

水稻叶片上露水对农药沉积量的影响

王波¹ 宋坚利^{2*} 曾爱军² 刘亚佳² 张京² 何雄奎²
(1. 中国农业大学 工学院,北京 100083; 2. 中国农业大学 理学院,北京 100193)

摘要 水稻叶片表面独特的微纳米结构是造成农药雾滴在叶片上难以持留的主要原因,叶片上凝结的露水会改变叶片表面的微结构,从而对农药雾滴的沉积状态产生影响。针对这一问题分别进行了田间试验和实验室模拟试验,通过高速摄影以及农药沉积量试验研究没有露水、露水量较少和露水量多3种情况下,使用标准扇形喷头与防飘射流喷头进行喷雾时的农药雾滴沉积。试验结果显示,叶片上露水的存在能够增加农药雾滴的沉积并且影响显著,且不同喷头间存在显著性差异。高速摄影试验结果显示,露水的存在减少了雾滴的弹跳情况,农药雾滴在沉积过程中雾滴与叶片的直接作用变为农药雾滴与露水的作用,从而增加了沉积。

关键词 水稻; 农药沉积; 露水; 表面性质

中图分类号 S 471 **文章编号** 1007-4333(2012)03-0094-07 **文献标志码** A

Influence of dew on pesticide droplet deposition on rice leaves

WANG Bo¹, SONG Jian-li^{2*}, ZENG Ai-jun², LIU Ya-jia², ZHANG Jing², HE Xiong-kui²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract The unique micro/nano structure of rice leaf surface is the main reason that pesticide droplets could not deposit on the leaves. Dew frozen on the leaves will change the microstructure of the rice leaf surface, and could influence the deposit of pesticide droplets on rice leaves. In order to solve this problem, the experiment was divided into two parts, indoor experiments and field tests. The depositions of pesticide were tested on three conditions: no dew, a little dew, and much dew. At the same time, by using high-speed photography, an intuitive observation was done for the influence of dew on pesticide deposition. The experiment chosen different types of nozzles to spray. The results show that the existence of dew on rice leaves can increase the pesticide droplets deposition significantly. And the difference between nozzles is also significant. High-speed photography experimental results show that the existence of dew can reduce the bounce of droplets. The direct contact between pesticide droplets and leaf is changed into the contact between pesticide droplets and dew, which improves the deposition.

Key words rice; pesticide deposition; dew; surface microstructure

水稻叶片属于天然超疏水性生物表面,农药雾滴极不易润湿滞留^[1],大多数农药雾滴往往从水稻叶片上弹跳脱落,导致水稻田农药利用率低^[2-6]。为了提高农药在水稻叶片上的沉积量,科研人员进行了许多针对药液理化性质、雾滴大小、叶片倾角等^[7-12]的研究,发现水稻层间的沉积量与水稻的高

度成正比^[13],而且使用较低表面张力的农药^[14],采用低容量、小雾滴或用弥雾机喷雾^[15]可以增加水稻田间的农药利用率,并且可以减少用药量和用水量,降低劳作强度^[16]。

已有研究主要从农药性质和施药机具方面研究了增加水稻田间农药利用率的方法,而从改变靶标

收稿日期: 2011-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30800728,30971940)

第一作者: 王波,硕士研究生,E-mail:wangbocau@163.com

通讯作者: 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

性质方面的研究未见报道。水稻叶片超疏水是由粗糙叶面上微米结构的乳突和表面蜡状物共同作用引起的^[17]，而水稻叶片凝结的露水改变了施药过程中叶片的表面结构。有研究认为有露水时施药会稀释药液，或者导致农药流失到田间不利于药效，但是也有研究认为可以在有露水时用药。文献[18]中建议防治水稻纹枯病时，田间无水、趁早上有露水时喷药而且药后几天田中无水，对增加田间农药利用率具有良好的效果。本试验拟通过高速摄影技术与水稻叶片上的农药沉积量的测定研究露水对水稻叶片上农药沉积量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料及仪器

