

# 雾滴在水稻叶片上的沉积部位分析与显微试验\*

宋坚利 王波 曾爱军 刘亚佳 张京 代美灵

(中国农业大学理学院, 北京 100193)

**摘要:** 针对农药雾滴难以在水稻叶片上沉积滞留的问题,以叶片显微结构为基础研究了药液在水稻叶片的主要沉积部位。采用扫描电镜法观察研究了两种水稻品种在分蘖期、孕穗期叶片正、反面的显微结构,并对结构性状作了数据统计分析,测得球粒状乳突直径为 1.5 ~ 4.2  $\mu\text{m}$ ,而钩毛高度在 70.4 ~ 154.5  $\mu\text{m}$ ,其尺寸差异很大并且单位面积上乳突数量较多。以水稻叶片湿润性理论分析为基础,推导了雾滴临界脱落直径。依据水稻叶片不同表面微结构上农药雾滴的脱落直径,推断农药雾滴在水稻叶片上主要沉积部位为硅化木栓带的钩毛。通过滑石粉悬浮液喷雾试验及扫描电镜法,验证了农药雾滴主要沉积在水稻叶片的硅化木栓带并且在钩毛上最稳定。

**关键词:** 扫描电镜法 水稻叶片微结构 雾滴粒径 沉积部位

中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)04-0054-05

## Deposition Part Analysis and Microscopic Test of Spray Droplets on Rice Leaves

Song Jianli Wang Bo Zeng Aijun Liu Yajia Zhang Jing Dai Meiling

(College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** It is difficult for the chemical spray droplets to deposit on rice leaves. Thus, deposition area of chemical droplets on rice leaves was researched. Firstly, by using scanning electron microscopy (SEM) method, the microstructure of both sides of two varieties rice leaf was observed in different growing stage (tillering stage and booting stage). And the mastoid diameter was 1.5 ~ 4.2  $\mu\text{m}$ , while the length of hook hair was 70.4 ~ 154.5  $\mu\text{m}$ . There was large difference in microstructure and more mastoid was in per unit area. Then, based on the rice leaf wetness theory, the calculation methods for fall-off critical droplet diameter were deduced. According to fall-off diameter size pesticide droplets on rice leaves in different surface microstructure, it deduced that the main deposited parts was the glochuid of silification-cork belt. Finally, rice leaf sprayed with talcum powder suspending liquid and SEM method was used to verify the pesticides deposition part.

**Key words:** Scanning electron microscopy method Rice leaves surface microstructure Droplets size Deposition part

### 引言

水稻是人类赖以生存的主要粮食作物之一。近年来,随着气候、耕作制度、种植结构和栽培方式的变化,水稻的病虫害呈现逐渐加重的趋势<sup>[1-2]</sup>。目

前,主要的防治手段是使用化学农药喷雾防治,但是农药雾滴很难在水稻叶片上沉积,大多数农药雾滴往往在水稻叶片上因弹跳或滞留不稳而脱落,导致水稻田的农药利用率低和过量使用<sup>[3]</sup>。因此,要减少水稻病虫害防治过程中农药过量使用所带来的一

收稿日期: 2012-04-24 修回日期: 2012-06-13

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA100904)和国家自然科学基金资助项目(30800728、30971940)

作者简介: 宋坚利,讲师,主要从事高效施药技术与机具研究,E-mail: songjianli170@163.com

通讯作者: 曾爱军,副教授,主要从事高效施药技术与机具研究,E-mail: aijunz@cau.edu.cn

系列问题,有必要从显微结构性状探索药液在水稻叶片上难以滞留的问题。

Barthlott 等通过观察认为,超疏水特性是由于粗糙叶面上具有微米结构的乳突和表面的蜡状物共同作用引起的<sup>[4]</sup>。朱金文等通过试验研究了氟虫腈药液在水稻叶片上的沉积特性<sup>[5]</sup>。顾中言等研究了一些药液难以在水稻、小麦和甘蓝表面润湿展布的原因<sup>[6]</sup>。屠予钦等通过试验发现雾滴在水稻叶尖上沉积较多,存在水稻叶片的叶尖优势现象<sup>[7]</sup>。

