

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.016

# 基于时间序列分析的雾滴叶面动态接触角预测与建模\*

陆军<sup>1</sup> 张红涛<sup>2</sup> 魏德云<sup>3</sup> 胡玉霞<sup>4</sup>

(1. 浙江农林大学工程学院, 临安 311300; 2. 华北水利水电学院电力学院, 郑州 450011;

3. 浙江农林大学天目学院, 临安 311300; 4. 郑州大学电气工程学院, 郑州 450001)

**摘要:** 提出了一种基于图像数据采集的时间序列分析与空间趋势面相结合的雾滴叶面动态接触角预测和建模方法。利用 CCD 数字摄像技术, 测定了质量分数为 16.08% ~ 82.14% 的 8 种草甘膦助剂 (EF8108-B) 水溶液液滴在黄瓜叶面上的动态接触角  $\theta$ 。实验结果表明, 接触角在 0 ~ 2 s 内急剧下降, 2 ~ 10 s 内下降平缓并渐趋于稳定; 各质量分数 EF8108-B 液滴在黄瓜叶面的接触角没有随着质量分数的增大呈现接触角降幅增加的趋势。采用时间序列分析建立了黄瓜叶片界面 2 s 内液滴的动态接触角二阶自回归模型 AR(2)、动态液滴尺寸滑动平均模型 MA(3) 以及动态液滴形状指数平滑模型 ES(6)。结合趋势面原理, 模拟铺展直径  $\Phi$ 、液滴高度  $H$ 、液滴面积  $A$  和液滴体积  $V$  在空间上的分布规律, 构建出黄瓜叶面动态接触角的三维趋势面模型。数值模拟检验和实验验证结果表明, 模型拟合度达到 94.72%, 具有较高的模拟精度。

**关键词:** 雾滴 动态接触角 时间序列分析 叶片润湿 趋势面模型

**中图分类号:** S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0080-07

## Dynamic Contact Angle Forecasting and Modeling for Drop – Leaf Interface Based on Time Series Analysis

Lu Jun<sup>1</sup> Zhang Hongtao<sup>2</sup> Wei Deyun<sup>3</sup> Hu Yuxia<sup>4</sup>

(1. School of Engineering, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China

2. Institute of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China

3. Tianmu College, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China

4. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A prediction and modeling method for dynamic contact angle of spraying agricultural drop on cucumber leaf surface based on image data collected was presented with combination of time series analysis and applying spatial trends theory. The dynamic contact angle  $\theta$  of different mass fraction of glyphosate additives (EF8108-B) aqueous solution range from 16.08% to 82.14% on the cucumber leaf surface were measured by applying high-speed digital camera technology. Experimental results showed that the contact angle declined rapidly within the first 2 s, and then decreased slowly and gradually to reach its stabilized in the following 8 s. The contact angle didn't show increase of a downward trend with increasing EF8108-B solution concentration. The self-relevant and self-regression model (AR(2)), the mobile average model (MA(3)) and exponential smoothing model (ES(6)) were established according to time series analysis, respectively. Moreover, the spatial distribution of spreading diameter, drop height, drop area and drop volume were simulated by applying trend surface theory, then the 3-D dynamic contact angle trend surface model were constructed. The numerical simulation and experimental verification results indicated that the goodness of fit was up to 94.72%.

**Key words:** Drop Dynamic contact angle Time series analysis Leaf wetting Trend surface model

收稿日期: 2012-07-10 修回日期: 2012-10-24

\* 国家自然科学基金资助项目 (31101085)、中国博士后科学基金资助项目 (2012M521176) 和浙江农林大学科研发展基金资助项目 (2034020044)

作者简介: 陆军, 讲师, 主要从事精准施药技术研究, E-mail: lujun12404@126.com

## 引言

我国是一个农药生产和消费大国,农药生产技术处于国际先进水平,但我国农药使用技术却严重落后,带来了诸如农药利用率低、农产品中农药残留超标、药液流失严重等系列问题<sup>[1~2]</sup>。由于农药利用率低,药液流失随着农药施用量的增加,日益加大进入环境的量,已引起人们愈来愈强烈的关注<sup>[3~4]</sup>。改善喷雾药液在作物叶面的润湿性是减少药液流失的有效技术手段<sup>[5~6]</sup>。农药喷洒要求药液到达叶面后迅速铺展,并用动态接触角来筛选助剂<sup>[7~8]</sup>。动态接触角是研究雾滴叶面润湿行为的一个重要参数,对雾滴叶面动态接触角进行预测分析与建模是国内外农药应用技术相关领域研究的热点和难点,迄今存在许多问题急待解决<sup>[9]</sup>。