25%三唑酮可湿性粉剂，江苏省农垦生物化学有限公司；柠檬黄 85，上海染料研究所有限公司；中花 14 号水稻，平均株高 60 cm，5~7 叶期水稻，中国农业大学上庄试验站提供；小区喷杆喷雾机；喷雾天车，德国百瑞制造；佳能 G11；加湿器；722 s 可见分光光度计，上海精密科学仪器有限公司制造。

1.2 试验方法

试验分为田间试验和实验室内试验 2 部分。田间试验主要包括水稻叶片露水形成与形态观察，水稻叶片农药沉积量测定。实验室内试验的目的是更加精准的研究露水对于水稻叶片上农药

沉积量的影响，分为农药沉积量试验和高速摄影试验。通过农药沉积量测定，研究露水对农药沉积量的影响。通过高速摄影观察农药雾滴打击到靶标的沉积状态，从直观的角度研究露水对农药雾滴沉积的影响。

1.2.1 露水量测定

1) 田间露水量。试验在中国农业大学上庄试验站进行，于 23:00 在试验田观测露水量形成过程。从 24:00 开始每 1 h 观测 1 次，并进行拍摄。

2) 实验室露水量。取用试验站的水稻植株叶片，称叶片质量 m_1 ，在封闭箱体中用加湿器使箱体中的湿度达到 70% 以上，然后于 23:00 至第 2 天 10:00 放置在室外，使叶片上自然凝结露水，并拍摄露水形成的照片，与田间试验照片对照，测量露水量最大和较少时叶片的质量 m_2 。每组取用 5 片叶子作为重复。测量水稻叶片的叶面积 S ，根据式(1)计算叶片单位面积露水量。

$$\text{单位面积露水量} = \frac{m_2 - m_1}{S} \quad (1)$$

1.2.2 沉积量试验

1) 田间试验。按照三唑酮的田间用量(450 g/hm²)配置药液，并加入质量分数 0.25% 的柠檬黄 85 作为示踪剂。在露水量达到最大、露水量减少一半、露水完全干燥 3 个阶段用小区喷杆喷雾机进行喷雾作业。喷雾高度 50 cm，喷雾参数见表 1。

表 1 露水影响农药沉积效果的施药参数

Table 1 Spraying parameters of the influencing experiment of dew on pesticide deposition

喷头类型	施药液量/(L/hm ²)	喷雾压力/(MPa)	单个喷头流量/(L/min)	行走速度/(m/s)
ST110-015	300	0.3	0.59	0.9
ST110-03	225	0.2	0.95	1.1
IDK1120-015	300	0.3	0.59	0.9
IDK1120-03	225	0.2	0.95	1.1

喷雾作业结束后，待所有试验的叶片表面干燥后，收取每组试验中的 20 片相同部位的水稻叶片。每个叶片加去离子水 5 mL 进行洗脱，并用分光光度计测定吸光度。将叶片晾干后用叶面积仪测定水稻叶片的面积并记录。每次喷雾完成更换喷头，每种喷头试验重复 5 次。最终计算沉积量和单位面积沉积量。

$$V_s = \frac{V_w \cdot FL_s}{N \cdot FL_a} \quad (2)$$

$$M = \frac{V_s}{S} \quad (3)$$

式中： V_s 为农药在叶片上的沉积量，mL； M 为农药在叶片上的单位面积沉积量，mL/mm²； V_w 为所加

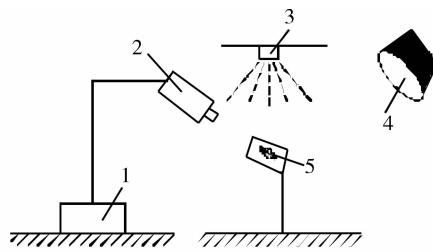
洗脱液的体积, mL; FL_s 为洗脱液荧光值; FL_a 为标定液的荧光值; N 为母液的稀释倍数。

