doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.02.018

液滴在柔性辣椒叶片表面撞击行为研究

王　松[1]　赵笑缘[1]　郜周明[1]　朱翠翠[1]　董　梁[1]　邱白晶[1,2]

(1.江苏大学农业工程学院,镇江 212013;2.江苏大学农业农村部植保工程重点实验室,镇江 212013)

摘要:液滴撞击叶片时会使叶片发生弯曲变形,这种变形会对液滴的撞击行为产生影响。基于前人液滴撞击刚性表面的理论模型,探究了液滴撞击柔性辣椒叶片时叶片弹性系数对液滴撞击行为的影响,考虑叶片弹性势能、液滴和叶片重力势能,建立了液滴撞击柔性辣椒叶片最大扩散因子数学预测模型。以液滴粒径、撞击速度、撞击点到叶尖距离占比为试验因素,对数学模型进行了合理性验证。结果表明:3 个因素对液滴粘附和飞溅均有显著性影响($P<0.05$)。数学模型对液滴撞击柔性辣椒叶片最大扩散因子预测误差在 10% 以内,但此误差会随着叶片弹性系数的增加而减小。液滴撞击柔性辣椒叶片没有发生反弹,和理论模型预测结果一致。液滴粘附时,叶片弹性系数与液滴达到最大扩散的时间呈负相关,与撞击刚性固定叶片相比,达到最大扩散的时间增加量在 0.5 ms 以内,最大扩散因子减小率在 25% 以内,传递给叶片弹性势能占初始总能量的比随着叶片弹性系数的增加呈现先减小后增大趋势。液滴飞溅时,在到叶尖距离占比的 20%、40%、60%、80% 处,与刚性叶片相比,飞溅临界值 K_{crit} 分别增加 16.202%、10.515%、6.508%、4.467%,说明叶片越靠近弹性系数小的区域,液滴越不容易飞溅。本文为液滴在柔性植物叶片上的撞击行为研究和喷雾参数选择提供了一种方法。

关键词:柔性辣椒叶片;弹性系数;撞击行为;最大扩散因子;液滴反弹预测;飞溅临界值

中图分类号:S49　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)02-0188-14　　**OSID**:

Impact Behavior of Droplets on Surface of Flexible Chili Leaves

WANG Song[1]　ZHAO Xiaoyuan[1]　GAO Zhouming[1]　ZHU Cuicui[1]　DONG Liang[1]　QIU Baijing[1,2]

(1. *College of Agricultural Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*
2. *Key Laboratory of Crop Protection Engineering*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Droplets will cause the blade to bend and deform when impacting the blade, and this deformation will affect the droplet impact behavior. Based on the previous theoretical model of droplet impact on rigid surfaces, the influence of blade elasticity coefficient on droplet impact behavior when droplet impacted on flexible chili blades was investigated, and the mathematical prediction model of the maximum diffusion factor of droplet impact on flexible chili leaves was established by taking into account the elastic potential energy of blades, and the gravitational potential energy of droplets and blades. The reasonableness of the mathematical model was verified with droplet particle size, impact velocity, and the percentage of the distance from the impact point to the leaf tip as experimental variables. The results showed that all three factors had a significant effect on droplet adhesion and splashing ($P<0.05$). The prediction error of the mathematical model for the maximum diffusion factor of droplet impact on flexible chili leaves was within 10%. When the droplet impacted the flexible chili blade without rebound consistent with theoretical model predictions and the droplet adheres, the size of the blade's elastic coefficient was negatively correlated with the time for the droplet to reach the maximum diffusion, and compared with the impact on the rigid fixed blade, the increase in time to reach the maximum diffusion was within 0.5 ms, and the reduction rate of the maximum diffusion factor was within 25%, and the ratio of elastic potential energy to the total initial energy transferred to the blade showed a trend of decreasing and then increasing with the increase in the blade elasticity coefficient, which showed a tendency to

收稿日期:2023-08-31　修回日期:2023-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(31971790)

作者简介:王松(1998—),男,硕士生,主要从事植保机械研究,E-mail:wangsong_9866@163.com

通信作者:邱白晶(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事植保机械研究,E-mail:qbj@ujs.edu.cn

decrease first and then increase. When the droplet splashed at 20%, 40%, 60%, 80% of the distance to the leaf tip, the splash critical value K_{crit} was increased by 16.202%, 10.515%, 6.508%, 4.467%, respectively, compared with the splash value of the rigid blade, which indicated that the closer the leaf was to the region where the blade elasticity coefficient was small, the droplet would be less likely to splash. The research result can provide a method for the study of droplet impact behavior on flexible plant leaves and spray parameter selection.

Key words: flexible chili leaves; elastic coefficient; impact behavior; maximum diffusion factor; droplet bounce prediction; splash boundary value

0　引言

我国是世界上最大的辣椒生产国之一[1-2]。而辣椒每年都会受到病虫害的影响而减产[3]。目前，尽管存在物理防治和生物防治的病虫害治理方式，但最主要也是最有效的病虫害防治方式还是农药喷洒[4]。在农药喷洒过程中，液滴到达叶片表面后会发生反弹、粘附、飞溅等现象，其中粘附会使液滴有效沉积在叶片表面，而反弹和飞溅使液滴脱离叶片表面，导致农药利用率降低[5]。因此，深入研究喷雾过程中液滴和靶标叶片表面相互作用的行为，对于提高喷雾效率、减少农药损失和减少环境污染具有重要意义[6]。

在液滴撞击靶标叶片过程中，影响液滴撞击行为的关键因素主要是靶标叶片表面和液滴的物理化学性质[7-9]。其中，液滴和靶标表面的相互作用过程对撞击行为有着决定性影响[10]。液滴撞击靶标表面时，先在动能的作用下扩散到最大可能扩散的区域，然后在表面张力的作用下发生破碎飞溅、反弹、收缩，收缩时又会在粘性力的作用下再扩散，再收缩，直至稳定[11-13]。目前，已经有许多学者对液滴撞击过程建立了数学模型，根据能量守恒原理分析了液滴的粘附、反弹和飞溅行为[13-16]，建立液滴撞击靶标表面后其最大扩散因子、反弹和飞溅的数学预测模型[13-16]。但是，大多研究只考虑了液滴的行为，忽略了由液滴撞击而产生的靶标叶片变化[13-19]。而针对液滴撞击靶标叶片后其对叶片行为产生影响的研究，多集中于研究叶片的特性[20-21]。对于叶片的弯曲特性和液滴撞击行为相互联系的研究较少。在实际场景下，液滴撞击靶标叶片后不仅液滴会发生变化，靶标叶片也会在液滴的作用下产生变化，而且此变化与植株的生物特性相关[22]。

本文基于前人液滴撞击刚性表面的理论和试验研究，考虑液滴撞击叶片过程中叶片的弯曲运动，增加对叶片弹性势能和液滴、叶片重力势能的引入，建立一种针对液滴-叶片系统能量平衡的数学模型，适用于液滴撞击柔性植物叶片的最大扩散因子和液滴反弹能量边界值的预测。同时以辣椒叶片为试验对象，通过理论和试验结合的方式，探究液滴在撞击柔性辣椒叶片的过程中，叶片弹性系数对液滴撞击行为的影响及其变化规律，以期为研究不同植物的最佳喷雾参数提供一种方法。

1　数学模型建立

数学模型的建立中忽略整个撞击过程中的液滴蒸发和叶片表面对液滴的吸收以及撞击过程中的热传递和热量消耗，假设液滴在整个撞击过程中，液滴-叶片系统内保持能量守恒。叶片受液滴撞击的过程可简化为液滴撞击弹簧支撑表面的过程[23]。考虑了液滴撞击过程中的表面能变化、动能变化、重力势能变化和叶片弹性势能变化。

1.1　柔性叶片上液滴最大扩散因子数学模型

将液滴撞击过程分为液滴接触叶片之前，液滴开始扩散到最大铺展，液滴在残余能量的作用下产生反弹、飞溅或者再收缩再扩散直至稳定 3 个阶段[13]。将液滴在叶面撞击点位置发生最大形变之处定义为液滴的最终扩散点和液滴-叶片系统的零势能点。在液滴达到稳定铺展面积时，液滴的最终扩散直径 D_T 可以通过液滴在叶片表面稳定的扩散直径求出。

撞击阶段 1：液滴接触辣椒叶片表面之前，此时液滴撞击能量由动能、表面能和重力势能以及叶片所具有的重力势能组成，即

$$E_1 = E_{k1} + E_{s1} + E_{p1} + E_{p2} \tag{1}$$

其中

$$E_{k1} = \frac{1}{2}\rho U^2\left(\frac{1}{6}\pi D_0^3\right) \tag{2}$$

$$E_{s1} = \sigma_{LG}\pi D_0^2 \tag{3}$$

$$E_{p1} = \rho\left(\frac{1}{6}\pi D_0^3\right)g\left(l_1 + \frac{D_0}{2\cos\alpha_1} - \frac{3D_T}{16\cos\alpha_2}\right) \tag{4}$$

$$E_{p2} = mgl_2 \tag{5}$$

式中　E_1——液滴-叶片系统初始能量，J

E_{k1}——液滴初始动能，J

E_{s1}——液滴初始表面能，J

E_{p1}——液滴重力势能，J

E_{p2}——叶片重力势能，J

ρ——液滴密度,kg/m^3

U——液滴撞击前速度,m/s

D_0——液滴初始粒径,m

σ_{LG}——液-气表面之间的表面张力,mN/m

g——重力加速度,m/s^2

l_1——液滴撞击点的垂直最大下落距离,m

l_2——叶片弯曲部分重心垂直下落距离,m

α_1——液滴撞击点与水平方向的初始夹角,(°)

