

· 研究论文 ·

DOI: 10.16801/j.issn.1008-7303.2019.0069

溴氰菊酯乳油液滴在蕹菜叶面的叠加凝并行为研究

陆 军^{1,2}, 金天澍², 张红涛^{*3}

(1. 浙江农林大学 暨阳学院, 浙江 诸暨 311800; 2. 浙江农林大学, 生物农药高效制备技术国家地方联合工程实验室, 杭州 311300; 3. 华北水利水电大学 电力学院, 郑州 450011)

摘要: 为了探究溴氰菊酯乳油液滴在蕹菜 *Ipomoea aquatica* Forsk 叶片表面的叠加凝并行为及其动态接触角变化规律, 采用纤维细度分析仪和光学接触角测量仪, 观测蕹菜各分割部分的叶面形貌特征, 测定了 25 mg/L 溴氰菊酯乳油的表面张力、液滴叠加凝并前后动态接触角及铺展直径等润湿参数, 并依据幂次法则对液滴叠加铺展驱动力成因进行分析。结果显示: 25 mg/L 溴氰菊酯乳油的表面张力为 29.02 mN/m; 当垂直方向碰撞速率为 0.082 6 m/s 时, 蕹菜叶面 5 μL 等体积液滴会以 2 种方式发生叠加凝并, 即滚入底部吸入凝并和直接顶部吸入凝并, 两种方式从叠加开始至凝并形成新液滴的时间分别为 0.035 2 s 和 0.025 1 s; 前者凝并成新液滴后接触角减小 12.9%, 而后者的接触角均有不同程度的增加, 最大增幅达 27.4%; 两种方式叠加凝并形成新液滴的铺展直径随时间的变化分别呈线性关系和符合幂函数关系 (幂值 $\alpha < 0.1$), 据此推测前者 (滚入底部吸入凝并方式) 是完全由表面张力梯度导致的超铺展行为, 后者 (直接顶部吸入凝并方式) 是由动态表面张力主导驱动的铺展行为, 前者药液在蕹菜叶片表面的铺展效果优于后者。

关键词: 溴氰菊酯; 乳油; 蕹菜叶片; 液滴叠加凝并; 动态接触角; 铺展直径

中图分类号: S482 文献标志码: A 文章编号: 1008-7303(2019)04-0514-09

Deltamethrin emulsifiable concentrates droplets superposition and coagulation behavior on water spinach leaf surface

LU Jun^{1,2}, JIN Tianshu², ZHANG Hongtao^{*3}

(1. College of Jiyang, Zhejiang A&F University, Zhiji 311800, Zhejiang Province, China; 2. Local and National Joint Engineering Laboratory of Biopesticide High-Efficient Preparation Technology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 3. Institute of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: In order to investigate the superposition behavior of 25 mg/L emulsion deltamethrin emulsifiable concentrates droplets on the surface of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk) leaves and the change of dynamic contact angle, fiber fineness analyzer and optical contact angle measuring instrument were used to observe the leaf surface morphology of water spinach and measure the surface tension of deltamethrin emulsifiable concentrates droplets, dynamic contact angle, spreading diameter and other wetting parameters. According to the power law, the causes of droplets superposition

收稿日期: 2019-03-11; 录用日期: 2019-06-21.

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY16C130008); 浙江省农业工程一流学科(B类)建设项目(浙教高科(2016)169号); 国家自然科学基金资助项目(31671580); 河南省科技攻关项目(162102110112); 华北水利水电大学教学名师培育项目(2014108)。

作者简介: 陆军, 男, 博士后, 副教授, 主要从事精准施药技术研究, E-mail: lujun12404@126.com; *张红涛, 通信作者(Author for correspondence), 男, 博士, 教授, 主要从事病虫害图像识别研究, E-mail: zht1977@newu.edu.cn

spreading driving force were analyzed. The result showed that the surface tension of deltamethrin emulsifiable concentrates was 29.02 mN/m. There were two kinds of different behavior happen in the overlying process of the same volume (5 μL) droplets on water spinach leaves surface. The former behavior was to roll into the bottom and the latter behavior was to inhale directly at the top. The time for the superposition to condense and form a new droplet were 0.035 2 s and 0.025 1 s, respectively. The former condensed into a new droplet and the contact angle decreased by 12.9%. As for the latter, the contact angles all increased and the maximum increase rate was 27.4%. The spreading diameters of the new droplets formed by the two superposition methods showed linear relationship with time and in accordance with the power function relationship (power $\alpha < 0.1$). Those results demonstrated that the former was a super spreading behavior caused by the surface tension gradient, and the latter was the spreading behavior driven by the dynamic surface tension. And the former was superior to the latter in terms of spreading effect.

Keywords: deltamethrin; emulsifiable concentrates; water spinach leaf surface; droplets superposition and coagulation; dynamic contact angle; spreading diameters

0 引言

溴氰菊酯是菊酯类杀虫剂，具有触杀和胃毒作用，触杀作用迅速，击倒力强，没有熏蒸和内吸作用，在高浓度下对一些害虫有驱避作用^[1]。溴氰菊酯主要用于喷雾防治害虫，但在喷雾施药过程中，由于施药技术和方法不适当、以及靶标针对性差等原因，往往会造成农药使用安全风险等诸多问题，包括药液流失严重、农产品残留超标、环境污染和人畜中毒等；此外，喷雾施药是一个动态过程，药液雾滴颗粒群不断在靶标作物表(界)面发生碰撞、凝并、破碎、沉积等动力学事件，其中多个颗粒液滴的叠加行为直接影响其在作物表面的沉积、持留、铺展和渗透等，进而影响和决定施药效果^[2]。研究溴氰菊酯在作物叶片表面的多颗粒液滴叠加凝并行为，可以优化农药喷施方案，提升农机具施药效率，改善溴氰菊酯药液在靶标表面的润湿性能，对于减少药液流失，提高农药利用率等具有重要意义。

