doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.015

喷雾液滴撞击大豆叶片表面研究*

贾卫东[1]　朱和平[2]　董　祥[3]　薛　飞[1]

(1.江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室,镇江 212013;2.美国农业部农业研究中心,Wooster OH 44691;
3.中国农业机械化科学研究院,北京 100083)

摘要:利用两台高速数码摄像机对喷雾液滴撞击大豆叶片表面过程和结果进行了测试与分析。研究结果表明,产生沉积和回缩破碎两种状态时,液滴 K 值均小于 57.7;发生喷溅时,大部分液滴 K 值大于 57.7,但由于叶片表面密被长柔毛使得液滴在低撞击角度下易于喷溅,因此液滴在撞击角度为 28°和 44°时 K 值小于 57.7。液滴在沉积过程中,在相同粒径和撞击角度下,液滴撞击速度越高最大铺展越大,铺展时间也越长,但撞击速度高和撞击速度低的液滴最终铺展比接近。沉积部位对液滴铺展过程和结果有重要影响。液滴在回缩破碎过程中,在表面张力的回缩和叶片表面的粘滞作用下分离破碎,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,均匀破碎的液滴其合计最终铺展比比不均匀破碎的液滴大。当撞击 We 数较高时,喷溅液滴将呈现喷射成串小液滴的状态;当撞击 We 数较低时,喷溅液滴将呈现喷射单独的 2~3 个大液滴的状态。喷射出成串小液滴后的液滴主体部分最终铺展比比喷射出单独大液滴后的液滴主体部分大。

关键词:喷雾　液滴　沉积　回缩破碎　摊铺比　撞击速度

中图分类号:S49　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2013)12-0087-07

Impact of Spray Droplet on Soybean Leaf Surface

Jia Weidong[1]　Zhu Heping[2]　Dong Xiang[3]　Xue Fei[1]

(1. *Key Laboratory of Morden Agricultural Equipment and Technology*, *Ministry of Education*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*
2. *USDA-ARS*, *Wooster OH* 44691, *USA*　3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: This study used two high-speed digital cameras to test and analyze the process and result of spray droplet impact on the soybean leaf surface. The result showed that when spray droplets were deposited and rebound broken, K values were less than 57.7. When splashing, K values of the most droplets were more than 57.7 because of the dense pilose of the leaf surface. The droplets were splashed easily at a low impact angle. K values were less than 57.7 when impact angles were 28° and 44°. Considering the same particle size and impact angle in the deposited droplets, the maximum spreading increased and the spreading time prolonged with increasing impact velocity. The final maximum spreading ratio of the high impact velocity was close to the low impact velocity. Deposit locations significantly influenced the process and result of the droplet spreading. In the process of receding break up, the droplets separated and were broken under the rebound action of the surface tension and viscosity of the leaf surface. Compared with the droplets deposited on the leaf surface, the total final maximum spreading ratio of the droplets enlarged greatly after receding break up. The total final maximum spreading ratio of uniform droplets was larger than that of nonuniform droplets. When Weber number (We) of the impact was high, the spray droplets appeared as a series of small droplets. When We was low, the spray droplets

收稿日期:2013-06-25　修回日期:2013-07-11

*国家自然科学基金资助项目(50975125)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2011048)、科技支疆计划资助项目(2013BA044)、镇江市科技支撑计划资助项目(NY2012030)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:贾卫东,副研究员,博士后,主要从事两相流理论和精确施药技术研究,E-mail:jiaweidong@ujs.edu.cn

appeared as two to three large droplets. The final maximum spreading ratio of the main body of the droplets after spraying a series of small droplets was larger than that when individual large droplets are sprayed.

Key words: Spray Droplet Deposited Rebound broken Spreading ratio Impact velocity

引言

液滴在撞击固体界面并铺展后将产生反弹、沉积、收缩破碎和喷溅等状态[1]。在喷雾施药中,希望药液液滴尽可能地沉积和附着于叶片表面。而喷雾药液在叶片界面上所处状态取决于许多因素,其中液滴的表面张力和药液粘度、在叶片上的接触角和湿润能力、液滴撞击叶片前的速度、角度和粒径等参数是极其重要的。因此,液滴在叶片表面铺展后的存在状态与其撞击植株靶标界面的动力学过程密切关联,因而对雾滴撞击植株靶标界面过程进行深入研究具有重要的科学和实际意义。

一直以来,理论分析、数值计算和实验研究的方法被应用于液滴撞击界面的动力学过程。理论方法是采用能量平衡与转换模型计算液滴到达固体界面后的最大铺展直径[2~4]。数值计算是利用计算流体力学(Computational fluid dynamics)的方法和手段模拟液滴撞击固体界面过程。在实验研究方面,主要应用 3 种测试装备研究液滴撞击固体界面过程:相位多普勒干涉法(Phase doppler interferometry,PDI),相位多普勒粒子分析仪(Phase doppler particle analyzer, PDPA)和应用最为广泛的 CCD (Charge-coupled device)相机[5~7]。人们应用 CCD 相机对液滴撞击固体界面过程进行记录,对液滴在界面的铺展直径和铺展比进行测量,以及对铺展过程进行分析[8~10]。