α_2——叶片最大弯曲时液滴撞击点与水平方向的夹角,(°)

m——液滴撞击部分叶片质量,kg

撞击阶段 2:液滴接触叶片表面后开始扩散,直到扩散到最大铺展时,液滴动能为零,表面能达到最大,定义液滴最大扩散因子[13]

$$\beta = \frac{D_m}{D_0} \tag{6}$$

式中 D_m——液滴最大铺展直径,m

β——液滴最大扩散因子

撞击阶段 3:在达到最大铺展后,液滴在残余能量的作用下发生再收缩再扩散直至稳定,根据撞击的第 1 次铺展平均时间得到撞击前后的速度关系[24],得出残余能量为[12]

$$E_0 = (1 - e_0^2) E_{k1} \tag{7}$$

其中

$$e_0 = \left(\frac{m_b U^2}{m_i U_i^2}\right)^{0.5} \tag{8}$$

式中 E_0——达到最大铺展液滴时的残余能量,J

e_0——液滴恢复系数

m_i——液滴撞击后质量,kg

m_b——液滴撞击前质量,kg

U_i——液滴撞击后速度,m/s

液滴接触叶片后,叶片在液滴的作用下开始弯曲直至达到最大弹性势能时,叶片停止弯曲。阶段 1 到阶段 3 的整个撞击过程的能量守恒方程为

$$E_{k1} + E_{s1} + E_{p1} + E_{p2} = E_{p_k} + E_{s3} + D_{1\sim3} + E_0 \tag{9}$$

其中

$$E_{p_k} = \frac{1}{2} k l_1^2 \tag{10}$$

$$E_{s3} = \frac{1}{2}\pi D_T^2 \sigma_{LG} + \frac{\pi}{4} D_T^2 (\sigma_{SL} - \sigma_{SG}) \tag{11}$$

$$D_{1\sim3} = D_{1\sim2} + D_{2\sim3} \tag{12}$$

式中 E_{p_k}——叶片达到最大弯曲时的弹性势能,J

E_{s3}——液滴达到稳定阶段后的表面能,J

$D_{1\sim2}$——液滴从撞击阶段 1 到撞击阶段 2 的过程中粘性耗散的能量,J

$D_{2\sim3}$——液滴从撞击阶段 2 到撞击阶段 3 的过程中粘性耗散的能量,J

$D_{1\sim3}$——液滴从撞击阶段 1 到撞击阶段 3 的过程中粘性耗散的能量,J

k——叶片弹性系数,N/m

σ_{SG}——固-气表面之间的表面张力,mN/m

σ_{SL}——固-液表面之间的表面张力,mN/m

使用杨氏方程结合不同界面之间的表面张力,可得

$$\sigma_{LG}\cos\theta = \sigma_{SG} - \sigma_{SL} \tag{13}$$

式中 θ——辣椒叶片表面的液滴静态接触角,(°)

低粘度液体液滴撞击过程中的能量耗散方程为[13]

$$\frac{D_{1\sim2}}{\pi D_0^2 \sigma_{LG}} = 0.35 \frac{We}{\sqrt{Re}} \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 \tag{14}$$

$$\frac{D_{2\sim3}}{\pi D_0^2 \sigma_{LG}} = 0.12 \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^{2.3} (1 - \cos\theta)^{0.63} \tag{15}$$

式中 We——液滴撞击前韦伯数

Re——液滴撞击前雷诺数

将式(2)~(8)和式(10)~(15)代入式(9)得出液滴在柔性植物叶片表面上最大扩散因子的求解方程为

$$0.35 \frac{We}{\sqrt{Re}} \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 + 0.12(1 - \cos\theta)^{0.63} \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^{2.3} + \frac{1}{4}(2 - \cos\theta) \left(\frac{D_T}{D_0}\right)^2 + \frac{k l_1^2}{2\sigma_{LG}\pi D_0^2} + \frac{\rho g D_0 D_T}{32\sigma_{LG}\cos\alpha_2} - \left(\frac{We}{12} + 1 - \frac{E_0}{E_{s1}} + \frac{\rho g D_0^2}{12\sigma_{LG}\cos\alpha_1} + \frac{l_1 \rho g D_0}{6\sigma_{LG}} + \frac{m g l_2}{\sigma_{LG}\pi D_0^2}\right) = 0 \tag{16}$$

1.2 液滴撞击柔性叶片反弹数学预测模型

阶段 r:这是阶段 3 假设的理想状态,用于衡量液滴撞击后的反弹。液滴在撞击平面发生扩散后,表面能使液滴产生恢复其原来形态的趋势。假设的理想状态是液滴完全反弹后停留在叶片表面上方的瞬间,近似认为液滴恢复到原来的球形[13]。此时液滴总冲击能为 E_r,表面能为 S_r,计算公式为

$$S_r = S_{r,LG} = \pi D_0^2 \sigma_{LG} \tag{17}$$

$$E_r \approx S_r = \pi D_0^2 \sigma_{LG} \tag{18}$$

式中 $S_{r,LG}$——反弹时液滴表面能,J

当液滴达到最大铺展时,所具有的能量[22]为

$$E_2 = \left[\frac{\pi}{4} D_m^2 (1 - \cos\theta) + \frac{2}{3}\pi \frac{D_0^3}{D_m}\right] \sigma_{LG} \tag{19}$$

式中 E_2——液滴达到最大铺展时液滴-叶片系统具有的能量,J

液滴发生反弹时,可以忽略液滴重力势能变化,反弹标准可以定义为

$$E_{ERE}^* = \frac{E_2 + E_{p2} - D_{2\sim3} - E_{p_k} - E_r}{E_r} > 0 \tag{20}$$

式中　E_{ERE}^{*}——相对剩余能量

将式(5)、(10)、(15)、(18)、(19)代入式(20)得液滴在柔性叶片表面反弹预测模型为

$$\frac{1}{4}\left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2(1-\cos\theta)-0.12\left(\frac{D_m}{D_0}\right)^{2.3}(1-\cos\theta)^{0.63}+\frac{mgl_2}{\pi\sigma_{LG}D_0^2}+\frac{2}{3}\frac{D_0}{D_m}-1-\frac{kl_1^2}{2\pi\sigma_{LG}D_0^2}>0 \qquad (21)$$

2　材料与方法

2.1　试验材料

试验对象为牛角辣椒，在江苏省镇江市温室内培养 90 d，试验前 10 d 内测得温室平均温度为(26 ± 6)℃，空气相对湿度为 57% ~ 72%。试验选择生长良好、无任何病虫害的 10 株生长良好的辣椒植株，每株选择 3 片发育良好的叶片作为试验对象。试验前，将植株放置于试验环境内 48 h 以上，使辣椒植株适应试验环境，尽量减小叶片在试验过程中由于生物力学变化引起的叶片变形，给辣椒植株补充充足的水分，保证叶片的状态良好。由于温度和湿度的急剧变化会影响叶片的物理状态和叶片的干物质占比[25-27]，为了使试验数据能够更好地用于指导实践，所有试验全程在实验室内进行，保证试验时的环境尽量符合辣椒植株的实际生长状况。试验前使用恒温空调(温度精度为 ±1℃，相对湿度精度为 ±5%)控制实验室温度和湿度保持在辣椒培养时正常生长的范围内 6 h 以上，选择空气温度 26℃，空气相对湿度 65%。

为探究真实喷雾状态下液滴在叶片表面的撞击行为，试验时保证叶片在植株上的正常生长状态，并且控制撞击点和参数测量点在同一位置。本文依据文献[28]按距离对玉米叶片进行划分测量叶片的弹性系数，探究弹性系数对液滴撞击行为的影响，并额外考虑辣椒叶片长度范围，同时由于同一品种的辣椒其发育机制相同，小叶片和大叶片之间近似按比例放大或缩小[29]。为保证液滴撞击叶片铺展过程不会外溢，最终选择按撞击点到叶尖距离占比将叶片划分为 0 ~ 20%、20% ~ 40%、40% ~ 60%、60% ~ 80% 共 4 个部位，如图 1 所示。