近年来，围绕多颗粒(群体)药液液滴与靶标界面的碰撞行为和动态润湿行为研究引起国内外学者高度关注，已成为农药应用与施用技术领域非常活跃的研究方向^[3-5]。例如：Gaskin、Chambers 和 Williams 等研究了药液雾滴撞击油菜、卷心菜等作物叶面的动力学过程，发现碰撞后叠加液滴与作物叶面接触角增大，而雾滴的黏附率减小^[6-7]。Taylor 等和 Gatne 等采用高速相机记录雾滴下落动态接触角变化，发现作物叶面沉积量随着动态

接触角的增大而减小；而在疏水作物表面，雾滴会破碎和分解出多个小雾滴，前进角对润湿行为的影响大于稳定后的接触角^[8-9]。董祥等对喷雾液滴撞击大豆叶片表面过程进行测试与分析，发现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；碰撞液滴铺展行为中呈现多次交替铺展、收缩状态，直至最终稳定^[10-11]。丁维龙等开展了基于虚拟模型的雾滴与叶片的交互行为研究，提出了一种基于试验的液滴与不同倾角的植物叶片交互行为的模拟方法，并设计出一种新的液滴弹跳方向计算方法，为植物冠层与大量雾滴交互的沉积量计算提供技术参考^[12]。

查阅文献发现，在农药施用技术领域有关多颗粒(群体)液滴叠加凝并行为的研究报道非常少而且零散^[13-18]。为此，本研究采用光学接触角测量仪(配置有高速 CCD 数字接口摄像记录仪)观测 25 mg/L 溴氰菊酯乳油液滴在蕹菜 *Ipomoea aquatica* Forsk (别名：空心菜、通菜) 叶片表面的叠加凝并行为及其动态接触角变化规律，分析该行为对铺展效果的影响，并探讨液滴叠加铺展驱动力成因，旨在为精准农药喷施提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 试验材料 25 g/L 溴氰菊酯乳油(拜耳作物科学(中国)有限公司)；好湿农用有机硅 IOTA2000

喷雾助剂(有效成分 90%, 上海申宏农药有限公司);一次去离子水;新鲜蕹菜叶片(温室生长 40 d,从顶端向下第 4 片叶子,为保持叶片新鲜,均在采摘后 2 h 内进行试验)。

1.1.2 测量仪器 Theta Lite 光学接触角测量仪(瑞典百欧林公司),其主要参数和技术指标见表 1;微量注射器(量程 0.5~100 μL, 瑞士 Hamilton 公司);YG002-X 型全自动纤维细度分析仪(温州百恩仪器有限公司),其主要参数和技术指标见表 2。

表 1 Theta Lite 光学接触角测量仪的主要参数和技术指标

Table 1 Technical specifications of Theta Lite type optical contact angle measuring instruments

主要参数 Main parameters	技术参数 Technical specifications
图像分辨率 Image resolution/pixel	1 280 × 1 024
最大图像采集速率 Maximum image acquisition speed/(帧/s)	203
对角线 diagonal/mm	3.5~7.5
光源 Light source	LED background
LED 光源电压 LED light source voltage/V	12
接触角测量范围 Contact angle measurement range/(°)	0~180
接触角测量精度 Contact angle measurement accuracy/(°)	± 0.1
表面张力测量范围 Surface tension measurement range/(mN/m)	0.01~1 000
表面张力测量精度 Surface tension measurement accuracy/(mN/m)	± 0.01

表 2 YG002-X 型全自动纤维细度分析仪的主要参数和技术指标

Table 2 Technical specifications of YG002-X type fiber fineness analyzer

主要参数 Main parameters	技术参数 Technical specifications
显微镜 Microscope	BX43(4×/10×/20×40×)
物镜 Objective lense	4×(N.A. 0.1, W.D. 18.5 mm)
目镜 Eyepiece	10×宽视野目镜 10× wide field eyepiece
摄像头 Camera	松下CP750 Panasonic CP750
电子快门速率 Shutter speed	1/50 s~1/120 000 s
灵敏度 Sensitivity	0.08 lx(彩色模式) 0.08 lx (color mode)

1.2 试验方法

1.2.1 叶面形貌观测 沿着蕹菜主叶脉将完整叶片分割成 6 部分,分别标号为 A1、A2、A3 和 B1、B2、B3,如图 1 所示。从各部分剪下 1.5 cm × 1.0 cm 的蕹菜叶片,置于载玻片上,盖上盖玻片,制成临时载玻片。用纤维细度分析仪中的电子显微镜观察,采用目镜放大 10 倍,物镜放大 4 倍

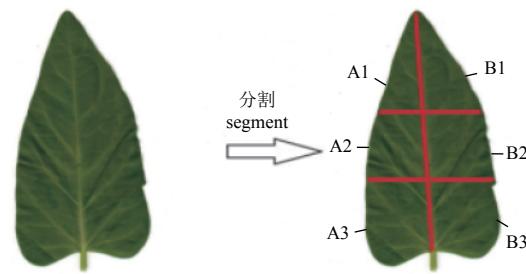


图 1 蕹菜叶片及其分割

Fig. 1 Water spinach leaf and its segmentation part

的组合,观测蕹菜这 6 个部分的叶面形貌特征。

1.2.2 药液配制及试验方法 根据 GB29386—2012 农药使用技术规范要求^[19]配制溴氰菊酯乳油供试药液。按比例将 25 g/L 溴氰菊酯乳油(0.25 mL)、好湿农用有机硅喷雾助剂(0.05 mL)与一次去离子水(250 mL)混合均匀,配制成 25 mg/L 溴氰菊酯药液,药液在配制后 2 h 内使用。