在农业工程领域,有少量有关药液液滴撞击叶片界面过程的实验研究工作的报道。也有有关药液液滴在叶片上铺展过程的研究。Donald 等使用摄像系统对雾滴撞击植物叶面进行了研究,结果表明液滴撞击到卷心菜叶上会发生反弹现象,在卷心菜叶和小麦叶上发生反弹的雾滴比黄豆叶和狐尾草上的大[11]。Weidong 等提出了适合液滴撞击过程测量的 PDPA 测试方法,并对荷电液滴群撞击八爪金盘叶片过程进行了测试,认为单液滴撞击界面后产生粘附或反弹的判据 K 的临界值不适于荷电雾滴群的撞击过程,而法向 Weber 数的值 30 可作为发生反弹现象的参考依据;较大的切向速度能够造成荷电液滴撞击植株界面后反弹现象的发生[7]。在农药剂型研究方面,也有有关药液液滴在叶片上铺展过程的研究。邱占奎等提出在低容量喷雾防治小麦蚜虫时,添加有机硅表面活性剂可降低药液的表面张力和叶片接触角,有利于提高药液的有效利用率[12]。Williams 认为低浓度高分子水溶液能提高雾滴拉伸粘度而使其粒径值增大,并对雾滴反弹产生较大影响[13]。

文献表明,在精确施药技术领域,尽管喷雾药液液滴撞击植株叶片上的过程和结果非常重要,但这方面的研究却非常少而零散。为此,本文利用两台高速数码摄像机对液滴撞击大豆叶片表面过程进行测试。

1 材料和方法

1.1 实验系统

实验系统由可产生相同粒径的液滴发生器、供液装置、水平移动机构、图像采集系统、液滴运动分析软件和靶标支撑架等部分组成(图 1)。详细的实验系统参数见文献[14]。利用该实验系统可以详细记录液滴撞击叶片表面前、后的运动状态,并可获得撞击速度和角度、粒径、撞击叶片后的最大铺展比以及叶片表面细微结构等参数和信息。

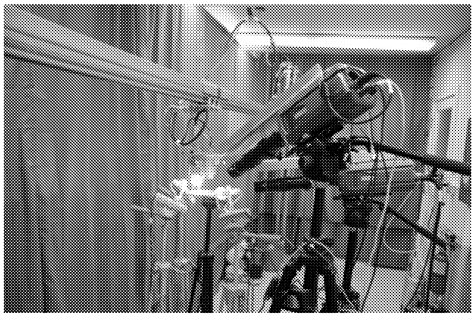


图 1 液滴撞击大豆叶片表面过程的实验系统

Fig. 1 Testing system of droplets impacting soybean leaf surface

图像采集系统由两台高速数码摄像机和光源组成。利用两台高速数码摄像机(幻影 V310s 型,美国 Vision Research 公司)捕捉液滴撞击叶片表面的运动过程,可同时获得主视图和侧视图两张图片。这与单台 CCD 相机测试比较,能够得到更加精确的液滴撞击细节和更加准确的液滴运动参数。实验测试时拍摄速度为 11 700 帧/s,此时的图像分辨率为 512 像素 ×512 像素,拍摄到的液滴运动图像通过路由器传输到计算机硬盘保存。采用两组长焦微距镜

头(K2/SCTM 型,美国 Infinity Photo-Optical 公司),焦距分别为 222 mm 和 418 mm,对应的视界分别为 17.2 mm × 10.75 mm 和 36 mm × 22.5 mm。采用 4 个卤素灯光源(MR16 EYF/FG 型,美国 Ushio 公司)为拍摄液滴撞击叶片表面过程提供照明。每次测试前,利用已知尺寸的阶梯型模块对图像采集系统进行标定。

1.2　测试方法

从侧视图中测量出液滴撞击叶片前的粒径 d 和撞击后随时间变化的铺展直径 D,即可得到铺展比,$\delta = d/D$。撞击速度 u 由液滴在连续成像中的相对位置除以间隔时间获得,撞击角度 α 由切向和法向撞击速度计算获得。由此可计算出液滴撞击叶片前的 We 数、Re 数和判断液滴沉积、喷溅和反弹现象的 Sommerfeld 数 K。

$$We = \frac{\rho u^2 d}{\sigma} \tag{1}$$

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \tag{2}$$

$$K = \sqrt{We}\ \sqrt{Re} \tag{3}$$

式中　ρ——液体密度　　σ——液体表面张力

μ——液体动力粘度

本文中撞击角度 α 的范围为 28° ~ 74°,We 数的范围为 25 ~ 628,Re 数的范围为 533 ~ 5 253。

实验所拍摄的撞击过程是一个十分短暂的时间,可以忽略过程中液体的蒸发和被植物叶面的吸收,假设系统是一个绝热环境。实验具体条件包括:环境温度 26℃,相对湿度 70%　,实验介质为蒸馏水。植株靶标表面选择美国广泛种植的大豆叶片,生长期 2 个月,液滴在其表面上的静态接触角 θ 为 26.5°,表面长柔毛平均高度为 670 μm。每次实验选取大豆叶片固定于载玻片上,载玻片置于靶标支撑架上;为 CCD 拍摄液滴撞击叶片表面过程提供照明的 4 个光源布置于靶标支撑架两边,距离叶片 60 ~ 100 mm、距叶片高 20 mm,水平向下倾角为 25°,如图 2 所示。