为增加药液在水稻叶片的有效沉积,首先要明确药液主要沉积在水稻叶片的部位,但是这方面的研究尚未见报道。本文首先通过扫描电镜观察总结各个微结构特点,然后对雾滴撞击水稻叶片的行为

作理论分析,并且计算不同结构的雾滴临界脱落直径,理论推导雾滴在水稻叶片的沉积部位,最后进行试验验证。

## 1 水稻叶片表面微结构研究

试验用的水稻叶片取自中国农业大学温室种植的京光 651 水稻和中花 14 号水稻(分别由中国农业大学上庄试验站及农学院提供品种)。采用 JSM-6610LV 型扫描电子显微镜(日本精工 JEOL)进行水稻叶片表面微结构观察<sup>[8-11]</sup>。观测水稻分蘖期和孕穗期,不同部位叶片叶尖部、叶中部、叶根部正反两面的表面微结构,并对叶片不同结构形态进行测量统计,如表 1 所示。

表 1 水稻叶片不同微结构测量数据

Tab. 1 Micro-structural size data of rice leaves

品种	区域结构	分蘖期		孕穗期		
		叶片正面	叶片背面	叶片正面	叶片背面	
京光 651	单元结构宽度	138.0 ~ 212.0	151.0 ~ 216.0	150.0 ~ 270.0	133.0 ~ 210.0	
	宽度	14.6 ~ 16.3	9.5 ~ 14.3	12.2 ~ 16.6	11.3 ~ 15.4	
	钩毛长度	75.7 ~ 132.5	70.3 ~ 89.8	75.7 ~ 105.5	79.9 ~ 133.6	
	硅化-木栓带	钩毛间距	104.6 ~ 180.8	302.2 ~ 442.1	98.6 ~ 270.1	72.2 ~ 280.2
	乳突直径	1.5 ~ 2.1	1.7 ~ 2.0	1.5 ~ 1.9	1.4 ~ 2.1	
	乳突间距	10.3 ~ 22.4	12.8 ~ 25.3	13.3 ~ 21.2	11.3 ~ 22.2	
	气孔带	气孔间距	42.8 ~ 44.4	41.7 ~ 45.4	41.8 ~ 45.3	42.1 ~ 46.8
	气孔长度	25.2 ~ 30.1	25.5 ~ 30.2	25.3 ~ 30.2	25.5 ~ 30.5	
	乳突直径	2.6 ~ 4.3	2.5 ~ 3.6	2.3 ~ 3.3	2.8 ~ 3.4	
	中花 14 号	单元结构宽度	134.0 ~ 198.0	153.0 ~ 192.0	115.0 ~ 247.0	146.4 ~ 228.0
宽度		10.8 ~ 18.5	10.3 ~ 16.4	16.3 ~ 17.3	10.2 ~ 18.3	
钩毛长度		82.5 ~ 147.3	107.4 ~ 154.1	88.5 ~ 122.3	75.9 ~ 121.4	
硅化-木栓带		钩毛间距	115.8 ~ 390.2	234.1 ~ 272.2	105.5 ~ 291.3	245.7 ~ 307.6
乳突直径		1.7 ~ 2.0	1.5 ~ 2.0	1.4 ~ 2.0	1.5 ~ 1.9	
乳突间距		11.5 ~ 26.3	12.2 ~ 24.6	15.3 ~ 21.5	10.9 ~ 22.2	
气孔带		气孔间距	41.8 ~ 45.4	42.1 ~ 46.8	40.9 ~ 44.6	41.3 ~ 45.7
气孔长度		25.2 ~ 30.3	25.5 ~ 30.1	25.4 ~ 30.4	25.8 ~ 30.2	
乳突直径		2.5 ~ 4.1	2.5 ~ 3.0	2.5 ~ 3.8	2.9 ~ 3.6	