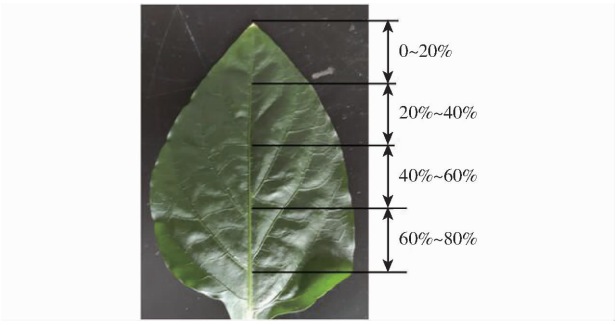

图 1　叶片不同部位划分

Fig. 1　Division of different parts of blade



图 2　液滴撞击柔性辣椒叶片试验布置

Fig. 2　Droplet impact on flexible chili leaf test layout

1. 铁架台　2. 铅垂线　3、7. 升降台　4. 试验叶片　5. 高速摄像机　6. 显示器　8. 注射泵　9. 高亮光源　10. 注射针头

2.2　液滴在辣椒叶片表面撞击行为试验

2.2.1　液滴在柔性辣椒叶片表面撞击行为试验

液滴撞击柔性辣椒叶片的试验装置如图 2 所示。采用蒸馏水作为试验材料，通过使用注射泵推动注射器，液体通过针头在针尖形成单个液滴，使其在重力作用下分离并下落。试验全程在密闭的实验室内进行，避免空气流动对液滴下落产生影响。使用高速摄像机(OLYMPUS I - Speed 3 型，美国 Navitar 公司)记录液滴的撞击行为，使用 OSRAM 高亮度光源(230 V，1 000 W)辅助拍摄。摄像机帧率设置为 5 000 f/s，分辨率为 1 024 像素 × 512 像素，镜头与水平面夹角为 15°，与叶片的水平距离为 932 mm。试验开始前使用标准陶瓷标定球(真圆度为 0.001 mm，重复精度为 0.000 5 ~ 0.001 mm)对摄像机进行标定。

2.2.2　辣椒叶片弹性系数测量

在液滴撞击柔性辣椒叶片的试验完成之后，为防止叶片由于生物力引起的变形，保证第一时间测量目标辣椒叶片的弹性系数。试验叶片与 2.2.1 节中撞击试验为同一辣椒叶片，布置标定板和叶片保持在同一平面内，使用铅锤标定垂直方向，在叶片自然状态下使用砝码(精度等级为 M1)在辣椒叶片中脉处进行加载，如图 3 所示。

2.2.3　液滴在刚性固定倾斜表面撞击行为试验

由于辣椒叶片在自然形态下的不同位置处弹性系数存在差异，倾斜角也存在一定差异，为了只分析弹性系数对液滴撞击行为的影响，需要对同一辣椒叶片做相同倾斜角下的对比试验，如图 4 所示。

测量叶片在自然状态下 2.2.1 节试验的各个撞击点处叶片的倾角，使用刚性板为支撑，用双面胶将叶片贴合在刚性板上。使用夹具控制刚性固定板，

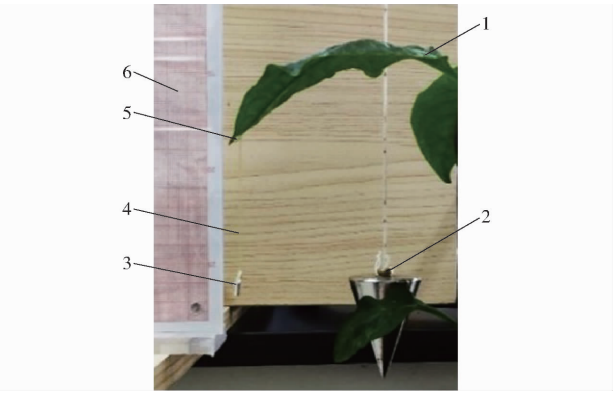

图 3 叶片不同部位弹性系数测量系统

Fig. 3 Elastic coefficient measurement system for different parts of chili leaves

1. 辣椒叶片 2. 铅锤 3. 载荷 4. 牵引线 5. 载荷施加点 6. 标定板



图 4 液滴撞击刚性固定辣椒叶片表面的试验布置

Fig. 4 Experimental arrangement of liquid droplet impacts on surface of rigidly fixed chili blades

1. 铁架台 2. 铅垂线 3、7. 升降台 4. 高速摄像机 5. 刚性板 6. 试验叶片 8. 显示器 9. 注射泵 10. 高亮光源 11. 注射针头

控制其倾斜角分别等于自然状态下叶片每个撞击点的倾斜角,如图 5 所示。整个试验过程需要小心操作,不能破坏叶片表面性质。在刚性固定倾斜表面上控制液滴大小和撞击速度进行液滴撞击试验。对所有试验叶片自然状态下倾斜角测量求取平均值,得出到叶尖距离占比 20%、40%、60%、80% 处的倾斜角分别为 20.1°、18.4°、15.2°、11.7°。

2.2.4 辣椒叶片不同部位质量测量

在撞击试验和叶片弹性系数测量试验完成之后,按照对叶片的划分,对叶片进行切割,测量其每一部分的质量。由于叶片的柔性,只有在液滴撞击点之后的叶片部分会发生大的变形和下降,如图 6 所示。因此,将试验目标叶片按图 1 的划分进行切割,使用 Sartorius 电子天平(BT125D 型,精度 0.1 mg)测量其各个部分的质量平均值,得出到叶尖距离占比 20%、40%、60%、80% 部分的质量分别为 31.9、125.5、256.6、356.6 mg。

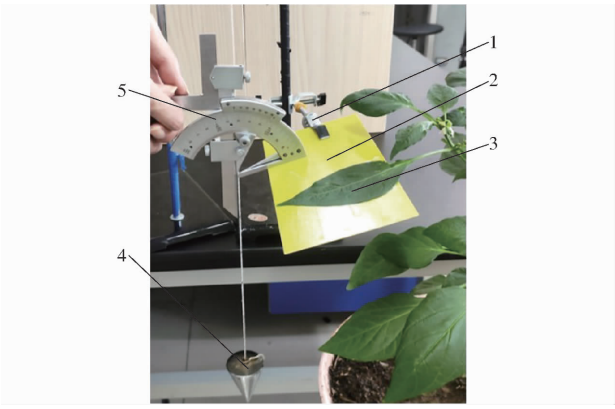

图 5 刚性固定表面叶片角度控制布置

Fig. 5 Rigidly fixed surface blade angle control arrangement

1. 旋转夹具 2. 刚性板 3. 试验叶片 4. 铅锤 5. 万能角度尺

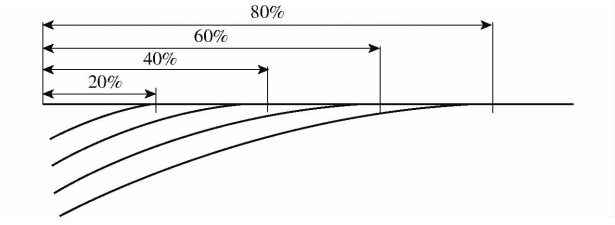

图 6 叶片受液滴撞击不同部位的弯曲示意图

Fig. 6 Schematic of bending of blade when hit by droplets at different parts

2.2.5 叶片表面静态接触角测量

文献[30]通过试验和理论分析,研究了液滴在不锈钢表面上的撞击行为,根据液滴撞击靶标表面时的奥内佐格数 Oh 和雷诺数 Re,建立一个无量纲数 $K_{crit}=OhRe^{1.25}$ 来定义液滴粘附和飞溅之间的边界,其临界值为 57.7。但对于不同表面和不同液体性质,其临界值也存在差异[31]。例如 K_{crit} 会随着表面粗糙度的减小而增加,文献[32]发现液滴撞击石蜡表面时飞溅临界值为 152。在农业喷雾的实际应用领域,液滴撞击往往不是严格的垂直于表面撞击,而撞击表面性质也比较复杂[14]。文献[33]发现对于亲水表面,可以根据 20% 的丙酮水溶液在目标表面的静态接触角 $\theta_{20\%\ acetone}$ 来计算 K_{crit} 作为评价液滴飞溅的临界值,其中 $K_{crit}=-0.584\theta_{20\%\ acetone}+147$,此模型适用于液滴在刚性固定叶片表面的撞击。

分别使用蒸馏水和 20% 的丙酮水溶液作为试验材料,使用 OCA 型视频光学接触角测量仪和 SNS-052 型注射针,如图 7 所示,按图 1 的划分对切割后的叶片不同部位分别进行接触角测量试验。将所需的试验材料分别装入注射器,通过计算机控制液滴体积为 2 μL,采用座滴法滴落液滴,使用接触角测量仪自带的分析系统,对液滴在辣椒叶片表面接触角进行分析,得出平均接触角的数值。按照对叶片部位的划分,避开中脉和侧脉,每个撞击部位选取 10 个点,每个点测量 3 次取平均值。得出

20%丙酮水溶液在到叶尖距离占比 20%、40%、60%、80% 部分的接触角测量值分别为 92.1°、88.9°、86.0°、83.1°。蒸馏水接触角测量值分别为 94.9°、89.3°、87.1°、84.5°。

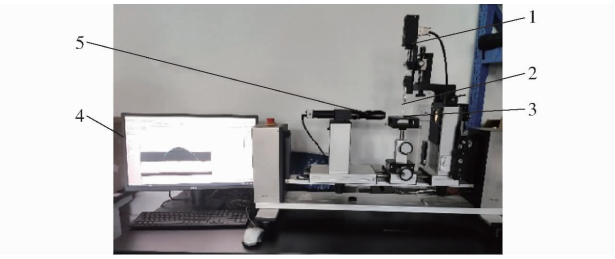

图 7　叶片接触角测量平台

Fig. 7　Blade contact angle measurement stage

1. 升降控制器　2. 注射器　3. 载物台　4. 计算机系统　5. 物镜

2.3　试验方法

影响液滴撞击行为的主要因素为液滴粒径、撞击速度、撞击角度等[16,18,34-36]。而同一叶片自然状态下的不同部位处弹性系数不同[28]。为探究叶片弹性系数对液滴撞击行为的影响，试验时保证叶片保持自然状态，因此选择液滴撞击速度、液滴粒径、撞击点到叶尖距离占比作为试验变量。