动态接触角的预测和建模方法很多,国外采用较为成熟的方法有回归分析法和最小二乘法以及近年来迅速发展的神经网络法、卡尔曼滤波法、遗传算法和小波分析等<sup>[10~11]</sup>。这些方法各有特点和适用的场合,但部分算法存在构造复杂、推导困难的问题,离实际应用也有一定距离。为此,本文基于图像采集数据,提出时间序列与空间趋势面相结合的预测分析和建模方法,为精准施药技术提供理论基础和技术支持。

## 1 时间序列分析与趋势面原理

### 1.1 时间序列分析

#### 1.1.1 自相关与自回归分析

$n$ 阶自回归方程表达式 AR( $n$ )为<sup>[12]</sup>

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \cdots + \varphi_n X_{t-n} + a_t \quad (1)$$

式中  $X_t$ ——时间序列

$a_t$ ——白噪声序列

$\varphi_i$ ——自回归参数,  $i=1, 2, \dots, n$

$n$ ——自回归模型阶数

一般地,  $n$ 阶自回归模型 AR( $n$ )的自相关函数(ACF)为<sup>[12]</sup>

$$\rho_k = \varphi_1 \rho_{k-1} + \varphi_2 \rho_{k-2} + \cdots + \varphi_n \rho_{k-n} \quad (2)$$

式中  $\rho$ ——自相关函数(ACF)

$k$ ——滞后数

#### 1.1.2 滑动平均值分析

滑动平均值方程表达式 MA( $m$ )为<sup>[12]</sup>

$$M_t = \frac{Y_{t-n+1} + l + Y_{t-1} + Y_t}{h} \quad (3)$$

式中  $M_t$ ——滑动平均值

$h$ ——平均的历史数据时段数

$l$ ——最大时段数

$Y_t$ —— $t$ 时刻对应的数据

$Y_{t-1}$ —— $t-1$ 时刻对应的数据

### 1.1.3 指数平滑分析

指数平滑方程表达式 ES( $i$ )为<sup>[12]</sup>

$$S_t = \alpha F_t + (1 - \alpha) S_{t-1} \quad (4)$$

式中  $S_t$ —— $t$ 时刻的预测值

$F_t$ —— $t$ 时刻的实际值

$S_{t-1}$ —— $t-1$ 时刻的预测值

$\alpha$ ——平滑系数,介于0~1之间

## 1.2 趋势面原理

### 1.2.1 趋势面基本方程

设某影响因素的实际观测数据为  $z_i(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 趋势面拟合值为  $\hat{z}_i(x_i, y_i)$ , 则趋势面基本方程式为<sup>[13]</sup>

$$z_i(x_i, y_i) = \hat{z}_i(x_i, y_i) + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中  $z_i(x_i, y_i)$ ——实际观测数据

$\hat{z}_i(x_i, y_i)$ ——趋势面拟合值

$\varepsilon_i$ ——剩余值(残差值)

### 1.2.2 趋势面模型参数

根据观测值  $z_i, x_i, y_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 确定多项式的系数  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ , 使残差平方和最小。其残差平方和为<sup>[13]</sup>

$$Q = \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2 =$$

$$\sum_{i=1}^n [z_i - (a_0 + a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \cdots + a_p x_{pi})]^2 \quad (6)$$

式中  $a_m$ ——多项式系数,  $m=0, 1, 2, \dots, p$

### 1.2.3 趋势面模型验证

一般用变量  $z$  的总离差平方和中回归平方和所占的比重表示回归模型的拟合优度。总离差平方和等于剩余平方和与回归平方和之和, 即<sup>[13]</sup>

$$S_T = \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - \bar{z})^2 = S_D + S_R \quad (7)$$

式中  $S_T$ ——总离差平方和

$S_D$ ——剩余平方和

$S_R$ ——回归平方和

趋势面与实际面的拟合度系数  $R^2$  是检验回归模型拟合优度的重要指标<sup>[13]</sup>

$$R^2 = \frac{S_R}{S_T} = 1 - \frac{S_D}{S_T} \quad (8)$$

趋势面拟合适度的显著性  $F$  检验是对趋势面回归模型整体的显著性检验<sup>[13]</sup>

$$F = \frac{\frac{S_R}{p}}{\frac{S_D}{n-p-1}} \quad (9)$$

## 2 实验

### 2.1 材料与仪器

试剂与材料:草甘膦助剂(试剂型号为 EF8108-B,南京金陵石化研究院);新鲜黄瓜叶片(温室种植,采摘时间在 1 h 内);去离子水。

主要测量仪器:接触角测量仪(CAM 101 型,芬兰 KSV 仪器公司);微量注射器(量程为 0.5 ~ 100  $\mu\text{L}$ ,瑞士 Hamilton 公司)。