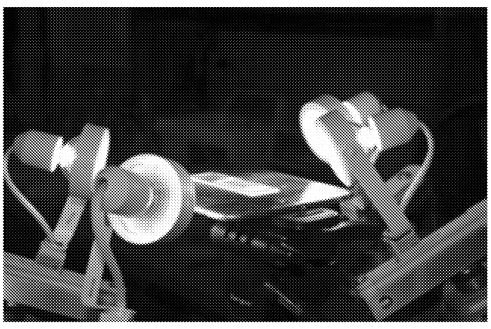


图 2　光源与叶片摆放位置

Fig. 2　Positions of four light fixtures and target leaf

2　结果及讨论

2.1　可视化撞击过程

液滴撞击叶片表面后,呈现出沉积、收缩破碎和喷溅 3 种结果,未发现反弹行为。图 3 为液滴撞击大豆叶片表面后的沉积过程。从 t = 0 ms(图 3a)开始液滴向叶片表面运动,至 t = 0.513 ms(图 3b)到达。随即是沉积过程,在 0.598 ~ 2.735 ms 时间段内,液滴受惯性力、表面张力和重力的影响,经过铺展(图 3c ~ 3e)、收缩(图 3f)、再铺展(图 3g)、再收缩(图 3h)直至稳定地沉积于叶片表面(图 3i),此时液滴的铺展直径不再发生变化。

图 4 为液滴撞击大豆叶片表面后的回缩破碎过程。液滴到达叶片表面后(图 4b),铺展至最大直径(图 4c),在表面张力的回缩和叶片表面的粘滞作用下开始分离,至 t = 0.940 ms 时破碎成 3 个小液滴(图 4d)。经过分别铺展后(图 4e),至 t = 1.624 ms 时(图 4f),3 个液滴稳定附着于叶片。

图 5 为液滴撞击大豆叶片表面后的喷溅过程。液滴到达叶片表面后(图 5b),先是铺展至最大直径(图 5c),在 t = 1.026 ~ 1.709 ms 时间段内(图 5d ~ 5g)液滴向其撞击方向前方喷溅出几个小液滴。而喷溅出小液滴后的主体部分则经历了铺展、收缩过程(图 5h ~ 5k),至 t = 3.333 ms 时(图 5l)处于稳定沉积于叶片表面的状态。

2.2　不同撞击结果下的 K 值分布

Mundo 等提出,如果 K 值超过了临界值 57.7,液滴撞击固体界面后将发生喷溅,如果没有超过则为沉积或反弹[15]。Mundo 等同时认为,该临界值与固体表面的粗糙度有关,临界值随着表面粗糙度的降低而增加[16]。本研究结果有所不同,图 6 为液滴撞击叶片表面后 3 种结果下 K 值随撞击角度变化的分布。由图 6 可知,液滴撞击叶片表面后,产生沉积和回缩破碎 2 种结果时,其 K 值均小于 57.7。而液滴产生喷溅时,在撞击角度为 28°和 44°时 K 值均小于 57.7,分别为 49 和 53。本文认为,由于叶片表面的结构特征,尤其是表面密被长柔毛(平均高度 670 μm)对液滴撞击过程和结果产生影响,使得液滴在低撞击角度下易于喷溅。

2.3　液滴沉积

2.3.1　撞击速度对液滴铺展过程的影响

图 7 为沉积于叶片的液滴在不同撞击速度下的铺展状态(横坐标时间 0 ms 是指液滴开始接触叶片,下同)。在液滴粒径和撞击角度相同的情况下,由于速度不同其铺展沉积过程不同。液滴撞击速度越高,最大铺展越大。在惯性力作用下,撞击速度高