2.3.1　液滴撞击行为测试方法

通过控制撞击高度控制液滴撞击速度，将液滴发生装置放置在升降平台上，调整升降平台控制高度，同时，通过提前调整针头的位置以达到控制液滴撞击位置的目的，注意撞击时保证尽可能靠近中脉但又要避开中脉和侧脉。使用高速摄像机配套的软件 I-Speed Suite 处理液滴撞击叶片视频，生成 $X-Y$ 平面的像素数据，如图 8 所示。液滴撞击速度通过手动筛选拍摄的图像得到，逐帧播放液滴在撞击前的视频，首先记录场景中出现液滴对应的帧号，当液滴位于叶片表面上方即将撞击叶片时，记录第 2 个帧号。液滴在两帧所选图像之间的距离保持约 1 mm，根据两帧图像之间的距离和时间计算撞击速度，公式为

$$t=\frac{F_1-F_2}{F} \tag{22}$$

$$U=\frac{x}{t} \tag{23}$$

式中　t——两帧图像之间相隔的时间，s

F_1——图像 1 在视频中的帧序数

F_2——图像 2 在视频中的帧序数

F——拍摄时所选择的帧率，f/s

x——所选两帧图像之间液滴的下落距离，m

通过 I-Speed Suite 软件对视频进行处理，逐帧播放视频，测量液滴撞击前后的像素数，通过计算得到液滴最大铺展直径，公式为

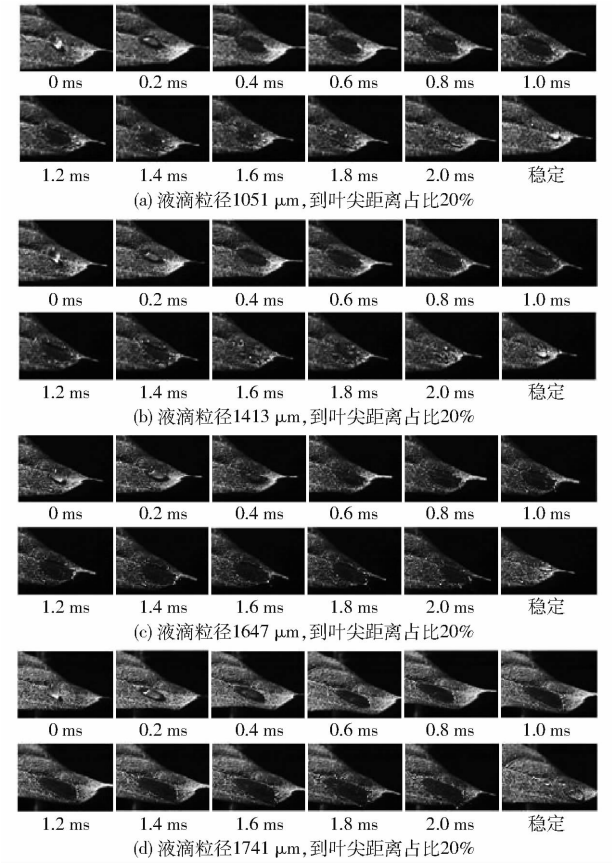

图 8　速度为 2.750 m/s 液滴撞击过程

Fig. 8　Impact process of droplet with velocity of 2.750 m/s

$$\frac{X_1-X_2}{D_0}=\frac{\max(X_i-X_j)}{D_m} \tag{24}$$

式中　X_1——撞击前液滴左侧的 X 轴像素值

X_2——撞击前液滴右侧的 X 轴像素值

X_i——铺展液滴左侧的 X 轴像素值

X_j——铺展液滴右侧的 X 轴像素值

液滴粒径通过改变针头的型号来控制。通过液滴在撞击前的图像，使用 ImageJ 软件测量液滴粒径，每一个液滴测量 3 次取平均值。试验中选取内径分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 mm 的 4 种型号针头，对应产生的液滴粒径分别为 1 051、1 413、1 647、1 741 μm。

为了研究叶片弹性系数对液滴撞击行为的影响，选用较大液滴可以扩大液滴撞击叶片时两者之间的相互作用，使试验现象变得明显，便于观察研究。虽然试验选用的液滴粒径不符合实际喷雾场景的粒径，但文献[37]通过流体力学分析，提出了无量纲数的动态相似理论模型，在满足无量纲数的动态相似条件下，两种流体表现出相似的动态特性，即

$$We_m=We_p \tag{25}$$

式中　We_m——模型韦伯数

We_p——对应原型韦伯数

试验所选择的材料为蒸馏水，本试验条件下液

滴表面张力为 71.86 mN/m。而在实际喷雾场景中，药液密度近似不变，对于常用的加了助剂的农药表面张力范围在 20.35 ~ 34.34 mN/m[38] 之间。根据量纲分析的动态相似理论，本试验条件下液滴韦伯数 We_m 和加了助剂的农药液滴韦伯数 We_p 相等时，本文试验所选粒径在对应试验速度下，均符合实际场景中的液滴粒径。因此，在本文所选的液滴粒径和试验速度条件下所获液滴的动态特性也符合实际场景。

2.3.2 叶片不同部位弹性系数测量方法

在叶片中脉上按图 3 所示方法对叶片施加载荷，每一个施加点都是相对应的液滴撞击叶片的点，每一片叶子选择 4 个点进行测量。试验时忽略叶片所受扭矩的变化，假设叶片只有垂直方向的弯曲。每个点选择 356、706、1 056、1 406 mg 共 4 个载荷水平，每一次加载水平测量 3 次，使用相机对叶片位置进行拍照记录。使用 Enguage 软件对图像进行处理，对得到的每个位置的弹性系数求取平均值，得出到叶尖距离占比 20%、40%、60%、80% 处的弹性系数分别为 0.010、0.166、0.412、0.830 N/m。弹性系数计算公式为[28]

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} k_{ij}}{n} \tag{26}$$

其中

$$k_{ij} = \frac{F_{ij}}{x_{ij}} \tag{27}$$

式中 k_{ij}——辣椒叶片位置 i 处施加第 j 个载荷的弹性系数，N/m

F_{ij}——施加的载荷力，N

x_{ij}——位置 i 处施加第 j 个载荷的变形量，m

k_i——叶片位置 i 处弹性系数平均值，N/m

n——每个点测试次数

2.3.3 叶片下落部分重心位置测试方法

试验中近似认为叶片为质量分布均匀的结构，测量辣椒叶片重心位置时忽略了其厚度，将叶片各个部分简化为“板”[39]。使用悬挂法通过悬挂不同点，使用标定后的固定相机位对不同部位的叶片悬挂图进行拍摄，根据铅锤线延长线交点得到其各个部分的重心位置。测量得到叶片不同部位重心位置到叶尖的距离，得出到叶尖距离占比 80%、60%、40%、20% 处 4 个部分的重心到叶尖的距离平均值分别为 58.8、38.6、22.9、10.3 mm。在叶片重力势能计算过程中，使用拍摄的自然状态下各个部分重心位置作为零势能点。得到重心位置到叶尖的距离后通过处理试验 2.2.1 节高速摄像机拍摄的视频，计算出叶片向下弯曲部分重心位置的下落距离得到其重力势能的变化。

3 结果与讨论

如图 9 所示，从试验中能够观察到粘附、破碎、飞溅 3 种现象，没有观察到液滴的反弹现象，试验结果与文献[16]的结论一致。观察到的液滴 3 种撞击行为中，以粘附和破碎为主，只有在高撞击速度的条件下才会发生飞溅。而液滴在粘附和破碎状态都能够有效沉积在叶片表面，在飞溅时液滴会脱离叶片表面导致其无法有效沉积在叶片表面[16]。



图 9 液滴粘附、破碎、飞溅

Fig. 9 Adhesion, fragmentation and splashing of droplets

3.1 数学模型的试验验证

将模型预测与试验结果进行比较（图 10），-10% 线表示实际测量值与理论预测值的偏差为 -10%。根据试验结果，理论模型预测值和实际测量值整体的最大扩散因子误差在 10% 以内。根据试验结果发现，液滴撞击柔性辣椒叶片时其最大扩散因子的理论预测值普遍大于实际测量值，考虑到数学预测模型中忽略了叶片弯曲时所受到的空气阻力和叶片的生物活性力以及辣椒叶片表面存在的叶毛对液滴扩散过程的阻力，所以导致理论预测值普遍偏大。

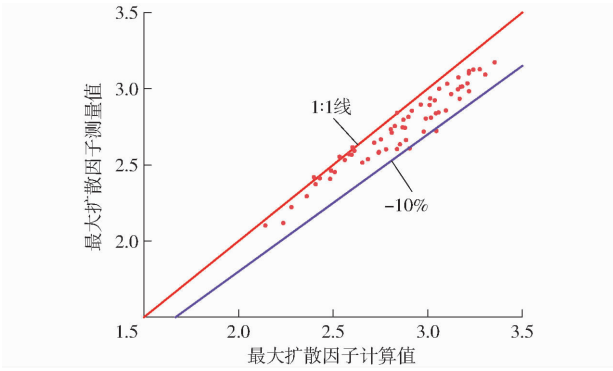

图 10 液滴撞击柔性叶片时理论计算的最大扩散因子和实际测量的最大扩散因子

Fig. 10 Theoretical maximum diffusion factor and actual measured maximum diffusion factor when droplets hit flexile blade surface