### 2.2 实验方案

实验室室内环境温度( $3 \pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度( $58 \pm 2$ )%。采摘的黄瓜叶片品种为津研 4 号,已在温室生长 65 d,取自顶端向下的第 4 片叶。将草甘膦助剂(EF8108-B)与一次去离子水配制成质量分数分别为 16.08%、22.33%、27.71%、36.51%、53.49%、69.70%、77.53% 和 82.14% 的 8 种 EF8108-B 水溶液。为保持黄瓜叶片新鲜和保证溶液药效,实验时间在叶片采摘和溶液配制 1 h 内进行。

沿主叶脉对称剪下 2.5 cm  $\times$  2.5 cm 的黄瓜叶片,平整铺开后用双面胶将黄瓜叶片粘在载玻片上,用微量注射器将液滴体积为 5 ~ 10  $\mu\text{L}$  的 8 种质量分数 EF8108-B 水溶液分别滴于黄瓜叶面上,再用接触角测量仪分别测量各种质量分数液滴的动态润湿参数(动态接触角、动态液滴尺寸和动态液滴形状)。

### 2.3 动态润湿参数值测量方法

#### 2.3.1 动态接触角

将接触角测量仪的 CCD 数字摄像机打开,在连续记录模式下,设定图像采集速度为 8.93 帧/s,图像采集时间设为 10 s。对 8 种质量分数 EF8108-B 水溶液液滴在黄瓜叶面上的动态躺滴图像进行拍摄,利用图像分析软件 CAM 2008 对这些连续的躺滴图像进行处理(每帧间隔为 112 ms,共 89 帧),即可测得这 8 种质量分数 EF8108-B 水溶液各自在黄瓜叶片上连续 10 s 内的动态润湿数据。图 1 为接触角  $\theta$  的测量及其拟合图像。

#### 2.3.2 动态液滴尺寸

液滴尺寸包括铺展直径  $\Phi$  和液滴高度  $H$  两个部分。通过对采集图像进行图像处理,即可测得 8 种质量分数 EF8108-B 水溶液在黄瓜叶片上连续 10 s 内的动态液滴尺寸。

#### 2.3.3 动态液滴形状

液滴形状包括液滴面积  $A$  和液滴体积  $V$  两部分。其测量方法与动态液滴尺寸的测量方法一致,利用图像分析软件对液滴图像外轮廓进行拟合与计算,即可测得 8 种质量分数液滴在黄瓜叶片上连续

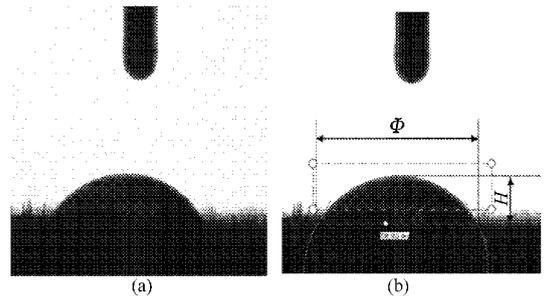


图 1 躺滴图像其拟合

Fig. 1 Measurement of contact angle and its fitting image

(a) 躺滴图像 (b) 拟合图像

10 s 内的动态液滴形状。

### 2.4 时间序列数据采集结果

实验测量得到了质量分数为 16.08% ~ 82.14% 的 8 种草甘膦助剂(EF8108-B)水溶液液滴在黄瓜叶面上动态润湿的时间序列数据,绘制出 10 s 内的动态润湿时间序列图,如图 2 所示。从图 2a 可以看出,接触角  $\theta$  在 0 ~ 2 s 内急剧下降,在 2 ~ 10 s 内下降平缓并渐趋于稳定。选取高、中、低质量分数的 EF8108-B 水溶液在 2 ~ 10 s 内的下降幅度进行比较后发现,质量分数为 82.14%、53.49% 和 16.08% 的液滴在黄瓜叶片上的接触角分别降低了 7.30 $^{\circ}$ 、19.84 $^{\circ}$  和 0.28 $^{\circ}$ 。从下降幅度来看,53.49% 的降幅最大。也即表明,EF8108-B 液滴在黄瓜叶面的接触角没有随着质量分数的增大呈现接触角降幅增加的趋势。这与 EF8108-B 液滴的表面张力、黄瓜叶片的结构特征及其界面的润湿性能、粗糙表面接触角滞后现象有关<sup>[2~4]</sup>。