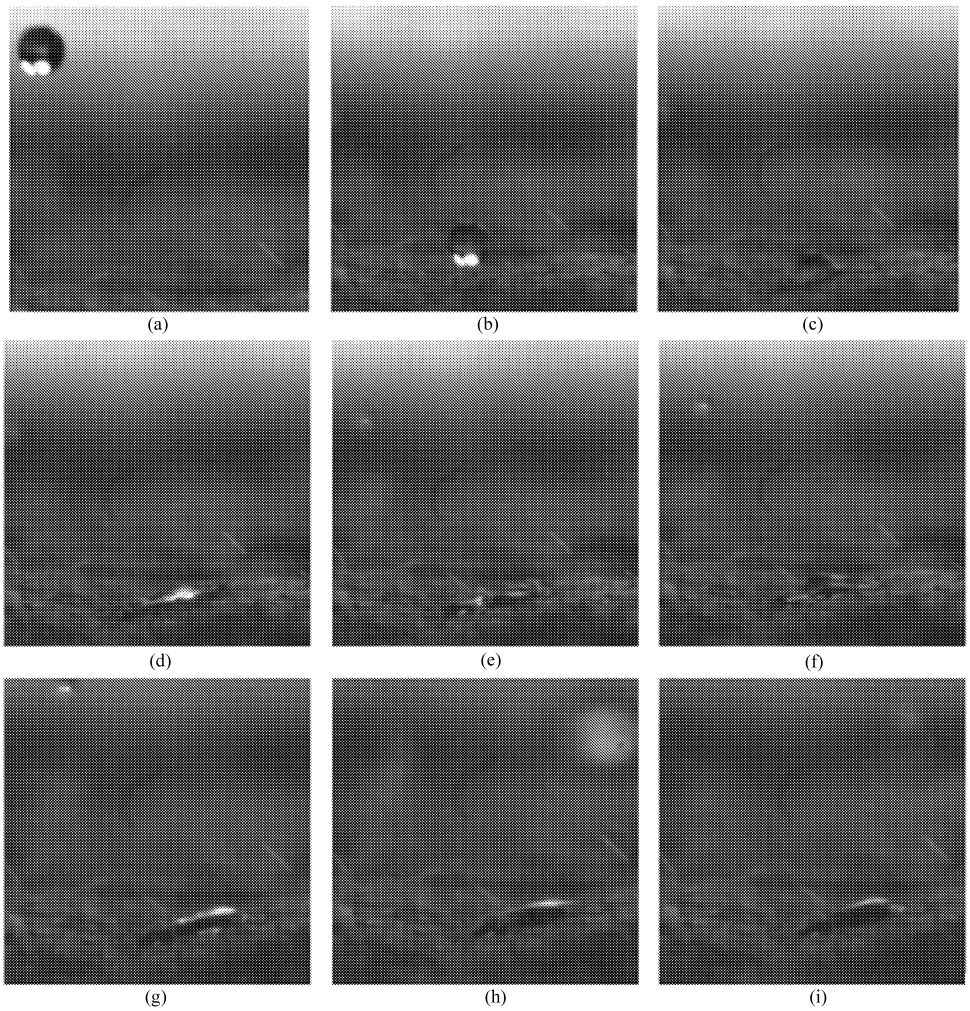


图 3 液滴撞击大豆叶片表面的沉积过程(u = 3.78 m/s, d = 358 μm, α = 57°)

Fig. 3 Deposition process of droplet impact on soybean leaf surface (u = 3.78 m/s, d = 358 μm, α = 57°)

(a) t = 0 ms (b) t = 0.513 ms (c) t = 0.598 ms (d) t = 0.684 ms (e) t = 1.111 ms (f) t = 1.368 ms (g) t = 1.709 ms (h) t = 2.051 ms (i) t = 2.735 ms

的液滴在叶片上的铺展时间长。由于表面张力和重力的共同作用,使得 2 个液滴在铺展中均呈现多次交替铺展、收缩状态。在稳定沉积后,2 个液滴的铺展比接近。

2.3.2 撞击部位对液滴铺展过程的影响

图 8 为液滴撞击叶片表面后沉积的不同部位。

图 9 为撞击部位对液滴铺展过程的影响。由图 9 可知,沉积于叶片的液滴由于所处叶片的部位不同,其铺展状态也不一样。尽管沉积于叶片斜面处的液滴最大铺展比最小,但至铺展过程结束时,其铺展比最大。而处于平面处的液滴铺展过程和处于斜面的液滴正好相反。处于叶脉处的液滴则处于二者之间,即最大铺展比和最终铺展比均为中间值。

2.4 液滴回缩破碎

图 10 为 1 个液滴收缩破碎成 2 个液滴的过程。图 10 显示,液滴达最大铺展直径后,在表面张力的回缩和叶片表面的粘滞作用下开始分离破碎,分成 1 个较大液滴和 1 个较小液滴。图 11 为 1 个液滴分成 3 个大小接近的小液滴。这两种状态下,液滴收缩破碎后在叶片上的铺展面积是有差别的。

表 1 为不同撞击结果下的最终铺展比比较。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。

2.5 液滴喷溅后主体部分的摊铺比

液滴撞击叶片表面后,形成喷溅的液滴将呈现出 2 种状态(图 12),一是达到最大铺展后,从液滴主体中喷射出成串的小液滴(一般 5 ~ 8 个);另一种是从液滴主体喷射出单独的2 ~ 3 个大液滴。

表 2 为液滴喷浅后主体部分的铺展比。由表 2 可以看出,当撞击 We 数较高时(大于 100),喷溅液滴将呈现喷射成串小液滴的状态;当撞击 We 数较低时(小于 100),喷溅液滴将呈现喷射单独的 2 ~ 3 个大液滴的状态。喷射出成串小液滴后的液滴主体部