3.2 粘附液滴行为分析

液滴撞击叶片后的能量不足以克服液滴的表面张力使液滴发生飞溅，也不足以克服液滴在叶片上的粘附力使液滴发生弹跳时，液滴会有效地沉积在

叶片表面[40]。

3.2.1 液滴粒径、撞击速度、撞击点到叶尖距离占比对液滴粘附的影响

对所有粘附液滴的试验数据进行提取，使用 SPSS 软件对试验数据进行多因素方差分析，多因素间主效应分析结果如表 1 所示。可以得出，撞击点到叶尖距离占比、撞击速度、液滴粒径 3 种试验因素均对粘附液滴的最大扩散因子产生了显著影响（$P<0.05$）。R^2 调整后为 0.886，大于 0.8，说明试验的方差整体模型对试验结果具有良好的解释性。效应量偏伊塔平方的值是自变量对总体方差的贡献比例，3 个自变量中偏伊塔平方从小到大依次为撞击速度（0.868）、撞击点到叶尖距离占比（0.780）、液滴粒径（0.255），且 3 个自变量均通过了显著性检验。因此，试验所选 3 个因素中撞击速度对总体变异的贡献最为显著，其次是撞击点到叶尖距离占比，最后是液滴粒径。

表 1　撞击点到叶尖距离占比、撞击速度、液滴粒径对最大扩散因子影响的方差分析

Tab. 1　ANOVA for effect of impact location, impact velocity and droplet size on maximum diffusion factor

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P	偏伊塔平方
修正模型	16.481	63	0.262	32.516	<0.001	0.914
截距	1 911.221	1	1 911.221	237 559.849	<0.001	0.999
撞击位置	5.480	3	1.827	227.065	<0.001	0.780
撞击速度	10.195	3	3.398	422.417	<0.001	0.868
液滴粒径	0.528	3	0.176	21.863	<0.001	0.255
误差	1.545	192	0.008			
总计	1 929.245	256				
校正总计	18.025	255				

为进一步了解各因素不同水平之间的差异，采用 Duncan 新复极差法对不同水平的平均数进行事后检验，对液滴撞击点到叶尖距离占比、撞击速度、液滴粒径 3 个因素分别进行讨论。对其中一个因素进行事后检验时，液滴的最大扩散因子为另外两个因素所有水平的平均值。表 2 为事后检验的结果，从表 2 可以得到，撞击点到叶尖距离占比与液滴的最大扩散因子呈正相关趋势，且撞击点到叶尖距离占比 20% ~40% 之间的最大扩散因子增长率最大为 7.692%，撞击点到叶尖距离占比 20% ~80% 平均增大率为 5.141%，不同撞击点到叶尖距离占比的最大扩散因子均有显著差异；撞击速度与液滴的最大扩散因子呈正相关趋势，对数据进行线性拟合，拟合方程为 $y=0.386\,1x+1.917\,8$，决定系数 R^2 为 0.962，表明撞击速度每增加 1 m/s，液滴的最大扩散因子平均增加 0.386 1；液滴粒径与液滴的最大扩散因子也呈正相关趋势，对数据进行线性拟合，拟合方程为 $y=0.000\,2x+2.485$，决定系数 R^2 为 0.969，表明液滴粒径每增加 100 μm，液滴的最大扩散因子平均增加 0.02；综上所述，3 个因素对于液滴的最大扩散因子均存在明显的影响，且在本文设置的各个因素参数中，撞击速度对液滴的最大扩散因子影响最大，其次是撞击点到叶尖距离占比，最后是液滴粒径。

表 2　撞击点到叶尖距离占比、撞击速度、液滴粒径的事后检验

Tab. 2　Post examination of impact location, impact velocity and droplet size

参数	数值	样本数	最大扩散因子
撞击点到叶尖距离占比/%	20	120	2.509[a]
	40	120	2.702[b]
	60	120	2.823[c]
	80	120	2.896[d]
撞击速度/(m·s^{-1})	1.389	120	2.417[a]
	1.931	120	2.712[b]
	2.370	120	2.861[c]
	2.750	120	2.940[d]
液滴粒径/μm	1 051	120	2.668[a]
	1 413	120	2.715[b]
	1 647	120	2.757[c]
	1 741	120	2.790[d]

注：同列数据不同字母表示差异显著。

3.2.2 叶片弹性系数对液滴铺展过程的影响

在液滴撞击辣椒叶片后发生粘附时，液滴开始向四周扩散，经过一定时间液滴达到最大铺展，之后便开始收缩。在柔性辣椒叶片表面，液滴撞击叶片达到最大铺展的时间与液滴粒径和撞击速度呈现正相关趋势，这符合一般规律，与叶片的弹性系数呈负相关趋势。从图 11 中可以得出叶片弹性系数对于液滴达到最大铺展所需时间的影响。液滴撞击刚性固定辣椒叶片表面时，其达到最大铺展所需的时间与液滴撞击速度呈负相关趋势，与液滴粒径呈正相关趋势，与液滴撞击叶片的位置无关。与撞击刚性固定辣椒叶片表面相比，液滴撞击柔性辣椒叶片表面时其达到最大铺展所需时间增加量在 0.5 ms 以内，且此增加量与叶片弹性系数呈负相关趋势。

3.2.3 液滴撞击柔性辣椒叶片时液滴粒径、撞击速度以及撞击点到叶尖距离占比对液滴的最大扩散因子影响

液滴撞击叶片时，在法向力和表面张力的共同作用下，液滴开始向周围扩散，在初始动能、重力势能和表面能的作用下使其铺展直径达到一定值后开始发生飞溅或收缩，此时液滴的直径和初始粒径的比值称为液滴的最大扩散因子。

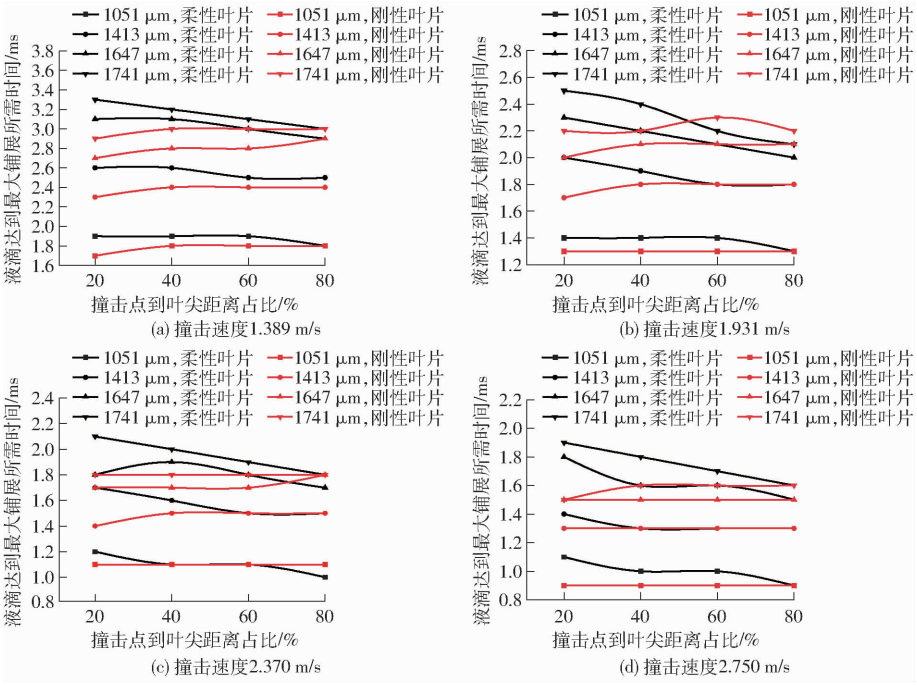

图 11 液滴撞击柔性辣椒叶片表面与撞击刚性固定辣椒叶片表面时液滴达到最大铺展所需的时间

Fig. 11 Time between droplet impact on surface of flexible or rigidly fixed chili blade and droplet maximum spreading on surface

对粘附液滴的最大扩散因子实际测量值和理论预测值进行比较,探究液滴撞击柔性辣椒叶片时,自变量对其最大扩散因子的影响规律。图 12 比较了液滴分别以撞击速度 1.389、1.931、2.370、2.750 m/s 撞击叶片时,理论预测值和实际测量值之间的差值。图 12 中理论预测值与实际测量值之间的差值越大,数据点的密度越小。从图 12 可以明显得出液滴最大扩散因子理论预测值和实际测量值之间的误差与叶片弹性系数呈正相关趋势,与液滴撞击速度也呈正相关趋势,与液滴粒径没有明显相关性。

表 3 为液滴撞击柔性辣椒叶片与撞击刚性固定辣椒叶片表面相比最大扩散因子减小率。由表 3 可以得出,液滴的最大扩散因子减小率与叶片弹性系数呈负相关趋势,与液滴粒径和撞击速度呈正相关趋势。但液滴的最大扩散因子减小率并不会一直呈