从图 2b ~ 2e 可以看出,铺展直径  $\Phi$ 、液滴高度  $H$ 、液滴面积  $A$  和液滴体积  $V$  也与接触角  $\theta$  的变化趋势相同,都在 0 ~ 2 s 内急剧下降,2 ~ 10 s 逐渐趋于稳定。因此选取 0 ~ 2 s 内的时间序列进行分析与预测,并以此数据为基础建立数学模型。

## 3 雾滴叶面动态接触角模型构建

### 3.1 动态接触角时间序列分析

以质量分数 36.51% 的 EF8108-B 水溶液液滴在黄瓜叶片上 2 s 内的动态接触角  $\theta$  实验数据为时序序列,进行自相关与自回归分析。由式(1)建立的一阶自回归模型 AR(1)为

$$X_t = 16.434 + 0.5839X_{t-1} \quad (10)$$

式中  $X_t$ —— $t$  时刻对应的接触角, $(^{\circ})$

$X_{t-1}$ ——滞后长度为 1 的接触角, $(^{\circ})$

图 3 为一阶自回归模型 AR(1)的自相关系数与散点图。

该模型的剩余标准差为 1.936 4,将自回归方程中的预测值与原数据的进行比较,结果如图 4 所示。

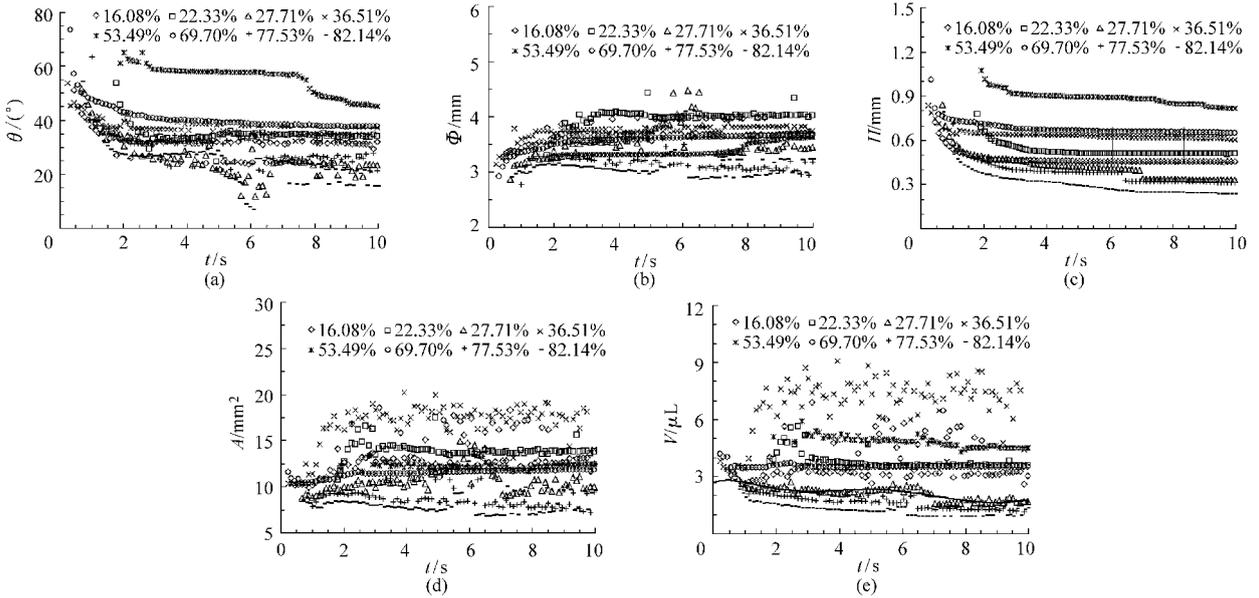


图 2 动态润湿参数时间序列  
Fig. 2 Dynamic wetting time series parameters

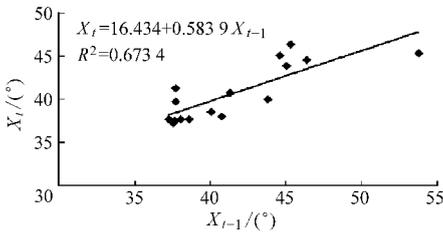


图 3 自相关系数与散点图

Fig. 3 Autocorrelation and scatter plot

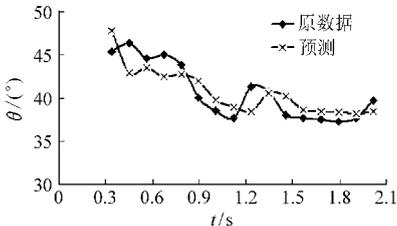


图 4 一阶自回归方程中预测值与原数据的比较

Fig. 4 Predictive value from autoregression equation compared with the original data

