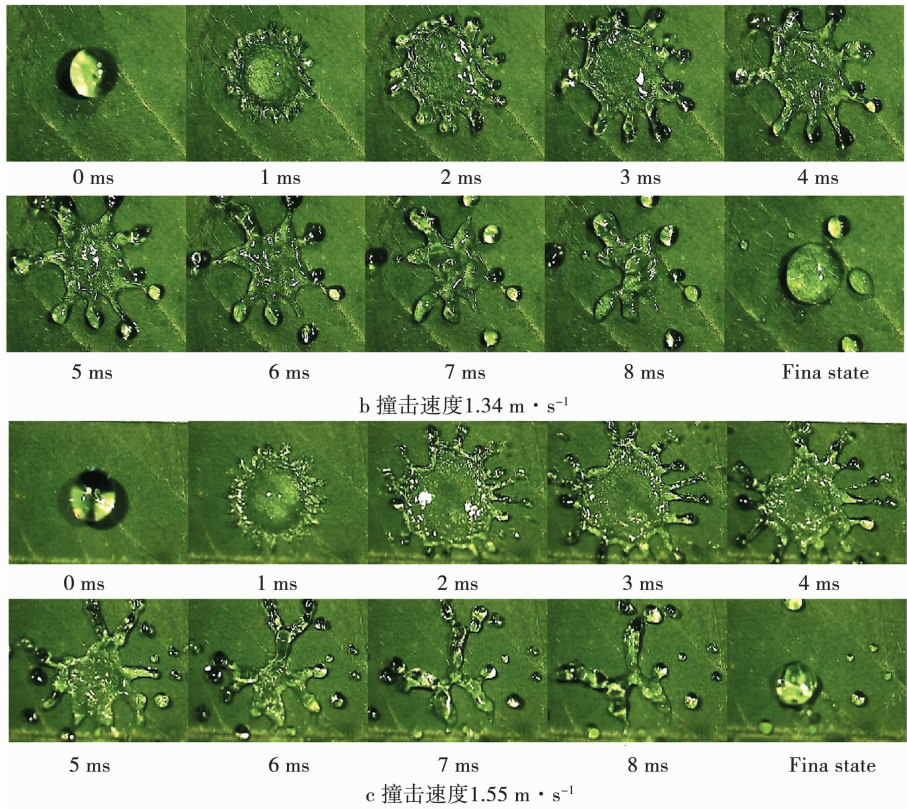


图6 同一粒径大小不同速度撞击大豆叶片

Fig. 6 The same particle size and different speed impact soybean leaves

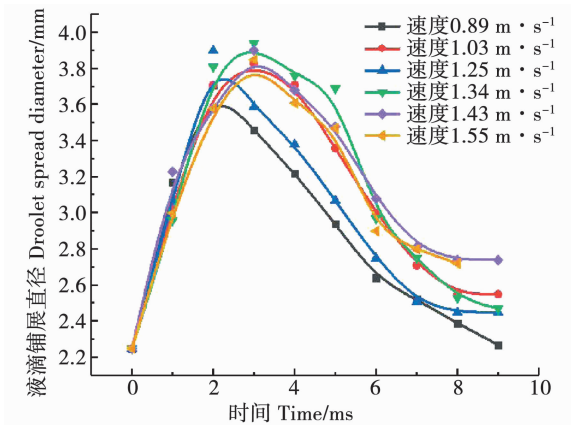


图7 液滴铺展直径时间变化图

Fig. 7 Droplet spread time change graph

表2 不同撞击速度液滴破碎数量

Table 2 Drop speed of droplets at different impact speeds

撞击速度 Impact speed /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	液滴破碎数量 Number of droplet breaks /个	液滴弹出数量 Droplet ejection /个
0.89	0	0
1.03	1	0
1.25	6	1
1.34	12	5
1.43	26	15
1.55	31	21