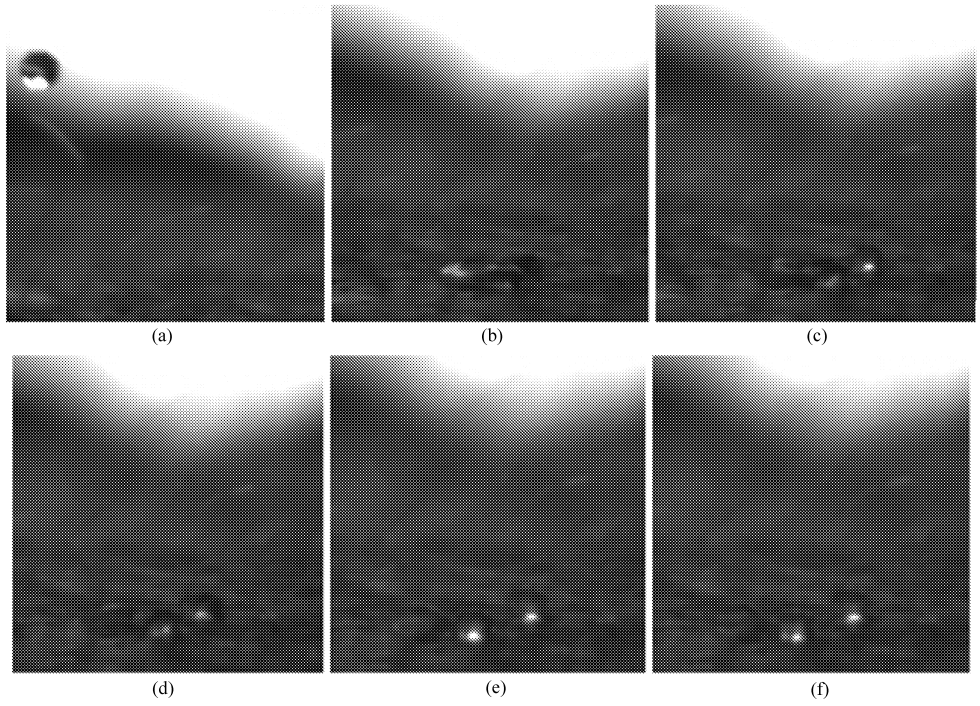


图 4　液滴撞击大豆叶片表面的回缩破碎过程($u=3.96$ m/s,$d=241$ μm,$\alpha=47°$)

Fig. 4　Receding break up process as droplet impactson soybean leaf surface ($u=3.96$ m/s, $d=241$ μm, $\alpha=47°$)

(a) $t=0$ ms　(b) $t=0.599$ ms　(c) $t=0.854$ ms　(d) $t=0.940$ ms　(e) $t=1.282$ ms　(f) $t=1.624$ ms

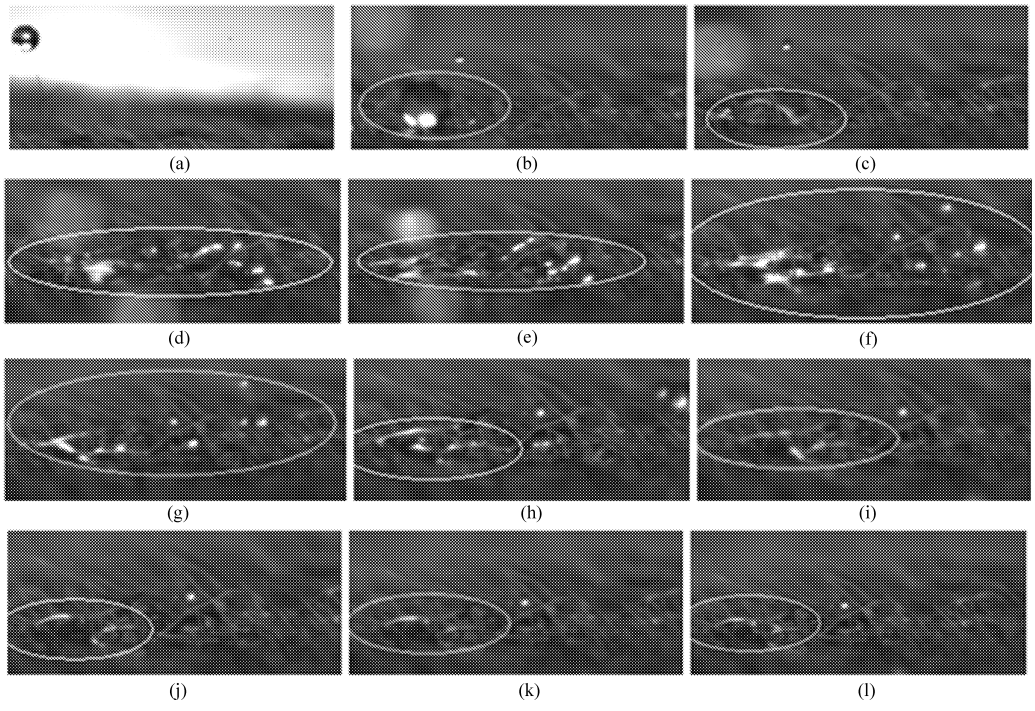


图 5　液滴撞击大豆叶片表面的喷溅过程($u=4.75$ m/s,$d=528$ μm,$\alpha=57°$)

Fig. 5　Splashing process as droplet impactson soybean leaf surface ($u=4.75$ m/s, $d=528$ μm, $\alpha=57°$)

(a) $t=0$ ms　(b) $t=0.684$ ms　(c) $t=0.769$ ms　(d) $t=1.026$ ms　(e) $t=1.197$ ms　(f) $t=1.453$ ms

(g) $t=1.709$ ms　(h) $t=2.222$ ms　(i) $t=2.393$ ms　(j) $t=2.821$ ms　(k) $t=3.162$ ms　(l) $t=3.333$ ms

分最终铺展要比喷射出单独大液滴后的液滴主体部分大。

3　结论

(1) 液滴撞击大豆叶片表面后,呈现出沉积、收缩破碎和喷溅 3 种状态,未发现反弹行为。液滴在沉积过程中,由于表面张力和重力的共同作用,使得液滴在铺展中呈现多次交替铺展、收缩状态,直至最终稳定。液滴在回缩破碎过程中,在表面张力的回缩和叶片表面的粘滞作用下分离破碎,破碎液滴至