扫描电镜结果表明,水稻叶片正面由多个单元组成,每个单元具有相似结构,均可分为硅化-木栓带与气孔带两部分。单元结构宽度在 115 ~ 270  $\mu\text{m}$  之间,单元结构中心硅化-木栓带宽度为 9.5 ~ 18.6  $\mu\text{m}$ ,占整个叶片的比例非常小,其上面的球粒状乳突直径约为 1.5 ~ 2.0  $\mu\text{m}$ 。钩毛长度为 70.4 ~ 154.5  $\mu\text{m}$ ,钩毛间距为 105 ~ 390  $\mu\text{m}$ ,钩毛疏密程度相差非常大,较大的叶脉顶部(即硅化-木栓带)上钩毛数量较多、排列紧密,而在较小的叶脉上,钩毛数量较少、并且排列稀疏,间距较大。气孔带是水稻

叶片正面的主要微结构,气孔带宽度为 105.5 ~ 251.4  $\mu\text{m}$ ,是硅化-木栓带面积的 10 ~ 20 倍,气孔的长度在各个时期基本上没有差异,均在 25 ~ 30  $\mu\text{m}$  之间,其上面的球粒状乳突直径范围为 2.34 ~ 4.19  $\mu\text{m}$ ,单位面积乳突个数为 0.015 34 ~ 0.030 6 个/ $\mu\text{m}^2$ 。对比两种水稻品种在分蘖期和孕穗期的叶片表面微结构,各品种、生长期和叶片部位的差异性表现在乳突间距、乳突大小等略有不同,但变化的幅度并不大。气孔带大部分乳突的直径约为 3  $\mu\text{m}$ ,硅化-木栓带大部分钩毛的长度约为 100  $\mu\text{m}$ ,所以相对于常规喷

头的雾滴直径 60 ~ 400  $\mu\text{m}$  来说,乳突直径、间距的细微变化并不会对雾滴有效沉积产生显著影响,钩毛的尺寸更有可能影响雾滴的沉积。

## 2 雾滴在水稻叶片上临界脱落直径与沉积部位

### 2.1 雾滴在水稻叶片的临界脱落直径计算模型

在农药喷雾过程中,农药雾滴附着在靶标植物上是一种粘附现象。在粘附过程中雾滴接触靶标植物表面,致使部分气-液界面转变为液-固界面。在这个过程中,系统增加单位界面面积时自由焓的变化量即为界面张力。在粘附过程中系统自由焓的变化  $\Delta G < 0$ ,可见粘附是一个自发过程。若要使已经粘附的雾滴脱离固体表面,必须借助于外力做功,才能使系统自由焓增加相当于之前失去的自由焓。雾滴在水稻叶片上持留时,导致雾滴从叶片上脱落的力只有重力,即

$$P = mg = \rho Vg \quad (1)$$

式中  $P$ ——雾滴重力, N

$m$ ——雾滴的质量, kg

$\rho$ ——雾滴的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$V$ ——雾滴的体积,  $\text{m}^3$

图 1 为雾滴从倾角为  $\alpha$  的固体表面脱落过程的模式。根据费千等的研究结果<sup>[12]</sup>,结合雾滴在水稻叶片上脱落的实际情况可得脱落方程为

$$\rho g \frac{\pi}{3} R^3 (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) ds \sin\alpha = 2ds\sigma_{lv} (1 + \cos\theta) f R \sin\theta, \quad (2)$$

式中  $\sigma_{lv}$ ——液-气间的界面张力,  $\text{N}/\text{m}$

$ds$ ——沿斜面下落距离

$\theta$ ——表观接触角

$R$ ——雾滴临界脱落半径

$f$ ——表面的固态相分率(复合接触面中固体的面积分数),该值小于 1<sup>[13-15]</sup>

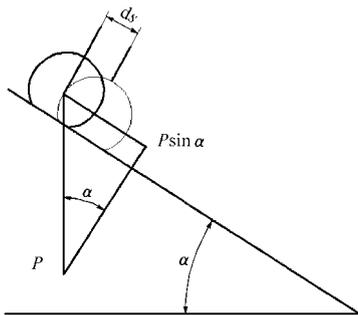


图 1 雾滴临界脱落模式

Fig.1 Critical shedding patterning

解方程可得雾滴的临界脱落半径为

$$R =$$

$$\left\{ \frac{6f\sigma_{lv}(1 + \cos\theta) [2f(1 + \cos\theta) - f^2(1 + \cos\theta)^2]^{\frac{1}{2}}}{\rho g \pi \sin\alpha [2 - f(1 + \cos\theta)]^2 [1 + f(1 + \cos\theta)]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