1.2.3 表面张力的测量 根据文献[5],从微量注射器旋出 5 μL 25 mg/L 的药液液滴,等待 2 min,使液滴趋于平稳,采用 CCD 数字摄像机在静态模式下采集图像,由图像轮廓拟合结果测量出表面张力。

1.2.4 液滴叠加凝并试验 从微量注射器中先后悬出 2 滴 5 μL 供试药液,滴于载玻片上的蕹菜叶片表面,进行液滴叠加试验。液滴叠加过程由光学接触角测量仪中 CCD 数字摄像机进行动态捕捉,以 PNG 格式保存在图像文件中,试验数据以 Excel 格式保存并导出后整理分析。实验室内无风干燥,环境温度 (12 ± 1)℃,相对湿度 58% ± 2%。

1.2.5 铺展过程中铺展直径和动态接触角的测定

根据文献[5],从微量注射器中旋出 5 μL 的药液液滴,滴于载玻片上的蕹菜叶片表面,微量注射器平底针头距离载玻片 8 mm。液滴滴落后,其在蕹菜叶面自由动态铺展,采用 CCD 数字摄像机在动态模式下采集铺展图像,由图像轮廓拟合结果测量出铺展直径(ϕ)。上述过程摄像机在连续记录模式下以 20 帧/s 的速率采集图像,图像采集时间 10 s,连续的每帧图像轮廓拟合结果测量出动态接触角(θ_d)。

1.2.6 碰撞过程液滴碰撞速率测定 根据文献[20],摁下触发开关后,初始速率通过像素分析确定。液滴碰撞表面瞬间速率则根据碰撞前 3 段时间间隔 Δt 、 $2\Delta t$ 和 $3\Delta t$ 对应 3 张图像的液滴距离 L_1 、

L_2 和 L_3 计算加速状态下的液滴碰撞速率。

1.2.7 叠加过程铺展直径和动态接触角的测定

用微量注射器将 5 μL 药液液滴滴于蕹菜叶片表面, 待液滴铺展完成后, 再从微量注射器中旋出 5 μL 液滴使其成为悬滴状态, 摁下触发开关, 将该液滴与之前滴落后铺展的液滴进行碰撞, 使 2 个液滴发生碰撞和叠加行为, 图像采集速率设定为 203 帧/s, 图像采集时间为 10 s, 根据连续的每帧图像轮廓拟合结果测量出铺展直径和动态接触角。

以上液滴叠加试验均重复 3 次测量, 统计取平均值。

2 结果与分析

2.1 叶面形貌

被分割成 6 个部分的蕹菜叶面形貌观测结果如图 2 所示。由图 2 可见: 叶片前端 A1、B1 部分较为平整; 叶片中端 A2、B2 出现较为明显的叶脉, 并且叶脉纹络开始增粗; 叶片末端 A3、