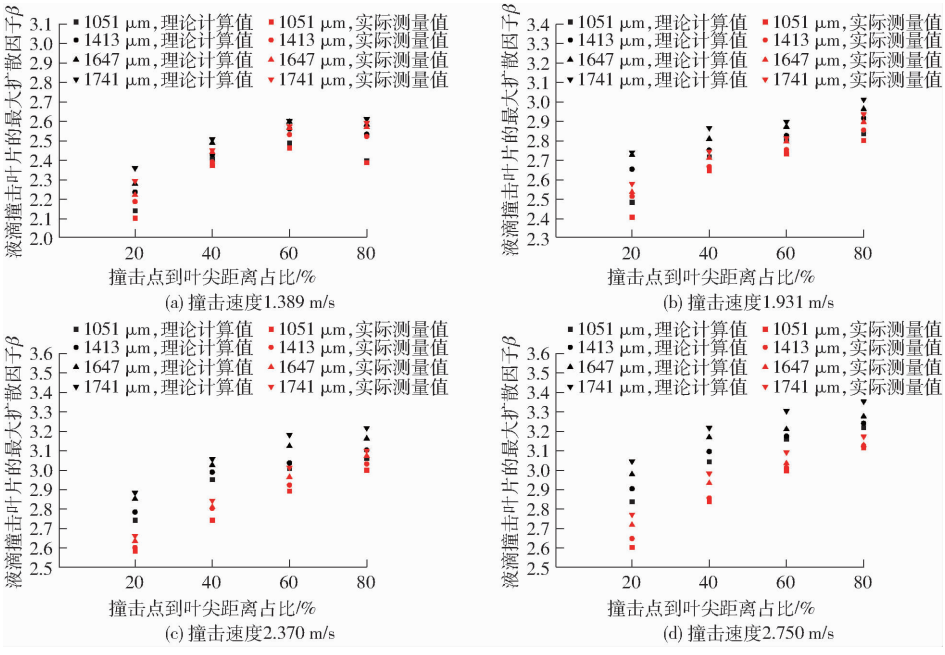

图 12 液滴撞击柔性辣椒叶片时最大扩散因子理论预测值与实际测量值

Fig. 12 Theoretically predicted maximum diffusion factor values *vs* actual measurements for droplet impacts on flexible chili blades

表 3　液滴撞击柔性辣椒叶片与刚性固定叶片相比其最大扩散因子的减小率

Tab. 3　Reduction rate of maximum diffusion factor of droplet hitting blade surface compared with fixed blade surface in natural state　%

撞击速度/(m·s^{-1})	液滴粒径/μm	撞击点到叶尖距离占比/%			
		20	40	60	80
1.389	1 051	13.741	5.243	2.056	0.659
	1 413	17.282	11.746	6.942	3.394
	1 647	19.663	13.751	9.682	5.923
	1 741	18.348	14.674	10.714	6.571
1.931	1 051	13.481	6.807	4.015	–
	1 413	16.880	13.421	10.831	4.737
	1 647	19.860	15.779	13.371	7.680
	1 741	19.746	15.965	14.098	7.832
2.370	1 051	14.293	10.457	5.825	–
	1 413	20.601	15.672	12.276	6.789
	1 647	23.121	19.130	14.849	9.691
	1 741	23.476	19.051	14.695	10.267
2.750	1 051	18.366	12.212	7.547	1.701
	1 413	23.557	18.552	14.279	9.322
	1 647	24.965	19.924	17.302	13.247
	1 741	24.642	19.751	16.969	13.333

注：“–”表示液滴撞击柔性叶片或刚性叶片时发生了不规则铺展。

简单的线性增长。产生这一偏差的原因可能是忽略了叶片在弯曲过程中所受到的空气阻力和叶片的生物活性力所导致的，而随着叶片的下落距离增大，叶片受到空气阻力而产生的能量消耗也越大。从而导致实际的最大扩散因子值会偏小，理论模型预测的最大扩散因子值与实际值之间的差会更大，这与试验结果相符。

液滴以速度 1.389 m/s 撞击叶片时，在撞击点到叶尖距离占比 20% 的位置，液滴最大扩散因子减小率最大为 19.663%，出现在粒径 1 647 μm 的液滴撞击时。而液滴撞击其他位置时，减小率最大值均出现在液滴粒径为 1 741 μm 时；液滴以速度 1.931 m/s 撞击叶片时，出现相似的规律；但是，液滴以速度 2.370 m/s 撞击柔性辣椒叶片时，在撞击点到叶尖距离占比 80% 的位置处，液滴最大扩散因子减小率最大值出现在粒径为 1 741 μm 的液滴撞击时。在液滴撞击其他位置处，液滴最大扩散因子减小率最大值均出现在粒径为 1 647 μm 的液滴撞击时；液滴以速度 2.750 m/s 撞击叶片时，出现与撞击速度为 2.370 m/s 时相似的规律。

3.2.4　液滴撞击柔性辣椒叶片后传递给叶片的弹性势能占初始总能量的比

叶片受液滴撞击时，在叶片的重力势能和液滴的初始动能、重力势能和表面能的作用下，会使叶片弯曲变形，此时，液滴的能量向叶片转移，叶片开始具有弹性势能。随着液滴在辣椒叶片表面的铺展，叶片继续向下弯曲，直至达到最大形变时，叶片具有最大的弹性势能。液滴传递给叶片的弹性势能越大，叶片后续的振动也会越强烈，对液滴撞击后的沉积能够产生巨大影响[41-42]。

图 13 为不同粒径的液滴以不同的速度撞击叶片的不同部位后，传递给叶片的弹性势能占液滴-叶片系统初始总能量的比。液滴撞击叶片后传递给叶片的弹性势能会随着叶片弹性系数的增加呈现先减小后增大的趋势。考虑到随着撞击点到叶片距离的减小，会更容易达到叶片此位置处的弹性极限，所以液滴传递给叶片的弹性势能不会随着叶片弹性系数的增加而简单减小。同时，液滴

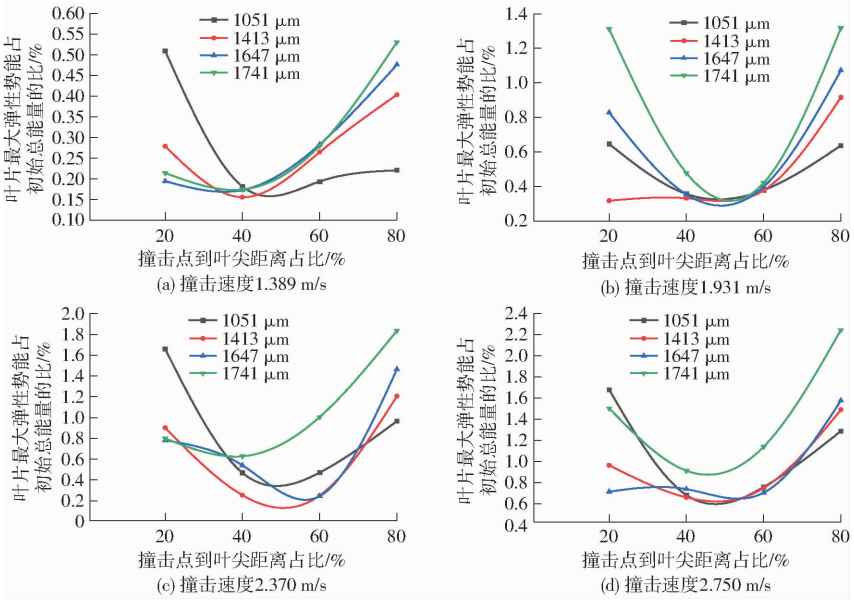

图 13　液滴撞击叶片后叶片最大弹性势能占初始总能量的比

Fig. 13　Ratio of maximum elastic potential energy of blade to initial total energy after droplet hit blade

传递给叶片的弹性势能占比会随着撞击速度的增加而产生明显的增加。但与液滴粒径没有明显关系。液滴粒径1 051 μm 的液滴以 4 种撞击速度撞击柔性辣椒叶片时,传递的弹性势能占比最大值出现在到叶尖距离占比 20% 处;而粒径为 1 413、1 647、1 741 μm 的液滴撞击时,液滴传递给叶片的弹性势能占比的最大值均出现在撞击点到叶尖距离占比 80% 处。

3.3 飞溅液滴行为分析

液滴在撞击柔性辣椒叶片后达到最大铺展时,液滴具有的能量克服液滴的表面张力后,会产生飞溅行为,其基本特征为液滴到达叶片表面后开始扩散,达到其最大铺展后,剩余的能量克服液滴的表面张力,使液滴的边界层发生破碎,进而生成细小的碎液滴,向四周形成冠状飞溅[11]。