将  $R$  对  $f$  求导,得出  $R' > 0$  即  $R$  是一个以  $f$  为自变量的单调递增函数,  $R$  与  $\sin\alpha^{\frac{1}{2}}$  呈反比。

当  $\alpha$  固定不变时,随着表面固态相分率  $f$  增大,雾滴临界脱落直径  $2R$  相应增大。当  $\alpha$  变大时,  $\sin\alpha$  增大,雾滴临界脱落直径  $2R$  相应减小。

根据式(3)可以计算雾滴的临界脱落直径。为简化计算,作如下假设:①使用相同的药液对水稻叶片进行喷雾时,药液密度  $\rho$  和药液与空气的界面张力  $\sigma_{lv}$  均为定值。②假定雾滴在水稻叶片上沉积形状为一球缺,雾滴与水稻叶片上各种微结构的接触角  $\theta$  是一固定值,为  $134^\circ$ <sup>[16]</sup>。

### 2.2 水稻叶片不同结构上雾滴临界脱落直径

#### 2.2.1 气孔带乳突

设乳突为球形,雾滴球缺底部与乳突接触面积为乳突表面积的一半,雾滴的半径为  $r$  (图 2),球缺底部半径为  $r_1 = r \cos\beta$ ,  $\beta = \theta - 90^\circ = 44^\circ$ ,球缺底部面积,  $S_g = \pi r_1^2 = \pi (r \cos\beta)^2$ 。取乳突半径  $r_3 = 1.5 \mu\text{m}$ ,则乳突表面积  $S = 4\pi r_3^2$ 。

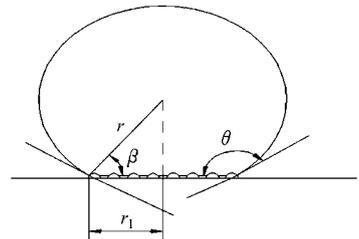


图 2 雾滴在乳突上沉积的理想化计算模型

Fig.2 Ideal calculation model of droplet on mastoids

由表 1 得单位面积乳突个数  $C \approx 0.02$  个/ $\mu\text{m}^2$ ,

则固体面积  $S_r = \frac{1}{2} S_g C S$ ,根据  $f$  的定义计算得到

$$f_{r1} = \frac{\frac{1}{2} S_g C S}{\frac{1}{2} S_g C S + \pi r_1^2 - S_g C \pi r_3^2} = 0.25 \quad (4)$$

式中  $f_{r1}$ ——乳突表面的固态相分率

#### 2.2.2 硅化木栓带钩毛

通过表 1 的数据统计可以将钩毛抽象为底面半径  $r_2$  为  $22 \mu\text{m}$ ,母线长度  $L$  为  $65 \mu\text{m}$  的圆锥。对于钩毛  $f_r$  的计算,需考虑两种情况:即雾滴将钩毛全部包裹和雾滴只能包裹钩毛的一部分。

若要雾滴完全包裹钩毛,需要雾滴球缺底部半径大于圆锥半径  $r_1 \geq r_2$ ,即  $r \cos\beta \geq 22 \mu\text{m}$ ,  $r \geq 30 \mu\text{m}$ ,雾滴全部包裹住钩毛如图 3a 所示,而当  $r \leq 30 \mu\text{m}$