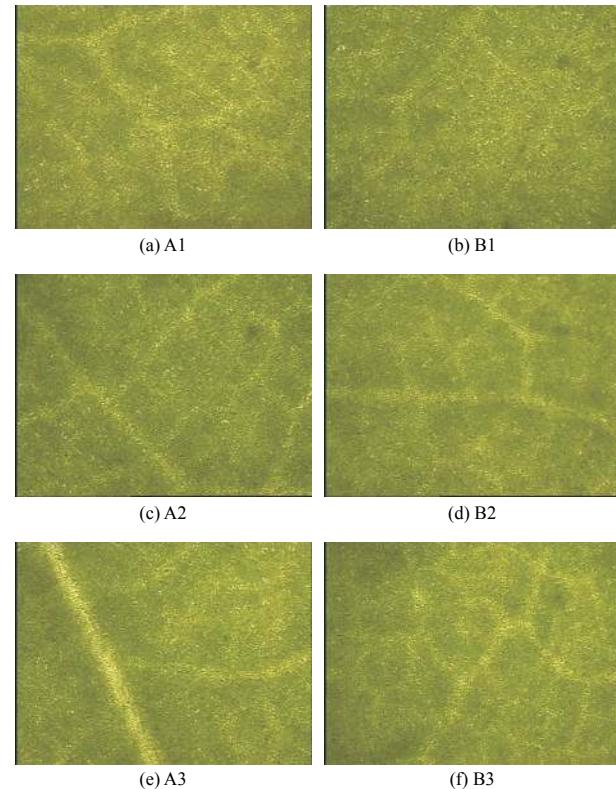


图 2 蕹菜叶面不同部分的形貌

Fig. 2 Morphology of different parts of amaranth leaves

B3 部分叶脉分布较多, 叶面平整度有所下降。

2.2 25 mg/L 溴氰菊酯乳油的表面张力

测定结果表明, 25 mg/L 溴氰菊酯乳油的表面

张力 (γ) 为 29.02 mN/m。

2.3 液滴叠加行为观测

计算得出液滴垂直碰撞速率为 0.082 6 m/s。观测结果显示, 液滴叠加时出现了 2 种方式, 即滚入底部吸入凝并和直接顶部吸入凝并。其动态

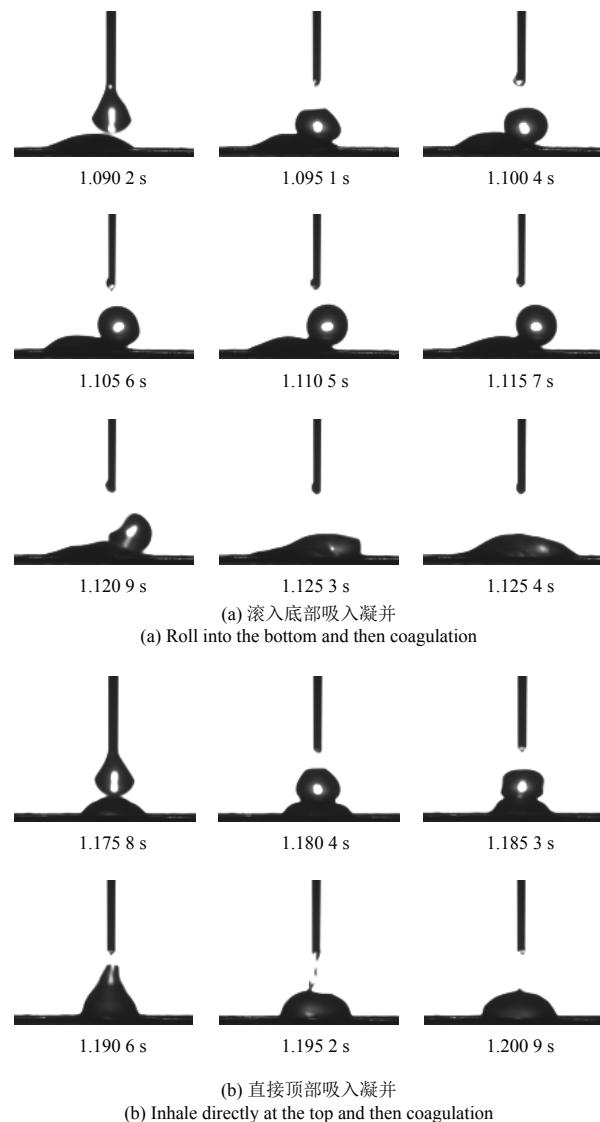


图 3 液滴叠加凝并两种行为方式
Fig. 3 Two behaviors of droplets superposition and coagulation

观测图像如图 3 所示。

2.3.1 滚入底部吸入凝并 在蕹菜分割的 6 个部分中, 仅 A1 部分出现滚入底部吸入凝并行为。由图 3(a) 可见, 在与铺展液滴叠加瞬间, 滴下液滴先从铺展液滴的顶端沿右侧圆周滚落到底部, 再被吸入后凝并形成 1 个新液滴。从叠加瞬间到凝并形成新液滴, 经历的时间为 0.035 2 s。

2.3.2 直接顶部吸入凝并 蕹菜分割除 A1 外的其

他5个部分均出现直接顶部吸入凝并行为。由图3(b)可见,在与铺展液滴叠加瞬间,滴下液滴直接从铺展液滴圆周顶端被吸入,再略微振荡后凝并形成1个新液滴。叠加和凝并过程时间为0.025 s。

2.4 液滴叠加前后动态接触角

由图4(a)可见:蕹菜A1部分叶面液滴叠加发生后接触角减小,叠加前铺展液滴的接触角为27.2°,叠加瞬间接触角值急剧振荡变化,当叠加完成凝并成新液滴后,接触角逐渐趋于稳定,在10 s处接触角降为23.7°,叠加前后接触角降幅为12.9%。在此过程中,液滴先从铺展液滴的顶端沿右侧圆周滚落到底部,时间为0.030 7 s,再被吸入后凝并形成新液滴,时间为0.004 5 s,整个过程经历的时间为0.035 2 s。从叠加瞬间到凝并形

成新液滴,接触角波动最大,波动频次也最多。由图4(b)~(f)可见,蕹菜B1、A2、B2、A3和B3 5个部分叶面,在发生液滴叠加后接触角均有不同程度的增加,其中:A3部分增幅最大,达27.4%;B3增幅最小,仅为2.9%。结合图3(a)结果发现,以滚入底部吸入方式叠加的液滴,其凝并成新液滴后接触角减小;而从图3(b)来看,以直接顶部吸入方式叠加的液滴凝并成新液滴后,接触角均有所上升。此外,结合图2(f),可以看到,叶面末端B3部分由于叶脉脉络较为密集,表面不平整,且粗糙度大,接触角出现短暂回流和振荡现象,液滴叠加后叶脉间空隙较多,因此接触角增幅最小。