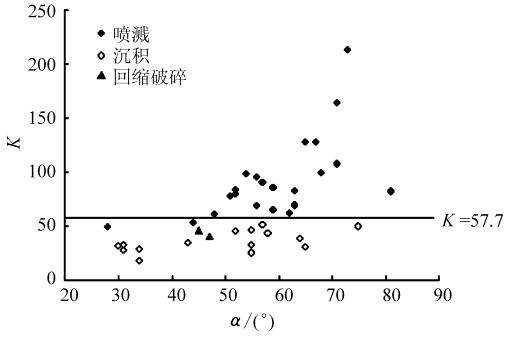


图 6 液滴撞击叶片表面后 3 种结果下的 K 值随角度变化的分布

Fig. 6 Distribution of K value changes with impact angle in three results after droplet impact on leaf surface

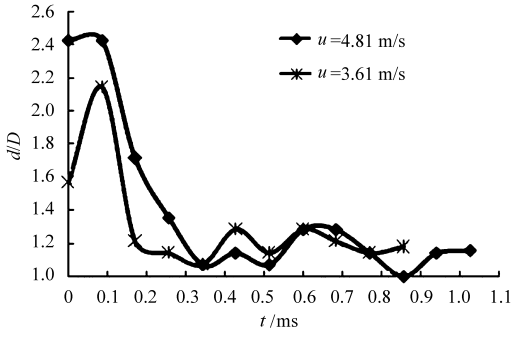


图 7 撞击速度对液滴铺展过程的影响(d = 210 μm, α = 55°)

Fig. 7 Influence of impact velocity on droplet spreading (d = 210 μm, α = 55°)

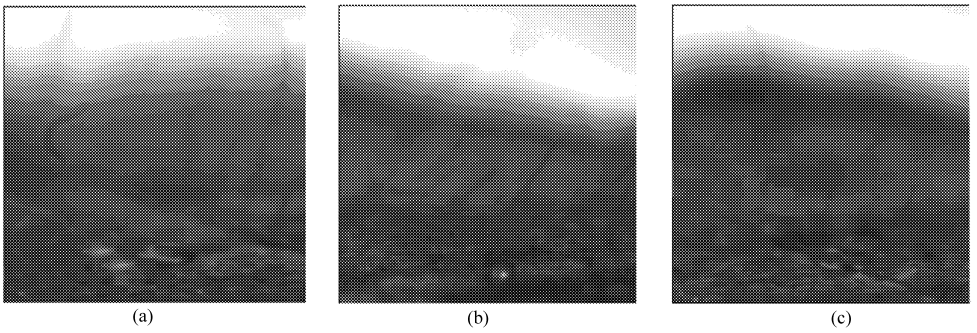


图 8 液滴撞击叶片表面后沉积不同部位

Fig. 8 Droplet deposition in different sites after impact on leaf surface

(a) 液滴沉积于斜面(We = 48) (b) 液滴沉积于平面(We = 25) (c) 液滴沉积于叶脉(We = 59)

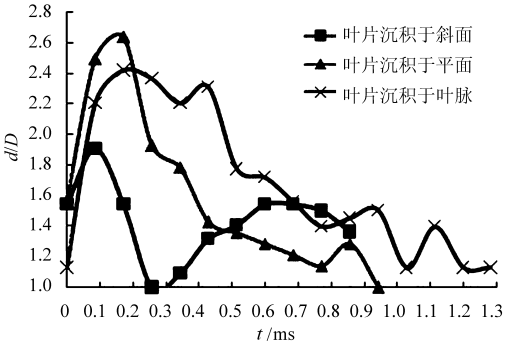


图 9 撞击部位对液滴铺展过程的影响

Fig. 9 Influence of impact site on droplet spreading

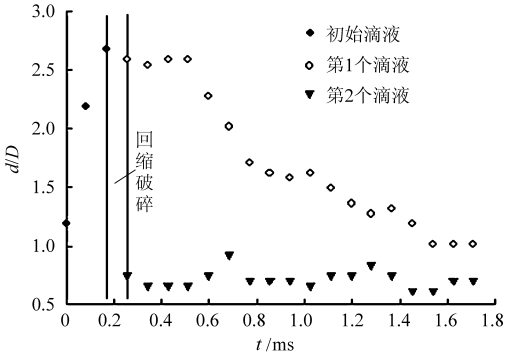


图 10 1 个液滴收缩破碎成 2 个液滴的过程(u = 4.21 m/s, d = 255 μm, α = 52°)

Fig. 10 Receding break-up process of droplet into two droplets (u = 4.21 m/s, d = 255 μm, α = 52°)