Durbin - Watson 统计量 (DW)<sup>[12]</sup> 用来检验时序模型中相继残数的相关性,应用 Excel 软件的函数功能计算得到接触角时间序列的残数, DW 值为 1.737 8,说明残数有一定的正自相关性,但残数的自相关性不强。根据式(2),计算出滞后值为 1~8 的 ACF 值。滞后值为 1 时的 ACF 值为 0.573,滞后值为 2 时的 ACF 值为 0.467,说明滞后值为 1 和滞后值为 2 的时序数据和前面的数据相关性很大,可以同时用滞后值 1 和滞后值 2 作为自变量来建立二阶自回归模型 AR(2)。以滞后值为横坐标,自相关系数为纵坐标,绘制出自相关系数函数的 ACF 图,如图 5 所示。

由此,建立的动态接触角二阶自回归模型

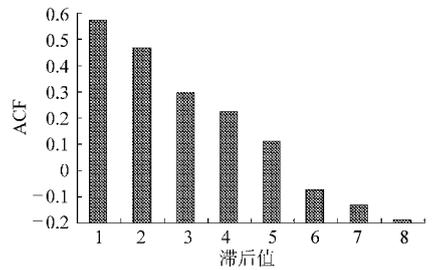


图 5 自相关系数函数 (ACF)

Fig. 5 Autocorrelation coefficient function

AR(2) 模型为

$$X_t = 8.9355 + 0.6296X_{t-1} + 0.1385X_{t-2} \quad (11)$$

式中  $X_{t-1}$  ——滞后值为 1 的接触角, (°)

$X_{t-2}$  ——滞后值为 2 的接触角, (°)

比较后发现,较之 AR(1) 模型,AR(2) 模型具有较高的相关性 ( $R^2 = 0.7289$ ) 和较高的拟合精度。因此选择 AR(2) 模型作为动态接触角模型。将原数据与预测值进行比较,结果如图 6 所示。

### 3.2 动态液滴尺寸时间序列分析

采用时间序列滑动平均值法来分析和预测液滴尺寸的动态变化趋势。根据质量分数为 36.51% 的 EF8108 - B 水溶液液滴在黄瓜叶面上 2 s 内的实验数据,由式(3)选取平均时段数为 3,由此建立的动态液滴尺寸(铺展直径  $\Phi$  与液滴高度  $H$ ) 的滑动平均模型 MA(3) 为

$$M_t = \frac{1}{3}(Y_t + Y_{t-1} + Y_{t-2}) \quad (12)$$

式中  $M_t$  ——滑动平均液滴尺寸, mm

$Y_t$  —— $t$  时刻对应的液滴尺寸, mm

$Y_{t-1}$  ——滞后值为 1 的液滴尺寸, mm

$Y_{t-2}$  ——滞后值为 2 的液滴尺寸, mm

由此建立的滑动平均模型中铺展直径  $\Phi$  和液滴高度  $H$  的决定系数  $R^2$  分别为 0.976 7 和 0.945 2, 动态液滴尺寸的原数据与其滑动平均预测值的比较结果如图 7 所示。