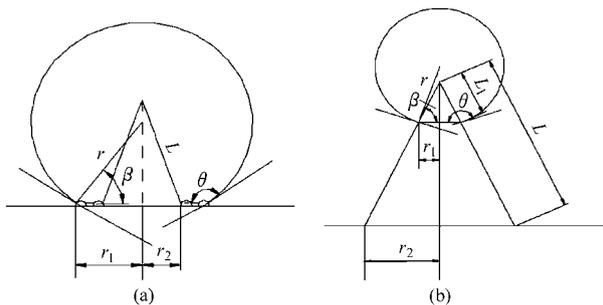


图3 雾滴在钩毛上沉积的理想化计算模型

Fig. 3 Ideal model of droplet on glochuid

(a)  $r \geq 30 \mu\text{m}$  (b)  $r < 30 \mu\text{m}$ 

时,雾滴部分包裹钩毛如图3b所示。

由于常用喷头的雾滴直径都在  $60 \sim 400 \mu\text{m}$ ,雾滴半径小于  $30 \mu\text{m}$  的情况因受环境影响大,在水稻上应用较少见,所以在此对这种情况不作进一步分析,雾滴半径  $r \geq 30 \mu\text{m}$  才是考虑的重点。

当雾滴半径  $r \geq 30 \mu\text{m}$  时,固体面积  $S_M$  为钩毛侧面积  $S_1$  和球缺底部与乳突的接触面积  $S_2$  之和。钩毛侧面积  $S_1 = \pi r_1 L$ ,乳突的接触面积  $S_2 = 2(\pi r_1^2 - \pi r_2^2) C \pi r_3^2$ ,根据  $f$  的定义计算得到

$$f_2 = \frac{S_1 + S_2}{S_1 + S_2 + (\pi r_1^2 - \pi r_2^2) - (\pi r_1^2 - \pi r_2^2) C \pi r_3^2} \quad (5)$$

### 2.2.3 硅化-木栓带

考虑到硅化-木栓带上乳突直径较小,乳突高度极低,所以假设当雾滴与硅化-木栓带接触时为完全接触。固液实际接触面积  $S_N$  为硅化-木栓带的面积  $S_3$  和球缺底部与乳突的接触面积  $S_4$  之和(图4)。

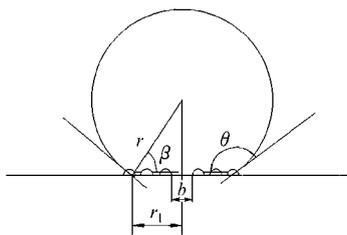


图4 雾滴在硅化-木栓带上沉积的理想化计算模型

Fig. 4 Ideal calculation model of droplet on silification-cork belt

将硅化-木栓带与雾滴接触的部位近似为长方形,由硅化-木栓带扫描电镜图片可知,硅化-木栓带的平均宽度  $b \approx 10 \mu\text{m}$ ,则接触的长方形长  $a \approx 2r \cos \beta$ 。硅化-木栓带的接触面积  $S_3 = ab \approx 20r \cos \beta$ ,乳突接触面积  $S_4 = 2(\pi r_1^2 - S_3) C \pi r_3^2$ ,根据  $f$  的定义计算得到

$$f_3 = \frac{S_3 + S_4}{S_3 + S_4 + (\pi r_1^2 - S_3) - (\pi r_1^2 - S_3) C \pi r_3^2} \quad (6)$$

经过计算可知,  $f_2 > f_1$ ,  $f_3 > f_1$ ,并且临界脱落半

径  $R$  是一个关于  $f$  的单调递增函数,可知  $R_2 > R_1$ ,  $R_3 > R_1$ ,所以雾滴在乳突上最容易脱落,而在硅化-木栓带上以及硅化-木栓带的钩毛上不容易脱落,即雾滴较容易沉积到硅化-木栓带上以及硅化-木栓带的钩毛上,而不容易沉积到乳突上。

通过比较乳突、硅化-木栓带的钩毛以及硅化-木栓带与雾滴的固体接触面积可知,  $S_M > S_N > S_R$ ,并且由于钩毛特殊的刺状形状以及较大的尺寸,容易刺破雾滴表面而使得水分子易于浸入钩毛基底部位,起到引流作用,加快了水滴的铺展,从而使雾滴较容易持留在钩毛上。而乳突尺寸较小,并且呈球形,由于表面较钝未能刺破浸入表面的水膜,使得凸包与水膜间产生气泡,水膜被抬起,从而导致雾滴难以持留。综上所述,雾滴主要沉积部位为硅化-木栓带尤其是硅化-木栓带的钩毛上。