2.5 液滴叠加前后铺展直径

蕹菜叶面液滴叠加前后动态铺展直径测量结

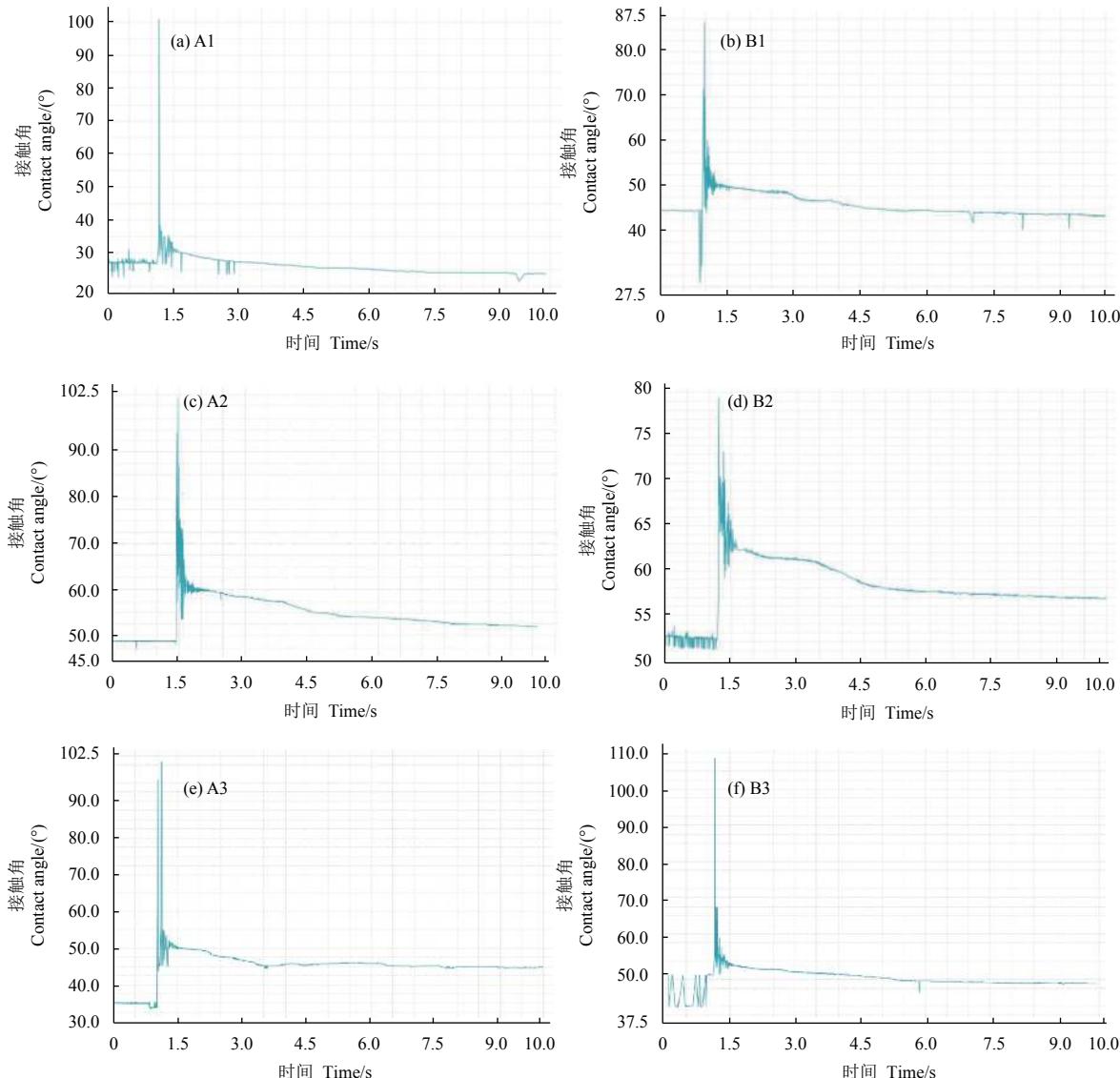


图4 液滴在蕹菜叶片不同部位叠加过程中动态接触角的变化趋势

Fig. 4 Dynamic contact angle change trends of droplets superposition process on the different part of water spinach leaf

果见图5(a)~(f)。由图5(a)可见,叠加前蕹菜A1部分叶面液滴铺展直径在4.513~4.639 mm范围内,叠加凝并成为新液滴后铺展直径先急剧收缩减少至3.356 mm,再迅速扩展增大到6.773 mm,后趋于平稳。结合图3(a)观测结果发现,以滚入底部吸入方式叠加的液滴,在凝并成新液滴的过程中其铺展直径随时间的变化接近于线性关系。由图5(b)和图5(d)可见,在蕹菜B1和B2部分叶面,液滴叠加瞬间各自铺展直径先急剧上升到峰值,然后在峰值处缓慢增加并逐渐趋于稳定。由图5(c)和图5(f)可见,蕹菜A2和B3部分叶面,发生液滴叠加后各自铺展直径先急剧上升到峰值,然后在峰值处迅速收缩回落至中部,再缓慢增加并逐渐趋于稳定。由图5(e)可见,蕹菜A3部分叶面,叠加液滴铺展直径先下降再上升之后回落,然后缓慢增加到稳定状态。结合图3(b)结果来看,以直接顶部吸入方式叠加的液滴,在凝并成新液滴的过程中,其铺展直径随时间的变

化呈先急剧上升再缓慢增加的曲线关系。

2.6 叠加液滴铺展驱动力成因分析

与文献[23]观测结果相似,本研究发现,叠加凝并形成的新液滴,其铺展直径与时间的关系可以很好地符合幂次法则(即 power law),即符合 $\phi(t) \propto C \cdot t^\alpha$ 。当幂次函数中的幂值 $\alpha = 0.1$ 时,铺展直径与时间的关系则符合 Tanner 法则(即 Tanner law),即符合 $\phi(t) \propto C \cdot t^{0.1}$ 。Tanner 法则^[21]认为,通过在气、固、液三相线处非平衡表(界)面张力导致的铺展,其铺展直径与时间的关系符合以下关系,即:

$$\phi(t) = 2\Omega^{\frac{3}{10}} \left(\frac{\gamma \cdot t}{\eta} \right)^{\frac{1}{10}} \quad (1)$$

式(1)中, ϕ 为液滴铺展直径, mm; t 为液滴铺展时间, s; Ω 为液滴体积, μL ; η 为液相黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; γ 为液体表面张力, mN/m 。

依据幂次法则,以幂值 $\alpha = 0.1$ 为界线,可以将铺展行为分为 $\alpha < 0.1$ 、 $\alpha = 0.1$ 和 $\alpha > 0.1$ 3种情