3.3.1 液滴粒径、撞击速度、撞击点到叶尖距离占比对液滴飞溅的影响

为检验液滴的初始粒径、撞击速度、撞击点到叶尖距离占比与飞溅行为的相关性,将所有试验中粘附与飞溅液滴的试验数据进行提取和组合,进行 Kruskal - Wallis 秩和检验非参数相关性分析,检验结果为试验所选 3 个因素的 P 值均小于 0.001,液滴粒径的 P 值为 0.026,说明 3 个因素对于液滴飞溅均有相关性。对所有的组合数据进行二元 Logistic 回归分析。首先从 Hosmer - Lemeshow 检验中得到试验数据的显著性为 0.714,大于 0.05,说明试验数据的拟合相关性良好,试验数据具有统计学分析意义。表 4 为二元 Logistic 回归分析方程中的变量,3 个因素对液滴飞溅的 P 值均小于 0.05,说明 3 个自变量对液滴飞溅的影响均具有显著性。根据偏回归系数的数值可以得出,液滴粒径和撞击速度越大,越容易飞溅。同时以撞击点到叶尖距离占比 20% 处为变化量参考类别,可以得出撞击点到叶尖距离越大,液滴越容易飞溅。优势比代表自变量每增加一个单位,液滴不发生飞溅与发生飞溅概率的比值,根据表 4 可知,3 个因素对液滴飞溅的影响由大到小是液滴粒径、撞击速度、撞击点到叶尖距离占比。

表 4 液滴粒径、撞击速度、撞击点到叶尖距离占比对液滴飞溅的二元 Logistic 回归分析

Tab. 4 Binary Logistic regression analysis of droplet size, impact velocity and impact location to droplet splash

	偏回归系数	标准误差	卡方	自由度	P	优势比
液滴粒径	51.229	7.689	44.397	1	<0.001	1.772×10^{22}
撞击速度	38.468	5.738	44.950	1	<0.001	5.086×10^{16}
撞击位置			27.136	3	<0.001	
撞击位置(1)	2.995	0.894	11.236	1	0.002	19.991
撞击位置(2)	4.471	0.997	20.107	1	<0.001	87.436
撞击位置(3)	5.741	1.125	26.033	1	<0.001	311.433
常量	-192.037	28.671	44.862	1	<0.001	<0.001

注:撞击位置(1)、(2)、(3),是以撞击点到叶尖距离占比 20% 处为变化量参考类别,撞击点到叶尖距离占比 40%、60%、80% 处的回归分析。

3.3.2 液滴飞溅临界值分析

对试验得到的部分粘度和飞溅液滴的数据进行提取,如图 14 所示。为研究影响叶片不同弹性系数下液滴产生飞溅的参数,通过文献[33]提出的根据 20% 的丙酮水溶液在靶标叶片表面上的静态接触角计算其发生飞溅的临界值。同时根据试验得到叶片撞击柔性辣椒叶片表面不同部位的飞溅临界值 K_{crit}。在撞击点到叶尖距离占比 20%、40%、60%、80% 处,液滴撞击辣椒叶片的理论飞溅临界值分别为 93.2、95.1、96.8、98.5;液滴撞击柔性辣椒叶片表面的飞溅临界值分别为 108.3、105.1、103.1、102.9。通过对比试验所得到的飞溅临界值和理论值可以得出,液滴撞击柔性叶片后的飞溅临界值与叶片的弹性系数呈负相关趋势。在试验中,液滴撞击距离叶尖占比 20%、40%、60%、80% 的部位时,其实际飞溅临界值和理论值相比分别增加了 16.202%、10.515%、6.508%、4.467%。

3.4 液滴撞击柔性叶片反弹分析

根据式(21)可知,叶片的弹性系数、液滴在叶片上的静态接触角、液滴粒径与液滴相对剩余能量呈正相关关系。因此,根据试验所选 3 个因素的最大值可得到液滴在柔性辣椒叶片表面撞击的反弹临界曲线。试验所测得的叶片弹性系数最大值在叶尖距离占比为 80% 处,弹性系数为 0.830 N/m,蒸馏水在试验叶片上的静态接触角最大值为 94.9°。将弹性系数 0.830 N/m 和接触角 30°、60°、94.9°、120°、150°代入式(21),得到液滴撞击柔性辣椒叶片的反弹临界曲线,结果如图 15 所示,当相对剩余能量 $E^*_{ERE}>0$ 时,液滴会发生反弹。在接触角 $\theta<94.9°$ 时,液滴反弹临界曲线均在零刻度线以下,理论预测液滴不会发生反弹行为,试验时没有液滴发生反弹行为,试验结果与理论模型预测结果吻合。

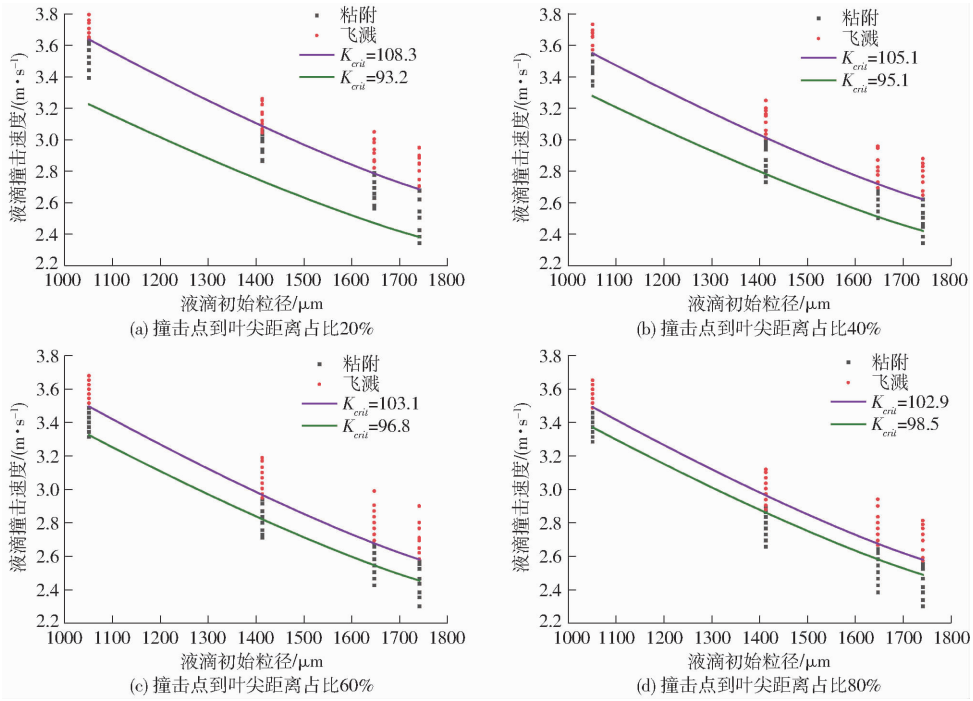

图 14　液滴不同撞击位置的飞溅临界曲线

Fig. 14　Critical splash curves for droplets at different impact locations

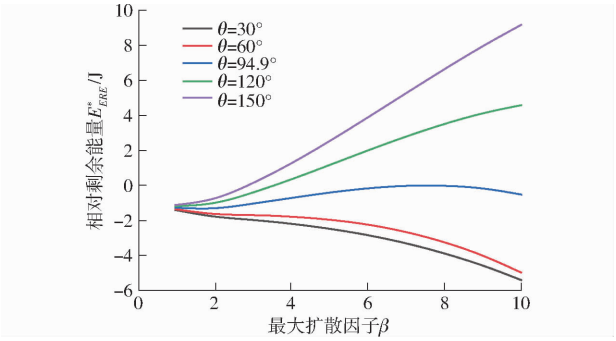

图 15　液滴撞击柔性叶片反弹临界曲线

Fig. 15　Critical curves of rebound of liquid droplet hitting flexible blade

4　结论

(1)液滴撞击柔性辣椒叶片时,呈现粘附、破碎、飞溅 3 种行为,没有发生反弹行为,理论模型预测与试验结果吻合。

(2)液滴撞击柔性辣椒叶片时,叶片的弹性系数与液滴撞击叶片后扩散时间呈负相关趋势。与撞击刚性固定辣椒叶片表面相比,液滴达到最大扩散的时间总体增加量在 0.5 ms 以内。

(3)液滴最大扩散因子理论模型预测值与实际测量值之间的偏差在 10% 以内,理论预测效果良好。且理论模型预测值与实际值的偏差随着撞击速度的增大而增大,随着叶片弹性系数的减小而增大。与撞击刚性固定叶片相比,液滴撞击自然状态下柔性叶片最大扩散因子的减小率在 25% 以内,与撞击点到叶尖距离占比呈负相关。

(4)对于粘附液滴,液滴撞击后传递给叶片的弹性势能占初始总能量的比随撞击点到叶尖距离占比的增加呈现先减小后增大的趋势,同时与撞击速度有极强的正相关。撞击点到叶尖距离占比、撞击速度、液滴粒径 3 个因素对液滴最大扩散因子均有显著影响($P<0.05$),且呈正相关,对液滴最大扩散因子影响由大到小依次为撞击速度、撞击点到叶尖距离占比、液滴粒径。

(5)撞击点到叶尖距离占比、撞击速度、液滴粒径 3 个因素对于液滴飞溅均有显著影响($P<0.05$),且呈正相关,对液滴飞溅的影响程度由大到小依次为液滴粒径、撞击速度、撞击点到叶尖距离占比。

(6)叶片弹性系数会改变液滴在其表面的撞击飞溅临界值,自然状态下柔性辣椒叶片飞溅临界值随着撞击点到叶尖距离占比的增加而减小;在到叶尖距离占比 20%、40%、60%、80% 处,飞溅临界值 K_{crit} 分别为 108.3、105.1、103.1、102.9,与刚性叶片飞溅临界值相比分别增加 16.202%、10.515%、6.508%、4.467%。

(7)在喷雾过程中,同一片叶子上,越靠近叶片弹性系数小的区域,沉积效果越好,不同叶片,弹性系数越小的叶片沉积效果越好。

参 考 文 献

[1] AHMAD L N N, MOHD N M R, CHANG S W. Integrated analysis of machine learning and deep learning in chili pest and disease identification[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 101(9): 3582 – 3594.