## 3 扫描电镜观察雾滴沉积部位

### 3.1 试验方法

试验利用中国农业大学药械与施药技术研究中心喷雾天车(德国制造)进行。喷头选用德国 Lechler 标准扇形雾喷头 ST110-03,喷雾压力为  $0.3 \text{ MPa}$ ,喷雾高度为  $0.5 \text{ m}$ 。试验以  $5\%$  氯虫苯甲酰胺 SC(为大田剂量  $1/750$ ) 中加入质量分数为  $3\%$  的滑石粉( $300 \sim 500$  目,北京化学试剂公司)作为喷液,进行喷雾。

扫描电镜样品制备:水稻叶片前处理清洗→固定→脱水干燥→粘台→喷雾→喷镀金属→观察。

### 3.2 雾滴沉积部位扫描电镜结果

图5a、5b为扫描电镜下滑石粉的微观结构,滑石粉呈现微纳米级的片状结构,如果添加滑石粉的雾滴沉积在叶片上,那么就可以根据滑石粉在叶片上的沉积部位得出雾滴沉积的主要部位。

图5c~5h为制备的水稻叶片扫描电镜图片,从图中可以看到有滑石粉的片状沉积。其中图5c~5e为扫描电镜整体观察的照片,可以看出滑石粉在整个叶片上的沉积较少,且主要是沉积在硅化-木栓带上,尤其是硅化-木栓带上的钩毛部位;较大的叶脉上有两排硅化-木栓带,钩毛排列紧密,滑石粉沉积相对较多;滑石粉在钩毛上的沉积形态不同,有的将整个钩毛包裹(图5f),有的沉积在钩毛尖端(图5g),有的则沉积到钩毛的下部(图5h)。从微观上证明了雾滴在水稻叶片上的沉积部位主要是硅化-木栓带尤其是硅化-木栓带的钩毛。