### 3.3 动态液滴形状时间序列分析

采用时间序列指数平滑法来分析和预测液滴形状的动态变化趋势。由式(4)选用时间序列数据系列的前 6 个数据的平均值作为指数平滑的初始值,

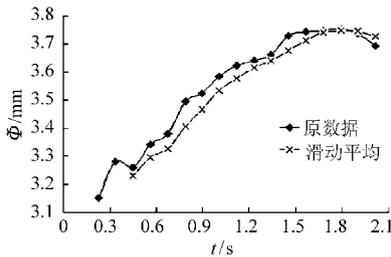


图7 动态液滴尺寸的原数据与其滑动平均预测值的比较

Fig.7 Original data compared with moving average values

由此建立的动态液滴形状(液滴面积  $A$  与液滴体积  $V$ )的指数平滑模型 ES(6) 为

$$S_{t+1} = \alpha F_t + (1 - \alpha) S_t \quad (13)$$

式中  $S_{t+1}$ —— $t+1$  时刻液滴面积或液滴体积的预测值,  $\text{mm}^2$  或  $\mu\text{L}$

$F_t$ —— $t$  时刻液滴面积或液滴体积的实际值,  $\text{mm}^2$  或  $\mu\text{L}$

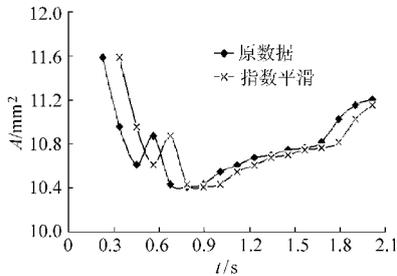


图8 动态液滴形状的原数据与其指数平滑预测值的比较

Fig.8 Original data compared with exponential smoothing value

### 3.4 动态接触角的三维趋势面模型

根据式(5)~(6), 应用 DPS v2.00 软件<sup>[14]</sup> 建立了动态接触角与液滴尺寸和液滴形状的二次多项式趋势面模型, 并使用 Matlab 7.0 软件<sup>[15]</sup> 绘制的三维趋势面, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 液滴在黄瓜叶面 2 s 润湿过程中, 影响因素(铺展直径  $\Phi$ 、液滴高度  $H$ 、液滴面积  $A$  和液滴体积  $V$ ) 在空间上的分布规律, 以及动态接触角  $\theta$  在空间上的变化趋势。

### 3.5 动态接触角趋势面模型的验证

根据式(7)~(9), 对上述 6 个趋势面模型进行验证, 通过趋势面拟合适度的显著性  $F$  检验和方差分析, 得到趋势面与实际面的拟合度决定系数  $R^2$ 、

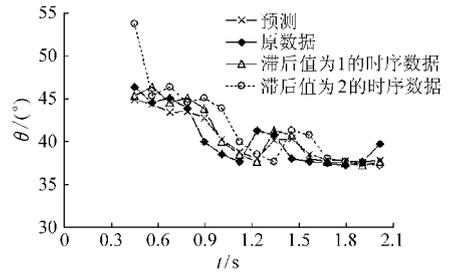
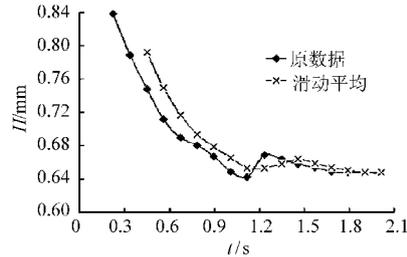


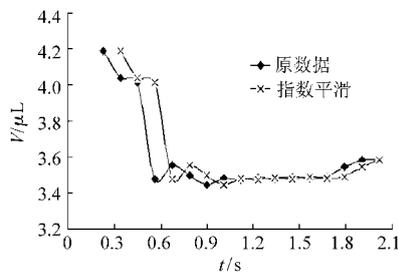
图6 二阶自回归方程中预测值与原数据的比较

Fig.6 Original data compared with predicted values



$S_t$ —— $t$  时刻液滴面积或液滴体积的预测值,  $\text{mm}^2$  或  $\mu\text{L}$

经计算得到最佳平滑系数  $\alpha$  为 1, 阻尼系数  $1 - \alpha$  为 0。由此建立的平滑模型中液滴面积  $A$  和液滴体积  $V$  的决定系数  $R^2$  分别为 0.642 6 和 0.804 9, 动态液滴形状的原数据与其指数平滑预测值的比较结果如图 8 所示。



残差标准差和拟合度, 如表 1 所示。由表 1 可以看到, 建立的趋势面模型  $R^2$  在 0.897 2 以上, 最高达 0.951 8, 说明所建模型的规律性强, 拟合效果较好。此外,  $F$  检验结果显示,  $F$  值都在置信水平  $\alpha = 0.05$  以下, 表明该接触角二次趋势面的回归方程显著。

上述模型确定后, 利用实验观测数据对模型进行了验证分析。结果表明, 模型预测值与实验观测值基本一致, 可用于预测 2 s 内的动态接触角的变化趋势, 模型达到了一定的可靠性和准确性。