图8 是液滴破碎弹出样本叶片随液滴撞击速度

的变化图,得出液滴撞击破碎弹出 y 与液滴撞击速度 x 之间符合函数关系:

$$y=90.651x^2-188.94x+96.936 \tag{5}$$

根据公式(3)对液滴撞击样本叶片破碎弹出的数据进行验证,相关系数 R^2 大于 0.95,拟合效果较好。

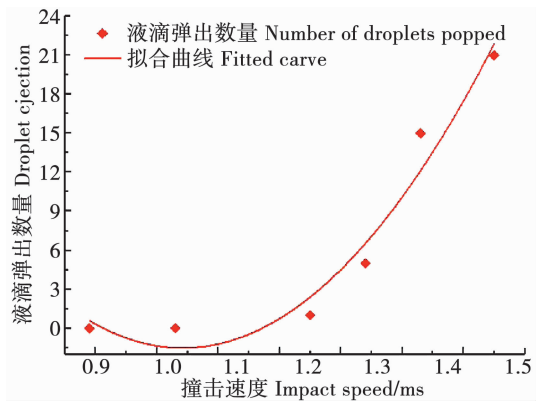


图8 液滴弹出数量与撞击速度拟合曲线

Fig. 8 Liquid droplet ejection quantity and impact velocity fitting curve

2.3 不同粒径大小液滴的铺展过程

经过本试验验证撞击速度在 $0.89\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时液滴没有出现液滴分裂破碎,因此,从侧面拍摄不同粒径大小液滴撞击叶片,即高速摄像机平行于样本叶片。液滴粒径分别为 $1.90,2.06$ 和 2.19 mm 时液滴撞击叶片过程的视频截图如图9,其中,图9a液

滴粒径为 1.90 mm 时,撞击 We 数 20.7,0 ~ 3 ms 液滴撞击叶片铺展至最大直径 3.47 mm,4 ~ 6 ms 为液滴回撤阶段,7 ~ 25 ms 液滴回撤后有反弹趋势,26 ~ 90 ms 液滴弹出叶片,最终状态液滴停落在样本叶片上。图 9b 液滴粒径为 2.06 mm 时,撞击 We 数 23.9,0 ~ 3 ms 液滴撞击叶片铺展至最大直径 3.53 mm,4 ~ 6 ms 液滴回撤阶段,液滴有收缩破碎成 2 个液滴的趋势,7 ~ 31 ms 液滴又回撤成一个液滴且有反弹的趋势,32 ~ 97 ms,液滴弹出叶片,最终状态液滴停落在样本叶片上,图 9c 液滴粒径为 2.19 mm 时,撞击 We 数 25.5,0 ~ 3 ms 液滴撞击叶片铺展至最大直径 3.6 mm,4 ~ 7 ms 液滴回撤阶段液滴有回撤破碎成 2 ~ 3 个液滴的趋势,8 ms - 最终状态,液滴又回撤成一个液滴,没有出现液滴弹出样本叶片的现象。

由图 10 可知,粒径越大液滴的撞击铺展直径越大,在同一高度下,改变液滴大小,撞击速度也在不断变化,当粒径 < 2.19 mm 时,液滴撞击叶片表面出现反弹现象,当粒径 ≥ 2.19 mm 时由于液滴铺展面积增大和叶片表面粘附作用液滴不易弹离样本叶片,不同粒径大小的液滴随着初始速度的增加,撞击 We 数也缓慢增加。

图 11 是液滴撞击最大铺展直径与粒径的变化图,得出液滴撞击最大铺展直径 y 与粒径 x 之间符合函数关系:

$$y = 2.6516x^2 - 10.294x + 13.47 \tag{6}$$

根据公式(4)对液滴撞击样本叶片最大铺展直径数据进行验证,相关系数 R^2 大于 0.95,拟合效果较好。

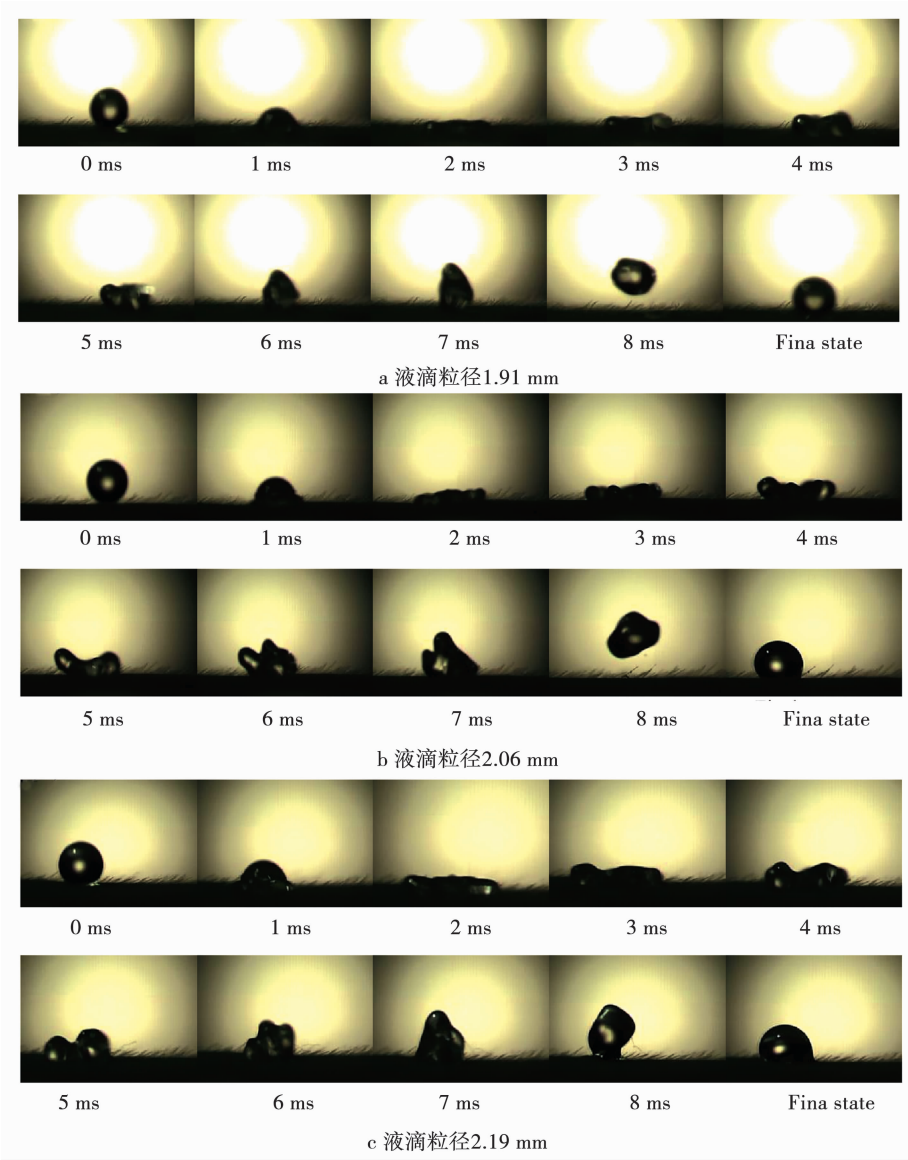


图9 同一高度不同粒径大小液滴撞击大豆叶片

Fig. 9 Droplets hitting soybean leaves at the same height and particle size

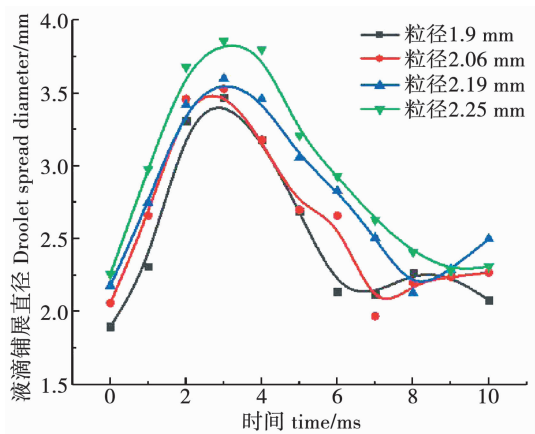


图 10 液滴铺展直径时间变化图

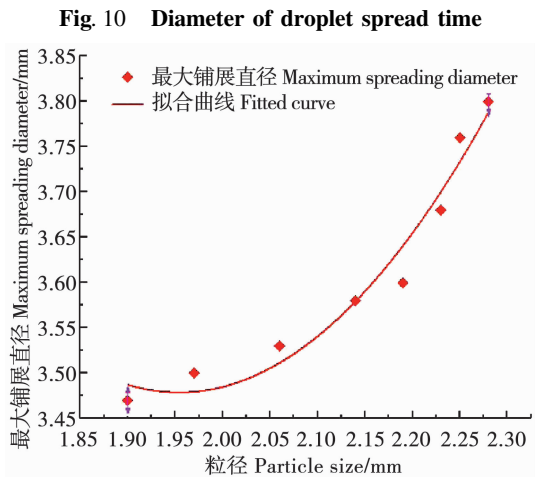


图 11 液滴最大铺展直径与粒径拟合曲线

3 讨论

大豆在我国作为重要的经济作物,其加工的产品需求量日益增加,然而,大豆的病虫害成为限制其提高产量的重要因素之一,因此,改善植保机械施药技术解决黄淮海地区夏播大豆生产中出现的施药问题,有利于实现大豆优质高产。本文叶片表面形貌与表皮特征影响着液滴在叶片表面的动态行为,接触角的大小是表明叶片的润湿程度的重要量度,也是液滴能否沉积叶面的关键因素。相关研究表明大豆叶片表面具有高度疏水性,影响着液滴在叶片表面的沉积与润湿,倾斜样本叶片角度,液滴出现接触角滞后,滞后接触角越大说明液滴粘附性越大。因此,可以通过测量滞后接触角来反映不同体积大小液滴的粘附性。本研究采用单液滴撞击大豆叶片表面,更加清晰地阐释液滴在大豆叶片表面的动态行为,为田间施药过程中,液滴在叶片上运动行为提供基础理论依据。利用高速摄像机拍摄液滴撞击过程,液滴在 3 ms 时达到最大铺展直径,但由于水的毛细管力和表面张力等作用 4 ms 时

液滴出现沉积,回撤破碎、喷溅、反弹等动态行为不利于液滴在叶片表面附着。

贾卫东等^[7]提出,撞击速度越高,最大铺展越大,液滴在撞击大豆叶片表面未发现反弹行为;关于喷雾粒径对液滴铺展的影响兰玉彬等^[6]提出,不同农药、不同作物、病虫害的不同时期,农药喷雾粒径大不相同。本文通过实验得出,随着撞击速度的增加,液滴破碎数量增多而且破碎弹离样本叶片也增加,撞击速度为 $1.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,撞击 We 数 55.57,液滴最大直径为 3.94 mm,同时也是试验所得最大铺展直径。随着速度增加液滴撞击叶片的惯性力与动能增加,液滴的最终残留量减少,液滴更容易破碎、喷溅,不利于在叶片表面沉积,因此,液滴最大铺展直径随速度的增加先增大后减小。当粒径在 1.91 mm 碰撞时,撞击 We 数 20.7,液滴最大铺展 3.47 mm,此时液滴反弹出样本叶片开始到落到该叶片总时长 64 ms,最终停落到样本叶片上;当粒径 2.19 mm,撞击 We 数 23.86,此时最大铺展直径为 3.6 mm,撞击动能不足,液滴有反弹出叶面的趋势,但是未弹离叶片表面。根据大豆叶片表面的疏水特质以及撞击动能的影响液滴容易反弹,不利于液滴在叶片表面沉积,降低了农药利用率。因此,针对不同作物的形貌特征、生物特性,应优化农药喷施方式、提高农药利用率,实现农业生产的良好发展。