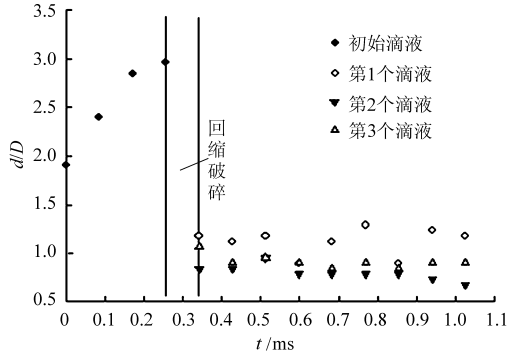


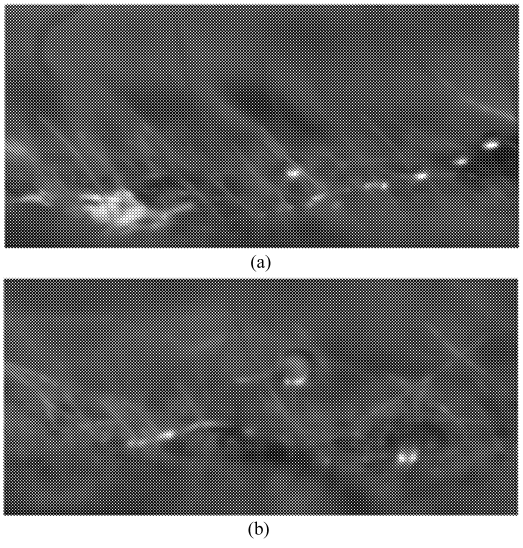
图 11 1 个液滴收缩破碎成 3 个液滴的过程(u = 3.96 m/s, d = 241 μm, α = 47°)

Fig. 11 Receding break-up process of a droplet into three droplets (u = 3.96 m/s, d = 241 μm, α = 47°)

表 1 不同撞击结果下的最终铺展比比较

Tab. 1 Comparison of final spreading ratio under different impact results

撞击 We 数	撞击结果	最终铺展比	合计最终铺展比
61	沉积	δ = 1.21	δ = 1.21
62	回缩破碎成 2 个液滴	δ_1 = 1.01 δ_2 = 0.70	$\delta_1 + \delta_2$ = 1.71
52	回缩破碎成 3 个液滴	δ_1 = 1.17 δ_2 = 0.67 δ_3 = 0.89	$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ = 2.73



(a)　(b)

图 12　喷溅液滴两种状态

Fig. 12　Two states of splashing droplet

(a) 喷射出成串的小液滴　(b) 喷射出单独的 2 至 3 个大液滴

稳定状态后沉积于叶片表面；液滴在喷溅过程，在铺展至最大直径后向其撞击方向前方喷溅出数个小液滴，喷溅出小液滴后的主体部分经历了铺展、收缩过程后处于稳定的沉积于叶片表面的状态。

（2）液滴撞击界面后，产生沉积和回缩破碎 2 种状态时，其 K 值均小于 57.7。液滴产生喷溅时，大部分液滴其 K 值大于 57.7，但在撞击角度为 28° 和 44°时 K 值小于 57.7。本文认为，叶片表面密被长柔毛对液滴撞击过程和结果产生了影响，使得液滴在低撞击角度下易于喷溅。

表 2　液滴喷溅后主体部分的铺展比

Tab. 2　Spreading ratio of the main body of droplets after splashing

撞击 We 数	撞击结果	主体部分最终铺展比
227.6	喷射出 7 个小液滴	3.03
183.6	喷射出 5 个小液滴	2.87
60.9	喷射出 2 个较大液滴	2.05
70.0	喷射出 3 个较大液滴	1.90

（3）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，最大铺展比越大。在惯性力作用下，撞击速度高的液滴在叶片上的铺展时间长，但最终铺展比接近。沉积部位对液滴铺展过程和结果有重要影响。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。当撞击 We 数较高时，喷溅液滴将呈现喷射成串小液滴的状态；当撞击 We 数较低时，喷溅液滴将呈现喷射单独的 2～3 个大液滴的状态。喷射出成串小液滴后的液滴主体部分最终铺展要比喷射出单独大液滴后的液滴主体部分大。

参　考　文　献

1　Rioboo R, Tropea C, Marengo M. Outcomes from a drop impact on solid surfaces[J]. Atomization and Sprays, 2001, 11(2): 155～165.

2　Chandra S, Avedisian C T. On the collision of a droplet with a solid surface[J]. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 1991, 432(1884): 13～41.

3　Pasandideh-Fard M, Qiao Y M, Chandra S, et al. Capillary ects during droplet impact on a solid surface[J]. Physics of Fluids, 1996, 8(3): 650～659.

4　Fukai J, Tanaka M, Miyatake O. Maximum spreading of liquid droplets colliding with flat surfaces[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1998, 31(3): 456～461.

5　Yoon S S, DesJardin P E, Presseret C, et al. Numerical modeling and experimental measurements of water spray impact and transport over a cylinder[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(1): 132～157.

6　Gupta A, Kumar R. Droplet impingement and breakup on a dry surface[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(9): 1 696～1 703.

7　贾卫东，薛飞，李成，等. 荷电雾滴群撞击界面过程的 PDPA 测试[J]. 农业机械学报，2012，43(8)：78～82.
Jia Weidong, Xue Fei, Li Cheng, et al. Measurement of charged droplets impacting plant target interface by using PDPA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 78～82. (in Chinese)

8　Gatne K P, Jog M A, Manglik R M. Surfactant-induced modification of low Weber number droplet impact dynamics[J]. Langmuir, 2009, 25(14): 8 122～8 130.

9　Ryu S U, Lee S Y. Maximum spreading of electrically charged droplets impacting on dielectric substrates[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(1): 1～7.

10　Park H, Carr W W, Zhu Junyong, et al. Single drop impaction on a solid surface[J]. AICHE Journal-fluid Mechanics and Transport Phenomena, 2003, 49(10): 2 461～2 471.

11　Reichard D L, Cooper J A, Bukovac M J, et al. Using a videographic system to assess spray droplet impaction and reflection from leaf and artificial surface[J]. Pesticide Science, 1998, 53(4): 291～299.