## 4 结论

(1) 质量分数为 16.08% ~ 82.14% 的 8 种草甘

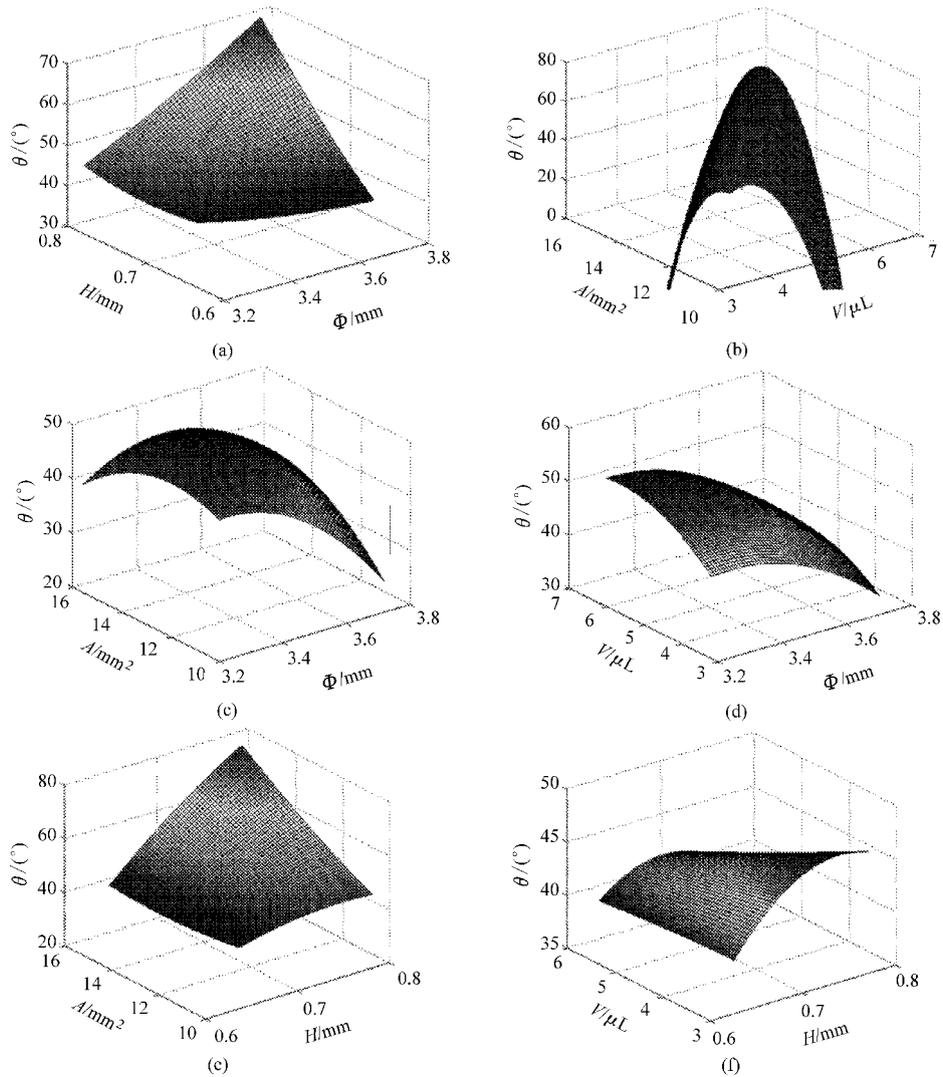


图 9 动态接触角趋势面模型

Fig. 9 Trend surface model of dynamic contact angle

表 1 动态接触角趋势面模型检验

Tab. 1 Trend surface model validation of dynamic contact angle

图号	$F$	$R^2$	残差标准差	拟合度/%
9a	48.276 6	0.929 5	0.634 1	96.41
9b	32.591 1	0.898 1	0.765 2	94.77
9c	72.046 8	0.951 8	0.522 2	97.56
9d	62.383 4	0.944 8	0.560 1	97.20
9e	36.260 9	0.907 6	0.727 3	95.27
9f	32.319 7	0.897 2	0.768 1	94.72

膦助剂 (EF 8108 - B) 水溶液液滴在黄瓜叶面上的动态接触角在 0 ~ 2 s 内急剧下降, 在 2 ~ 10 s 内下降平缓并渐趋于稳定, 在达到 10 s 时各接触角稳定在 15.44° ~ 45.13° 范围内。液滴在黄瓜叶面的接触角没有随着质量分数的增大呈现接触角降幅增加的趋势。

(2) 采用时间序列分析方法建立了草甘膦助剂

(EF 8108 - B) 水溶液液滴在黄瓜叶面上 2 s 内的动态接触角二阶自回归模型 AR(2)、动态液滴尺寸 (包括铺展直径和液滴高度) 滑动平均模型 MA(3), 以及动态液滴形状 (包括液滴面积和液滴体积) 指数平滑模型 ES(6)。其中, AR(2) 模型的决定系数  $R^2$  为 0.728 9、MA(3) 模型为 0.976 7 和 0.945 2、ES(6) 模型为 0.642 6 和 0.804 9。模型较为准确描述了液滴在叶面的动态润湿过程, 可以对动态润湿过程中的接触角、液滴尺寸和液滴形状进行模拟和预测。