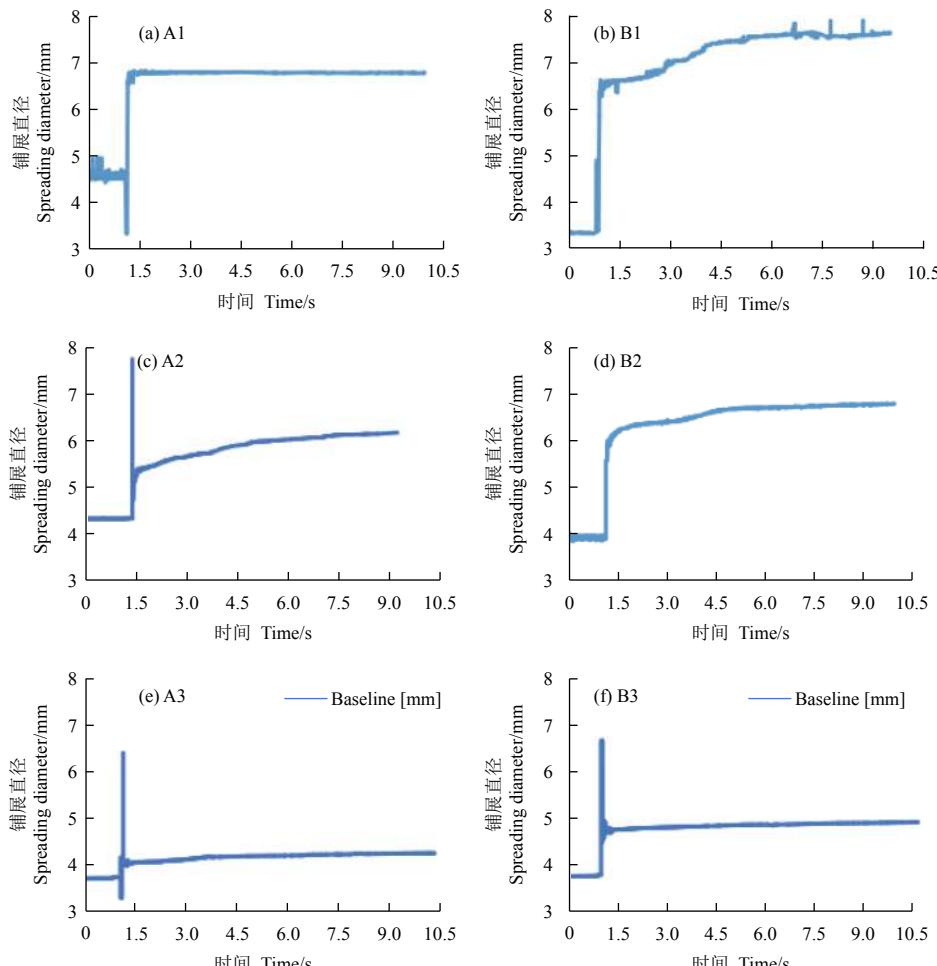


图5 液滴在蕹菜叶片不同部位叠加过程中动态铺展直径的变化趋势

形。蕹菜叶面液滴发生叠加后，会迅速凝并形成新液滴，根据幂次法则^[21]和文献方法^[22-23]，对凝并新液滴铺展直径随时间的关系进行拟合，结果如图 6(a)~(f) 所示。由图 6(a) 可见：在蕹菜 A1 部分叶面，以滚入底部吸入方式叠加的液滴，发生凝并后形成新液滴的铺展直径随时间的变化接近于线性关系。当铺展直径随时间变化呈线性关系（即 $\Phi(t) \propto C \cdot t^\alpha$ ）时，依据幂次法则^[21]，应属于在最大铺展速度条件下符合幂次函数中 t 的幂值 $\alpha > 0.1$ ，且幂值 $\alpha = 1$ 的情况，由此判断该行为是完全由表面张力梯度导致的超铺展行为。由图 6(b)~(f) 可见：蕹菜 B1、A2、B2、A3 和 B3 5 个部分叶面，以直接顶部吸入方式叠加的液滴，发生凝并后形成新液滴的铺展直径随时间的变化

符合幂函数关系，即符合 $\Phi(t) = C \cdot t^\alpha$ 。通过幂函数拟合，得到这一系列的系数值 C 、幂值 α 和拟合曲线。系数值 C 在 4.037 0~4.517 2 范围内，幂值 α 介于 0.014 2~0.056 1 之间，即幂值 α 均小于 0.1。表现出典型的幂值小于 0.1 的铺展直径与时间关系。依据 Tanner 法则^[23]，当表面张力为时间的函数时，可以推出幂值小于 0.1 的情况。由此推测该行为是凝并后形成的新液滴在蕹菜叶面固-液-气表(界)面动态表面张力变化导致的铺展行为。这种情况说明，叠加凝并形成的溴氰菊酯乳油新液滴在蕹菜叶面铺展过程中不断产生新的表(界)面，而该药液液滴需要从体相中不断扩散并吸附到新的表(界)面，因此在铺展过程中的表面张力为动态变化，且大于平衡表面张力。根据文献 [5, 23-25]，