[2] 周悦,刘一彤,白丽,等. 中国辣椒出口贸易结构与国际竞争力分析[J]. 中国蔬菜,2023(3):1 – 7.
ZHOU Yue, LIU Yitong, BAI Li, et al. Analysis of Chinese export trade structure for pepper and international competitive power [J]. China Vegetables, 2023(3):1 – 7. (in Chinese)

[3] YIN H, GU Y H, PARK C J, et al. Transfer learning-based search model for hot pepper diseases and pests[J]. Agriculture, 2020, 10(10):439.

[4] ZHENG L, CAO C, CAO L, et al. Bounce behavior and regulation of pesticide solution droplets on rice leaf surfaces[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(44): 11560 – 11568.

[5] ZHANG Y, LIU B, HUANG K, et al. Eco-friendly castor oil-based delivery system with sustained pesticide release and enhanced retention[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(33): 37607 – 37618.

[6] 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 Weidong, ZHU Heping, DONG Xiang, et al. Impact of spray droplet on soybean leaf surface[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12):87 – 93, 113. (in Chinese)

[7] CAO Y, XI T, XU L, et al. Computational fluid dynamics simulation experimental verification and analysis of droplet deposition behavior on vibrating pear leaves[J]. Plant Methods, 2022, 18(1):80.

[8] HILZ E, VERMEER A W P. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction[J]. Crop Protection, 2013, 44: 75 – 83.

[9] 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 Mengxiao, ZHANG Xuhui, TANG Chenglong. Experimental study on the droplet impact on solid surface with different roughness[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9):26 – 31. (in Chinese)

[10] DONG X, ZHU H, YANG X. Characterization of droplet impact and deposit formation on leaf surfaces[J]. Pest Management Science, 2015, 71(2): 302 – 308.

[11] 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: 82 – 91.

[12] DAMAK M, HYDER M N, VARANASI K K. Enhancing droplet deposition through in-situ precipitation[J]. Nature Communications, 2016, 7(1):12560.

[13] 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.

[14] 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.

[15] LI H, NIU X, DING L, et al. Dynamic spreading characteristics of droplet-impinging soybean leaves[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3): 26 – 34.

[16] 刘冬梅,周宏平,郑加强,等. 茶树叶片表面喷雾液滴斜撞击行为研究[J]. 农业机械学报,2019,50(5):96 – 103,195.
LIU Dongmei, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. Oblique impact behavior of spray droplets on tea tree leaves surface [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):96 – 103, 195. (in Chinese)

[17] MASSINON M, DE COCK N, FORSTER W A, et al. Spray droplet impaction outcomes for different plant species and spray formulations[J]. Crop Protection, 2017, 99: 65 – 75.

[18] MASSINON M, LEBEAU F. Experimental method for the assessment of agricultural spray retention based on high-speed imaging of drop impact on a synthetic superhydrophobic surface[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(1): 56 – 64.

[19] QIU W, GUO H, ZHENG H, et al. CFD modeling to analyze the droplet deposition behavior on vibrating rice leaves[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201:107330.

[20] 胡凡,石辉,王会霞. 雨滴撞击植物叶片的运动过程监测装置的研制[J]. 农业现代化研究,2022,43(6):1110 – 1119.
HU Fan, SHI Hui, WANG Huixia. Development of monitoring device for movement process of raindrops impingement on plant leaves[J]. Research of Agricultural Modernization, 2022, 43(6):1110 – 1119. (in Chinese)

[21] NANKO K, HUDSON S A, LEVIA D F. Differences in throughfall drop size distributions in the presence and absence of foliage[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(3): 620 – 627.

[22] LAUDERBAUGH L K, HOLDER C D, POPPINGA S. The biomechanics of leaf oscillations during rainfall events[J]. Journal of Experimental Botany, 2022, 73(4): 1139 – 1154.

[23] XU H, LIU Y, HE P, et al. The TAR model for calculation of droplet/wall impingement[J]. Journal of Fluids Engineering, 1998, 120(3): 593 – 597.

[24] PASANDIDEH-FARD M, QIAO Y M, CHANDRA S, et al. Capillary effects during droplet impact on a solid surface[J]. Physics of Fluids, 1996, 8(3): 650 – 659.

[25] KAISER E, MORALES A, HARBINSON J, et al. Dynamic photosynthesis in different environmental conditions[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(9): 2415 – 2426.

[26] MYSTERY J, MOE R J S H. Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops—a mini-review[J]. Scientia Horticulturae, 1995, 62(4): 205 – 215.
[27] STUERZ S, ASCH F. Responses of rice growth to day and night temperature and relative air humidity-dry matter, leaf area, and partitioning[J]. Plants, 2019, 8(11):521.
[28] WANG Z, ZHENG C, LI T, et al. Analyzing the preference for pesticide spray to be deposited at leaf tips[J]. Biosystems Engineering, 2021,204:247 – 256
[29] CONKLIN P A, STRABLE J, LI S, et al. On the mechanisms of development in monocot and eudicot leaves[J]. New Phytologist Foundation, 2019, 221(2):706 – 724
[30] 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.
[31] WAL R L V, BERGER G M, MOZES S D. The splash/non-splash boundary upon a dry surface and thin fluid film[J]. Experiments in Fluids, 2005, 40(1): 53 – 59.
[32] YOON S S, DESJARDIN P E, PRESSER 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.
[33] FORSTER W A, MERCER G N, SCHOU W C. Process-driven models for spray droplet shatter, adhesion or bounce[C]//9th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals,The Netherlands,2010.
[34] 高荣,黄路生,文晟,等.农药液滴在玉米叶片表面铺展面积的影响因素[J].农业工程学报,2022,38(20):41 – 48.
GAO Rong, HUANG Lusheng, WEN Sheng, et al. Factors influencing the spreading areas of pesticide droplets on the surface of maize leaves[J]. Transactions of the CASE,2022,38(20):41 – 48. (in Chinese)
[35] 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: 94 – 101.
[36] YARIN A L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing…[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38(1): 159 – 192.
[37] WHITE F M. Fluid mechanics[M]. Kingston:University of Rhode Island Press, 2009:293 – 346.
[38] 庞红宇,张现峰,张红艳,等.农药助剂溶液在靶标表面的动态润湿性[J].农药学学报,2006,8(2):157 – 161.
PANG Hongyu,ZHANG Xianfeng,ZHANG Hongyan et al. Dynamic wettability of pesticide additive solution on target[J]. Chinese Journal of Pesticide Science,2006,8(2):157 – 161. (in Chinese)
[39] 刘兴华,苑进,李扬,等.采用双向流固耦合方法构建辅助气流作用下棉花叶片变形模型[J].农业工程学报,2021,37(5):68 – 76.
LIU Xinghua,YUAN Jin,LI Yang, et al. Deformation modelling of cotton leaf under assisted airflow using bidirectional fluid-structure coupling method[J]. Transactions of the CASE,2021,37(5):68 – 76. (in Chinese)
[40] LIU Y, ANDREW M, LI J, et al. Symmetry breaking in drop bouncing on curved surfaces[J]. Nature Communications, 2015, 6(1):10034.
[41] GILET T, BOUROUIBA L. Rain-induced ejection of pathogens from leaves: revisiting the hypothesis of splash-on-film using high-speed visualization[J]. Integrative and Comparative Biology, 2014, 54(6): 974 – 984.
[42] GINEBRA-SOLANELLAS R M, HOLDER C D, LAUDERBAUGH L K, et al. The influence of changes in leaf inclination angle and leaf traits during the rainfall interception process[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020,285:107924.

(上接第 127 页)

[27] 刘彤,许纯新.橡胶履带车辆接地压力分布[J].工程机械,1995(2):1 – 18,40.
LIU Tong, XU Chunxin. Ground pressure distribution of rubber tracked vehicle[J]. Construction Machinery and Equipment, 1995(2): 1 – 18,40. (in Chinese)
[28] 王元杰,刘永成,杨福增,等.温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J].农业工程学报,2012,28(22):23 – 29.
WANG Yuanjie, LIU Yongcheng, YANG Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controll edelectric tractor for greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 23 – 29. (in Chinese)
[29] 万星宇,舒彩霞,廖庆喜,等.高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(9):109 – 121.
WAN Xingyu, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of self-propelled middle-placement rape windrower with high ground elearance crawler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 109 – 121. (in Chinese)
[30] 孙术发, 任春龙, 李涛,等. 基于履带式底盘的改进型森林消防车通过性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 61 – 67.
SUN Shufa, REN Chunlong, LI Tao,et al. Trafficability analysis of improved forest fire engine based on crawler chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 61 – 67. (in Chinese)