(3) 结合趋势面原理, 模拟铺展直径  $\Phi$ 、液滴高度  $H$ 、液滴面积  $A$  和液滴体积  $V$  在空间上的分布规律, 构建了 2 s 内黄瓜叶面动态接触角三维趋势面模型。趋势面模型拟合度为 94.72% ~ 97.56%, 拟合度决定系数  $R^2$  在 0.897 2 以上, 最高达到 0.951 8。该模型从宏观上较好地反映了雾滴叶面接触角的变化趋势, 可实现 2 s 内动态接触角的精准预测。

## 参 考 文 献

- 1 祁力钧,傅泽田,史岩. 化学农药施用技术与粮食安全 [J]. 农业工程学报, 2002,18(6): 203~206.  
Qi Lijun, Fu Zetian, Shi Yan. Technology of pesticide application and food security [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(6): 203~206. (in Chinese)
- 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.  
Lu Jun. Study on deposition and wetting of spray liquid on plant target [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- 3 Lu Jun, Zhang Hongtao, Wei Deyun, et al. Experimental computation process of the surface energy of leaves by acquiring drop image information [J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2012, 7(2): 173~176.
- 4 Law S E. Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century [J]. Journal of Electrostatics, 2001, 48(11): 25~42.
- 5 陆军,贾卫东,邱白晶,等. 黄瓜叶片喷雾药液持留量试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 60~64.  
Lu Jun, Jia Weidong, Qiu Baijing, et al. Experiment on retention of spray liquid on cucumber leaves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 60~64. (in Chinese)
- 6 刘春景,王科元. 气助式静电喷头雾化性能和荷电效果试验 [J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(1): 116~121.  
Liu Chunjing, Wang Keyuan. Atomization quality and charge performance experimentation research on air-assisted electrostatic spraying nozzle [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(1): 116~121. (in Chinese)
- 7 陆军,李萍萍,贾卫东,等. 温室轴流风送药雾靶标沉积试验 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 88~92.  
Lu Jun, Li Pingping, Jia Weidong, et al. Experiment of axial-flow air-carried toward-target pesticide deposition in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 88~92. (in Chinese)
- 8 Law S E. Electrostatic pesticide spraying: concepts and practice [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 19(2): 160~168.
- 9 Neeharika A, Mahesh V P, Srikanth V, et al. Effect of three-phase contact line topology on dynamic contact angles on heterogeneous surfaces [J]. Langmuir, 2007, 23(23): 11673~11676.
- 10 Lu Jun, Zhang Hongtao, Wei Deyun, et al. A method for determining surface free energy of bamboo fiber materials by applying Fowkes theory and using computer aided machine vision based measurement technique [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2012, 17(5): 593~597.
- 11 韩书广,周兆兵,江华,等. 酶处理对响叶杨木材表面动态润湿性能的影响 [J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(6): 774~777.  
Han Shuguang, Zhou Zhaobing, Jiang Hua, et al. Enzyme pretreatments and dynamic wettability of a poplar surface [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(6): 774~777. (in Chinese)
- 12 张树京,齐立心. 时间序列分析简明教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 13 王建,白世彪,陈晔,等. Surfer8 地理信息系统制图 [M]. 北京: 中国地图出版社, 2004.
- 14 唐启义,冯明光. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 15 刘同娟,郭键,刘军. MATLAB 建模、仿真及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- 16 高建民,安贵仁,刘昌鉴,等. 叶片吸收雾滴过程中雾滴覆盖面积的变化规律 [J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 198~202.  
Gao Jianmin, An Guiren, Liu Changjian, et al. Variation characters of droplet coverage area in leaf droplet water uptake process [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 198~202. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 92 页)

- 10 Bennur P J, Taylor R K. Evaluating the response time of a rate controller used with a sensor-based, variable rate application system [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(6): 1069~1075.
- 11 Han Shufeng, Hendrickson L L, Ni Bingcheng, et al. Modification and testing of a commercial sprayer with PWM solenoids for precision spraying [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(5): 591~594.
- 12 翟长远,王秀,密雅荣,等. PWM 变量喷雾喷头流量模型 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 40~44.  
Zhai Changyuan, Wang Xiu, Mi Yarong, et al. Nozzle flow model of PWM variable-rate spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 40~44. (in Chinese)
- 13 魏新华,蒋杉,孙宏伟,等. PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器设计与测试 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 87~93, 129.  
Wei Xinhua, Jiang Shan, Sun Hongwei, et al. Design and test of variable rate application controller of intermittent spray based on PWM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 87~93, 129. (in Chinese)