4 结论

本文通过使用高速摄影仪微观的揭示液滴在叶片表面的动态行为,通过液滴在叶片表面铺展特性基础理论分析,表明毛状结构亦能刺透并使液滴破裂,影响着液滴撞击过程的破碎规律。对单液滴撞击叶片的试验参数的选定,同一注射速率不同撞击速度,液滴撞击叶片过程的分析表明,随着撞击速度的增加液滴破碎量迅速增加,液滴最大铺展直径随着撞击速度的增加先增大后减小,撞击速度在 $1.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时为最大铺展直径;改变液滴粒径大小,液滴随着粒径的增加最大铺展直径增加,当粒径小于 2.06 mm 时,液滴会出现反弹现象。因此,当撞击速度在 $1.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,撞击 We 数 55.57,粒径 2.19 mm 时达到最佳值。本研究对植保机械施药液滴参数的选定可以有效改善喷雾量、完善农药喷洒技术,为提高农药利用率奠定了基础理论依据。

参考文献

[1] 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. (Wang P, Qi

L J, Li H, et al. Influence of plant leaf surface structures on droplet deposition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 75-79.)

[2] 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.

[3] 杨晓东,尚广瑞,李雨田,等. 植物叶表的润湿性能与其表面微观形貌的关系[J]. 东北师大学报(自然科学版),2006(3): 91-95. (Yang X D , Shang G R, Li Y T, et al. Surface morphological characteristics comparisons of serious plant leaves with hydrophobic or hydrophilic function [J]. Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition),2006,38(3): 91-95.)

[4] 杨希娃,代美灵,宋坚利,等. 雾滴大小、叶片表面特性与倾角对农药沉积量的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(3): 70-73. (Yang X W, Dai M L, Song J L, et al. Effect of droplet size, leaf characteristics and angle on pesticide deposition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 70-73.)