## 4 结论

(1)扫描电镜观察发现不同品种水稻在不同生

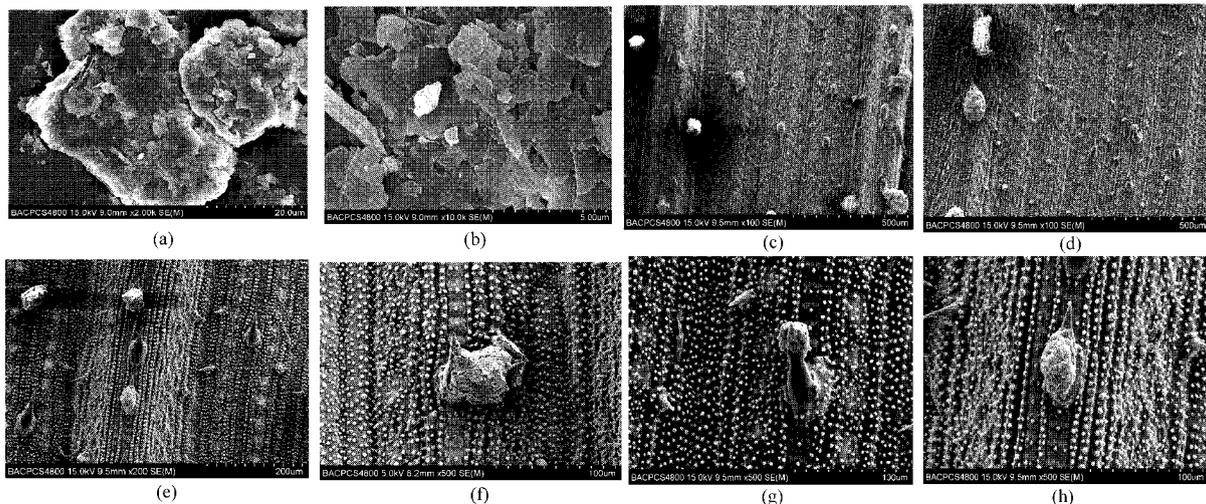


图5 滑石粉液喷雾后扫描电镜图片

Fig. 5 Scanning electron microscopy photos of talcum powder

(a) 滑石粉结构图 (b) 滑石粉结构细节图 (c)、(d) 水稻叶片沉积部位总体图 (e) 硅化-木栓带沉积图 (f)、(g)、(h) 钩毛沉积效果图

长时期的叶片表面微结构差异不显著,叶片结构均是单元结构,并且结构中主要为硅化-木栓带与气孔带两部分,气孔带面积是硅化木栓带面积的10~20倍;并且不同结构上的乳突、钩毛等从尺寸到数量差距较大,气孔带上只有乳突结构,而硅化木栓带上乳突和钩毛,钩毛尺寸是乳突的30~40倍,而气孔带上的乳突尺寸是硅化木栓带上乳突的2倍。

(2)根据各微结构的特点并且对微结构上雾滴脱落直径的理想模型计算分析,认为雾滴在水稻叶片的硅化木栓带沉积较多,而且主要沉积在钩毛上。

(3)扫描电镜观察发现农药-滑石粉喷雾雾滴主要持留在硅化木栓带的钩毛上。这说明对雾滴脱落直径计算的理论推导以及假设模型都是可行的。

#### 参 考 文 献

- 1 杨林飞. 水稻主要病虫害鉴别与防治[J]. 农技服务, 2009, 26(3): 82~83.
- 2 茆邦根, 翟承勋. 水稻常见病虫害科学防治技术[J]. 现代农业科技, 2007(13): 77~78.
- 3 顾中言, 许小龙, 韩丽娟, 等. 不同表面张力的杀虫单微乳剂药滴在水稻叶面的行为特性[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(2): 176~180.  
Gu Zhongyan, Xu Xiaolong, Han Lijuan, et al. Behavior characteristics of different surface tension of the insecticidal single micro emulsion medicine drops on rice leaves[J]. Chinese Rice Science, 2004, 18(2): 176~180. (in Chinese)
- 4 Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. Planta, 1997, 202(1): 1~8.
- 5 朱金文, 周国军, 曹亚波, 等. 氟虫腈药液在水稻叶片上的沉积特性研究[J]. 农药学学报, 2009, 11(2): 250~254.  
Zhu Jinwen, Zhou Guojun, Cao Yabo, et al. The sedimentary characteristics of fluorine bug nitriles solution on the rice leaves[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2009, 11(2): 250~254. (in Chinese)
- 6 顾中言, 许小龙, 韩丽娟. 一些药液难在水稻、小麦和甘蓝表面润湿展布的原因分析[J]. 农药学学报, 2002, 4(2): 75~80.  
Gu Zhongyan, Xu Xiaolong, Han Lijuan. The cause of the difficulty in wet-spreading of some insecticides on rice, wheat and wild cabbage leaves[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2002, 4(2): 75~80. (in Chinese)
- 7 屠予钦, 林志明, 张金玉. 雾滴在水稻叶片上的沉积特性——叶尖优势[J]. 植物保护学报, 1984, 11(3): 189~197.  
Tu Yuqin, Lin Zhiming, Zhang Jinyu. Deposit character of spray droplets on rice leaves—the leaf-tip preference of droplet deposition[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 1984, 11(3): 189~197. (in Chinese)
- 8 郭善竹, 张丽, 张凯, 等. Silwet系列农用有机硅在水稻害虫防治中的应用[J]. 植物保护, 2008(4): 41~42.
- 9 沈恒胜, 陈君琛, 黄进华, 等. 水稻叶表皮硅体显微结构及其分布[J]. 福建农林大学学报, 2005, 34(2): 137~140.  
Shen Hengsheng, Chen Junshen, Huang Jinhua, et al. Microstructure and distribution of silica bodies in rice epiderm [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University, 2005, 34(2): 137~140. (in Chinese)
- 10 李丽, 王效安, 刘臣宇. SEM在霉菌研究中的应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(6): 690~692.  
Li Li, Wang Xiaolan, Liu Chenyu. Application of SEM in the study of mould[J]. Naval Aviation Engineering College Journal, 2005, 20(6): 690~692. (in Chinese)
- 11 贾敬鸾. 扫描电镜在植物方面的应用[J]. 遗传, 1984, 6(6): 18.  
Jia Jingluan. Scanning electron microscopy (SEM) in the application of plant[J]. Genetic, 1984, 6(6): 18. (in Chinese)