12　邱占奎，袁会珠，李永平，等. 添加有机硅表面活性剂对低容量喷雾防治小麦蚜虫的影响[J]. 植物保护，2006，32(2)：34～37.

13　Williams P A, English R J, Blanchard R L, et al. The influence of the extensional viscosity of very low concentrations of high molecular mass water-soluble polymers on atomisation and droplet impact[J]. Pest Management Science, 2008, 64(5): 497～504.

(下转第 113 页)

Jiang Huailong, Li Yixue, Zhao Qianqian. County-scale spatial variability of soil organic matter distribution and determination of reasonable sampling density [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4): 143 ~ 146. (in Chinese)

8 胡克林, 余艳, 张凤荣, 等. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4): 764 ~ 771.
Hu Kelin, Yu Yan, Zhang Feirong, et al. The spatial-temporal variability of soil organic matter and its influencing factors in suburban area of Beijing [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(4): 764 ~ 771. (in Chinese)

9 Hu Kelin, Li Hong, Li Baoguo. Spatial and temporal patterns of soil organic matter in the urban-rural transition zone of Beijing [J]. Geoderma, 2007, 141(3 ~ 4): 302 ~ 310.

10 彭陶, 吕新. 绿洲棉田土壤有机质的时空变异性研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 563 ~ 567.
Peng Tao, Lü Xin. Study on spatio-temporal variation of soil organic matter in oasis cotton field [J]. Chinese Journal of Soil Science,2010,41(3): 563 ~ 567. (in Chinese)

11 白雪,王文杰,王维, 等. 浙江省宁波市土壤有机质的时空变异特征[J]. 环境科学研究, 2010, 23(2): 191 ~ 197.
Bai Xue, Wang Wenjie, Wang Wei, et al. Spatio-temporal variability characteristics of soil organic matter in Ningbo City, Zhejiang Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(2): 191 ~ 197. (in Chinese)

12 Li Hong, Parent L E, Karam A, et al. Potential of sphagnum peat for improving soil organic matter pool, water holding capacity, bulk density and potato yield in a sandy soil[J]. Plant and Soil, 2004, 265(1): 353 ~ 363.

13 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.

14 Baxter S J, Oliver M A. The spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using elevation [J]. Geoderma, 2005, 128 (3 ~ 4): 325 ~ 339.

15 Herbst M, Diekkruger B, Vereecken H. Geostatistical coregionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes [J]. Geoderma,2006, 132 (1 ~ 2): 206 ~ 221.

16 Simbahan G C, Dobermann A, Goovaerts P, et al. Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data [J]. Geoderma, 2006, 132(3 ~ 4): 471 ~ 489.

17 Zhang Shiwen, Huang Yuanfang, Shen Chongyang, et al. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information [J]. Geoderma, 2012, 171 ~ 172: 35 ~ 43.

18 赵永存, 史学正, 丁东升, 等. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 379 ~ 385.
Zhao Yongcun, Shi Xuezheng, Ding Dongsheng, et al. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei Province, China[J]. Acta pedologica sinica, 2005, 42(3): 379 ~ 385. (in Chinese)

19 Goovaerts P. Geostatistics for natural resource evaluation [M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.

20 Webster R, Oliver M. Geostatistics for environmental scientists [M]. UK: John Wiley & Sons, LTD., 2001.

21 Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives [J]. Geoderma, 1999, 89(1 ~ 2): 1 ~ 45.

22 王政权. 地质统计学及其生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

23 Blackmore S. The interpretation of trends form multiple yieldmaps [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(1): 37 ~ 51.

24 陈翠英, 江永真, 袁朝春. 土壤特性空间变异性研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 121 ~ 124.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen, Yuan Chaochun. Study on soil property spatial variability using R language[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 121 ~ 124. (in Chinese)

25 张世文, 王胜涛, 刘娜, 等. 土壤质地空间预测方法比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 332 ~ 339.
Zhang Shiwen, Wang Shengtao, Liu Na, et al. Comparison of spatial prediction method for soil texture[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 332 ~ 339. (in Chinese)

26 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

27 McGrath D, Zhang C S. Spatial distribution of soil organic carbon concentrations in grassland of Ireland [J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(10): 1 629 ~ 1 639.

(上接第 93 页)

14 Dong Xiang, Zhu Heping, Yang Xuejun, et al. System to investigate 3-D droplet impact on leaf surfaces[C]//Proceedings of the 2012 ASABE Annual International Meeting, 2012:1337317.

15 Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. Droplet-wallcollisions: experimental studies of the deformation and break up process[J]. Multiphase Flow,1995,21(2):151 ~ 173.

16 Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. On the modeling of liquid sprays impinging on surfaces[J]. Atomization and Sprays,1998, 8(6): 625 ~ 652.

17 王军锋,张娟娟,王贞涛,等. 风幕式气力辅助静电喷雾沉积特性 [J]. 农业机械学报,2012,43(2): 61 ~ 65.
Wang Junfeng, Zhang Juanjuan, Wang Zhentao, et al. Deposition and distribution characteristics of air-assisted electrostatic spraying by wind-curtain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (2): 61 ~ 65. (in Chinese)

18 Bussmann M, Chandra S, Mostaghimi J. Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface[J]. Physics of Fluids,2000, 12(6):3 121 ~ 3 132.