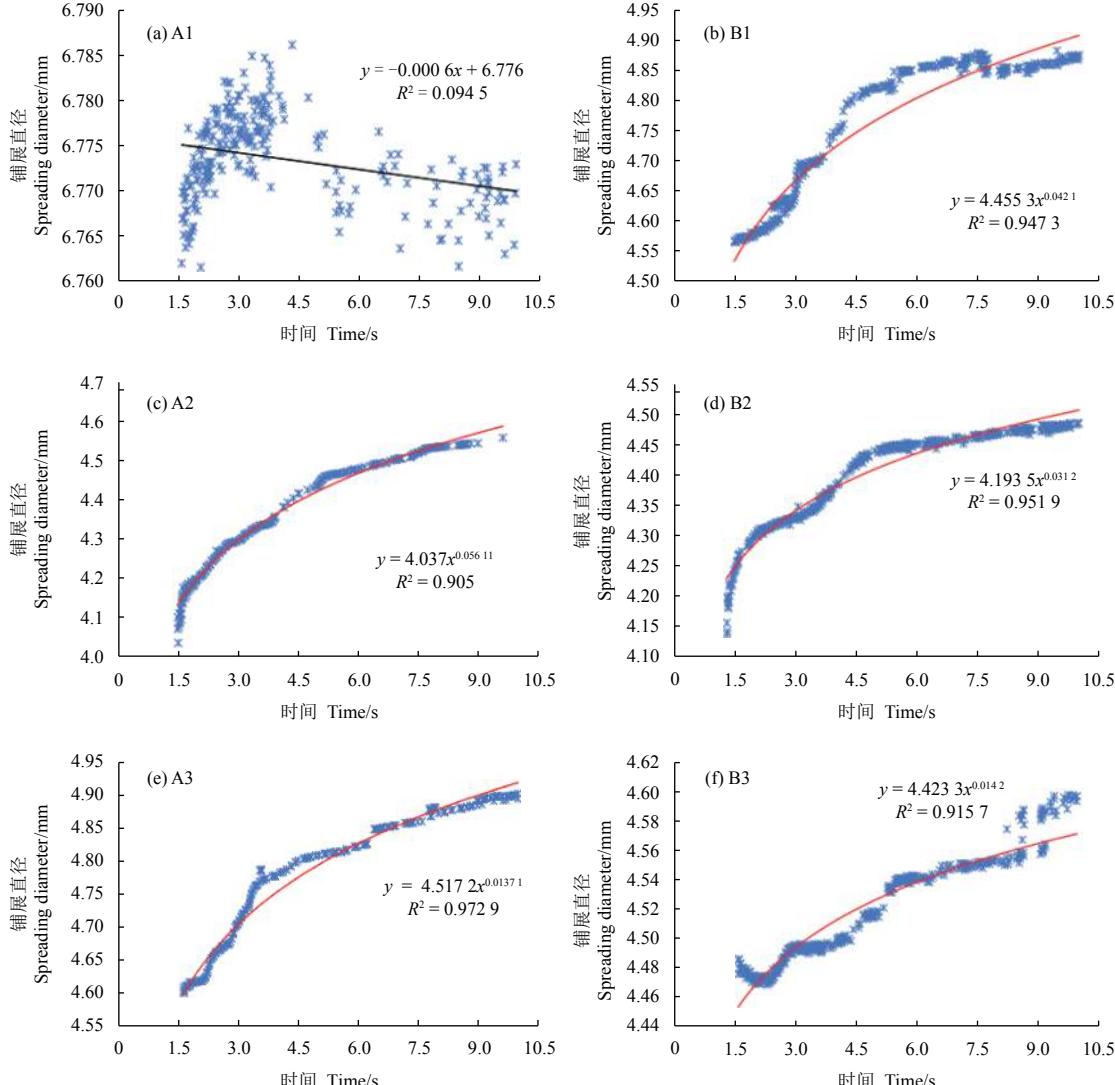


图 6 凝并新液滴铺展直径在蕹菜叶片不同部位随时间变化的线性和非线性曲线拟合

Fig. 6 Linear and nonlinear curve fitting of coagulated new droplets's spreading diameter on the different parts of water spinach leaf with time

拟合结果反映出叠加凝并形成的新液滴在蕹菜叶面铺展时不能恒等于平衡表面张力,由此可以推测其动态表面张力是占据绝对优势的铺展驱动力,也是导致铺展的主导因素。依据本研究结果和数据统计分析,在药液的浓度、药液的理化因素,以及叶片铺展表(界)面性质都没有发生根本变化的前提下,叠加凝并后形成的新液滴,其动力学成因分析遵循单液滴铺展模型理论及幂次法则,无论哪种叠加方式导致的铺展行为,都是表面张力梯度与非平衡的表(界)面张力共同作用的结果。

3 结论

1) 采用 5 μL 等体积 25 mg/L 溴氰菊酯乳油药液液滴在蕹菜叶片表面 6 个部位进行垂直叠加,当液滴碰撞速率为 0.082 6 m/s 时,会出现滚入底部吸入凝并和直接顶部吸入凝并两种方式。前种方式液滴从叠加开始至凝并形成新液滴比后种方式时间延长 0.010 1 s。在现实植保作业条件下,要充分考虑精准施药过程雾滴在靶标叶面上的凝并时间和叠加效应。

2) 以滚入底部吸入方式叠加形成的新液滴,其接触角减小 12.9%;而以直接顶部吸入方式叠加形成的新液滴,接触角增大 6.5%~27.4%。因此,前一种方式能使凝并新液滴的接触角减小,有利于药液在蕹菜叶面铺展,应结合靶标叶面部位及特征,选择适合的施药方式,可有效减少药液流失。

3) 根据幂次法则对液滴叠加铺展驱动力成因进行分析,发现滚入底部吸入和直接顶部吸入这 2 种叠加方式形成新液滴的铺展直径随时间的变化分别呈线性关系和符合幂函数关系(幂值 $\alpha < 0.1$),据此推测前一种是完全由表面张力梯度导致的超铺展行为,后一种是由动态表面张力主导驱动的铺展行为。从观测统计结果来看,在 10 s 稳定时前者的铺展直径(6.773 mm)大于后者(4.903 mm)。因此从蕹菜叶面液滴叠加凝并施药效果来看,可以认为完全由表面张力梯度导致的超铺展行为优于由动态表面张力主导驱动的铺展行为。

参考文献 (References):