- 15 王金峰, 王金武, 葛宜元, 等. 深施型液态施肥机扎穴机构优化设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 52~55.  
Wang Jinfeng, Wang Jinwu, Ge Yiyuan, et al. Optimization design on pricking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 52~55. (in Chinese)
- 16 夏俊芳, 许绮川, 王志山, 等. 2BFS-8型水稻芽种播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 44~47.  
Xia Junfang, Xu Qichuan, Wang Zhishan, et al. Design of rice bud seed sowing and fertilizer machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 44~47. (in Chinese)
- 17 翟长远, 朱瑞祥, 黄胜, 等. 基于单片机的施药监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 70~74.  
Zhai Changyuan, Zhu Ruixiang, Huang Sheng, et al. Design and experiment of pesticide application monitoring system based on MCU[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 70~74. (in Chinese)
- 18 任文涛, 迟德霞, 刘金波, 等. 遥控插秧机自动转向系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 175~179.  
Ren Wentao, Chi Dexia, Liu Jinbo, et al. Design and test on remote rice transplanter automatic steering system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 175~179. (in Chinese)
- 19 Robert P C. Precision agriculture: an information revolution in agriculture[C]//Proceedings: Agriculture Outlook Forum, 1999: 529~535.
- 20 Chateau T, Debfin C, Collange F, et al. Automatic guidance of agricultural vehicles using a laser sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 28(3): 243~257.
- 21 Savvas D. The automatic synthetic control of nutritious fluid in the enclosed system for non-soil cultivation [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 73(1): 29~33.

~~~~~

(上接第 58 页)

- 12 费千, 岳丹婷. 液滴从固体壁面脱落条件的分析[J]. 大连海事大学学报, 1997, 23(3): 92~95.  
Fei Qian, Yue Danting. Analysis of the condition of liquid drop from solid wall[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1997, 23(3): 92~95. (in Chinese)
- 13 王晓东, 彭晓峰, 闵敬春, 等. 接触角滞后现象的理论分析[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(1): 67~70.  
Wang Xiaodong, Peng Xiaofeng, Min Jingchun, et al. Hysteresis of contact angle at liquid-solid interface [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(1): 67~70. (in Chinese)
- 14 柯清平, 李广录, 郝天歌, 等. 超疏水模型及其机理[J]. 化学进展, 2010, 22(3): 284~290.  
Ke Qingping, Li Guanglu, Hao Tiange, et al. Superhydrophobicity: theoretical models and mechanism [J]. Progress in Chemistry, 2010, 22(3): 284~290. (in Chinese)
- 15 田辉, 杨泰生, 陈玉清. 疏水理论研究进展[J]. 山东陶瓷, 2008, 31(3): 8~13.  
Tian Hui, Yang Taisheng, Chen Yuqing. Development of fundamental theories of hydrophobic [J]. Shandong Ceramics, 2008, 31(3): 8~13. (in Chinese)
- 16 李小兵, 刘莹. 微观结构表面接触角模型及其润湿性[J]. 材料导报: 研究篇, 2009, 23(12): 101~103.  
Li Xiaobing, Liu Ying. Contact angle model and wettability on the surfaces with microstructures [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2009, 23(12): 101~103. (in Chinese)
- 17 吕晓兰, 傅锡敏, 吴萍, 等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 70~75.  
Lü Xiaolan, Fu Ximin, Wu Ping, et al. Influence of spray operating parameters on droplet deposition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 70~75. (in Chinese)
- 18 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)