[5] 秦梦晓,张旭辉,汤成龙. 液滴撞击不同粗糙度固体表面动力学行为实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(9):26-31. (Qin M X, Zhang X H, Tang C L. Experimental study on solid surface with different roughness [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 26-31.)

[6] 兰玉彬,彭 瑾,金 济. 农药喷雾粒径的研究现状与发展[J]. 华南农业大学学报,2016,37(6): 1-9. (Lan Y B, Peng J, Jin J. Research status and development of pesticide spraying droplet size [J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(6): 1-9.)

[7] 贾卫东,朱和平,董祥,等. 喷雾液滴撞击大豆叶片表面研究[J]. 农业机械学报,2013,44(12): 87-93,113. (Jia W D, Zhu H P, Dong X, et al. Impact of spray droplet on soybean leaf surface [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery,2013,44(12): 87-93,113.)

[8] Boukhalfa H H, Massinon M, Belhamra M, et al. Contribution of spray droplet pinning fragmentation to canopy retention[J]. Crop Protection, 2014, 56(2): 91-97.

[9] Nairn J J, Forster W A, Van Leeuwen R M. ‘Universal’ spray droplet adhesion model – accounting for hairy leaves[J]. Weed Research, 2013, 53(6): 407-417.

[10] Song M, Ju J, Luo S, et al. Controlling liquid splash on superhydrophobic surfaces by a vesicle surfactant[J]. Science Advances, 2017, 3(3): e1602188.

[11] Maher D, Reza M S, Nasim H M, et al. Enhancing droplet deposition throughin-situprecipitation [J]. Nature Communications, 2016, 7:12560.

[12] Gao N, Geyer F, Pilat D W, et al. How drops start sliding over solid surfaces[J]. Nature Physics, 2018,14:191-196.

[13] 谢亚星,慕松,陈星名,等. 液滴撞击枸杞叶片铺展特性实验研究与仿真分析[J]. 中国农机化学报,2017,38(9): 70-74. (Xie Y X, Mu S, Chen X M, et al. Experimental research and simulated analysis on spreading characteristics of droplet impacting wolfberry leaf[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2017,38(9): 70-74.)

[14] 张晨辉. 表面活性剂对液滴在靶标表面润湿粘附行为的影响机制及调控[D]. 北京: 中国农业大学,2017. (Zhang C H. Influence the influence and regulatory mechanism about wetting and adhesion behavior of droplet on target solid surfaces by adding surfactants [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.)

[15] 崔洁,陆军军,陈雪莉,等. 液滴高速撞击固体板面过程的研究[J]. 化学反应工程与工艺,2008,24(5): 390-394. (Cui J, Lu J J, Chen X L, et al. Study of liquid droplet impacting on a solid surface with high velocity [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology,2008,24(5): 390-394.)

[16] 梁刚涛,沈胜强,郭亚丽,等. 实验观测液滴撞击倾斜表面液膜的特殊现象[J]. 物理学报,2013,62(8): 374-380. (Liang G T, Shen S Q, Guo Y L, et al. Special phenomena of droplet impact on an inclined wetted surface with experimental observation [J]. Acta Physica Sinica,2013,62(8): 374-380.)

[17] Xie J, Xu J, Shang W, et al. Mode selection between sliding and rolling for droplet on inclined surface: Effect of surface wettability [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,122: 45-58.

[18] 钟香梅. 典型靶标作物叶面对农药液滴吸附特性的研究[D]. 长春: 吉林大学,2015. (Zhong X M. Study on adsorption characteristics of pesticide droplets on the surface of typical target crops[D]. Changchun: Jilin University, 2015.)

[19] Bernardino N R, Blickle V, Dietrich S. Wetting of surfaces covered by elastic hairs[J]. Langmuir the ACS Journal of Surfaces & Colloids, 2010, 26(10): 7233.

[20] 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.

[21] 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 X. Systematic investigation of 3-dimentional spray droplet impaction on leaf surfaces [D]. Beijing: China Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2013.)

[22] 马学虎,兰忠,王凯,等. 舞动的液滴: 界面现象与过程调控[J]. 化工学报,2018,69(1): 9-43. (Ma X H, Lan Z, Wang K, et al. Dancing droplet: Interface phenomena and process regulation [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering,2018,69(1): 9-43.)