- [1] RUANO F, CAMPOS M, SÁNCHEZ-RAYA J, et al. Deltamethrin application on colonized olive logs: effect on the emergence of the olive bark beetle *Phloeotribus scarabaeoides* Bernard 1788 (Coleoptera: Scolytidae) and its associated parasitoids[J]. *Crop Prot*, 2008, 27(3-5): 614-621.
- [2] 陆军. 喷雾药液在靶标植株上的沉积与润湿研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- [3] LU J. Study on deposition and wetting of spray liquid on plant target[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [4] CUNHA J P, CHUECA P, GARCERÁ C, et al. Risk assessment of pesticide spray drift from *Citrus* applications with air-blast sprayers in Spain[J]. *Crop Prot*, 2012, 42: 116-123.
- [5] 钟香梅. 典型靶标作物叶表面农药液滴吸附特性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [6] ZHONG X M. Study on adsorption characteristics of pesticide droplets on leaf surface of the typical target crops[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [7] 张红涛, 陆军, 魏德云, 等. 烷基聚葡萄糖苷液滴在黄瓜叶面的润湿状态及动态铺展行为[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 81-87.
- [8] ZHANG H T, LU J, WEI D Y, et al. Wetting state and dynamic spreading behavior of alkyl polyglycoside drop on cucumber leaf surface[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2017, 33(3): 81-87.
- [9] GASKIN R E, STEELE K D, FORSTER W A. Characterising plant surfaces for spray adhesion and retention[J]. *New Zealand Plant Protection*, 2005, 58: 179-183.
- [10] 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 Manag Sci*, 2008, 64(5): 497-504.
- [11] TAYLOR P, CHAMBERS L M. Dynamic surface effects in foliar retention[J]. *Asp Appl Biol*, 2002, 66: 259-66.
- [12] GATNE K P, JOG M A, MANGLIK R M. Surfactant-induced modification of low weber number droplet impact dynamics[J]. *Langmuir*, 2009, 25(14): 8122-8130.
- [13] DONG X. Systematic investigation of 3-dimentional spray droplet impaction on leaf surface[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2013.
- [14] 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.
- [15] JIA W D, ZHU H P, DONG X, et al. Impact of spray droplet on soybean leaf surface[J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2013, 44(12): 87-93.
- [16] 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.
- [17] DING W L, JIN M J, LUO L F, et al. Behavior analysis of spray droplet interacting with plant leaves based on virtual model[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2017, 33(14): 40-48.
- [18] TAYLOR P. The wetting of leaf surfaces[J]. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 2011, 16(4): 326-334.
- [19] 罗临风. 喷雾场景与水稻冠层交互场景模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- [20] LUO L F. Simulation of interaction between spray scene and rice canopy[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [21] 徐亚辉, 许林云, 周宏平, 等. 基于函数模型的喷杆式组合喷头雾滴沉积效果研究[J]. *林业工程学报*, 2018, 32(1): 117-122.
- [22] XU Y H, XU L Y, ZHOU H P, et al. Droplet deposition effect of the combined nozzles of boom sprayer based on function model[J]. *J For*

- Eng, 2018, 32(1): 117-122.
- [16] 陆军, 张红涛, 魏德云, 等. 基于时间序列分析的雾滴叶面动态接触角预测与建模[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 80-86.
- LU J, ZHANG H T, WEI D Y, et al. Dynamic contact angle forecasting and modeling for drop-leaf interface based on time series analysis[J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2013, 44(2): 80-86.
- [17] 徐广春, 顾中言, 徐德进, 等. 稻叶表面特性及雾滴在倾角稻叶上的沉积行为[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(21): 4280-4290.
- XU G C, GU Z Y, XU D J, et al. Characteristics of rice leaf surface and droplets deposition behavior on rice leaf surface with different inclination angles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(21): 4280-4290.
- [18] JENSEN P K, LUND I, NYTTENS D. Spray liquid distribution and biological efficacy of commercially available nozzles used for precision weed control[J]. *Biosyst Eng*, 2013, 116(4): 316-325.
- [19] 溴氰菊酯乳: GB 29386—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
Deltamethrin: GB 29386-2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2013.
- [20] 代超, 纪献兵, 周冬冬, 等. 液滴碰撞不同湿润性表面的行为特征[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(1): 36-42.
- DAI C, JI X B, ZHOU D D, et al. Behavioral characteristics of droplet collision to different wettability surfaces[J]. *J Zhejiang Univ(Eng Sci)*, 2018, 52(1): 36-42.
- [21] TANNER L H. A comparison between talysurf 10 and optical measurements of roughness and surface slope[J]. *Wear*, 1979, 57(1): 81-91.
- [22] 王晓东, 彭晓峰, 陆建峰, 等. 粗糙表面接触角滞后现象分析[J]. *热科学与技术*, 2003, 2(03): 230-234.
- WANG X D, PENG X F, LU J F, et al. Analysis of contact angle hysteresis on rough surfaces[J]. *J Thermal Sci Tech*, 2003, 2(03): 230-234.
- [23] 张越, 张高勇, 韩富. 新型三硅氧烷表面活性剂在低能表面的铺展机理[J]. *化学学报*, 2007, 65(5): 465-469.
ZHANG Y, ZHANG G Y, HAN F. Spreading mechanism of new glucosamide-based trisiloxane surfactant on low-energy surface[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2007, 65(5): 465-469.
- [24] LU J, ZHANG H T, WEI D Y, et al. Experimental computation process of the surface energy of leaves by acquiring drop image information[J]. *J Nanoelectron Optoelectron*, 2012, 7(2): 173-176.
- [25] 王波, 宋坚利, 曾爱军, 等. 剂型及表面活性剂对农药药液在植物叶片上铺展行为的影响[J]. *农药学学报*, 2012, 14(3): 334-340.
WANG B, SONG J L, ZENG A J, et al. Effects of formulations and surfactants on the behavior of pesticide liquid spreading in the plant leaves[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2012, 14(3): 334-340.

(责任编辑: 金淑惠)