2) 实验室模拟。取用干燥的水稻叶片和实验室模拟露水形成后含露水的水稻叶片, 固定在支架上, 固定叶片与地面夹角为 77° (该角度与水稻田间叶片生长角度一致), 每次喷雾用 10 片叶子, 重复 3 次。喷雾参数与田间试验一致。

1.2.3 高速摄影拍摄露水影响沉积试验

固定水稻叶片与地面夹角为 77° , 利用喷雾天车进行试验。试验喷头选用标准扇形雾喷头 ST110-03, 以三唑酮药液为喷液, 按大田施药液量 300 L/hm^2 喷雾, 喷雾压力 0.2 MPa 。分别对干燥叶片和有露水的叶片喷雾。

将高速摄影机安装在距离水稻叶片表面的焦点附近, 试验设定拍摄速度为 3000 帧/s 。辅助光源为石英碘灯 (电压 220 V , 功率 1350 W), 喷雾时持续拍摄记录并保存视频待分析, 试验装置见图 1。



1.计算机; 2.高速摄影仪; 3.喷头; 4.光源; 5.靶标。

图1 实验室高速摄影拍摄农药沉积试验装置示意图

Fig. 1 Scheme diagram of a pesticide deposition rig by using high-speed photography

2 结果与分析

2.1 露水量观测结果

2.1.1 田间试验露水形成观察结果

分析 24:00 至次日凌晨 5:00 水稻叶片上露水量观测试验结果 (图 2) 发现: 24:00 只有叶片尖部和边缘有小部分露水; 1:00 叶片表面大部分位置出现

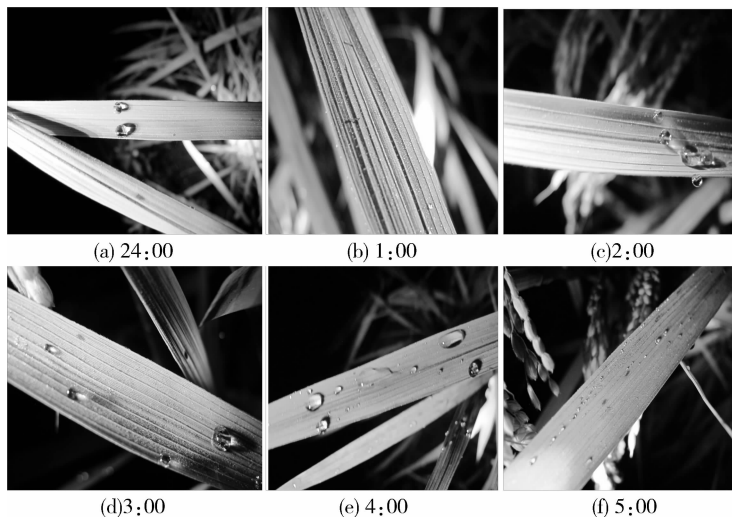


图2 24:00 至次日凌晨 5:00 水稻叶片上露水量田间观测结果

Fig. 2 The observation results of dew on rice leaf at 24:00 to next day 5:00

十分细小的露珠; 2:00 叶片细小露珠开始成长; 3:00 细小露珠凝结成为较大的水珠; 4:00 水珠继续变大并向根部流动; 5:00 叶片上的细小露珠均变大成为较大的水珠, 露水量达到最大。

通过观察露水形成过程可以发现水稻叶片上露水形成有以下几种特点: 1) 在叶片顶尖以及叶片边缘锯齿毛的位置首先凝结雾滴, 然后是叶片表面出现细小露珠, 随着时间延续, 小露珠逐渐成长, 其结构尺寸基本一致; 2) 对比扫描电镜结果可以发现, 容

易形成雾滴的部位为水稻叶片表面突出部分的毛状结构与乳突, 即叶片表面突起的部位。

2.1.2 实验室模拟露水形成观察结果

实验室模拟自然环境露水形成结果 (图 3) 与田间观测露水结果 (图 2) 对比发现, 实验室模拟形成的露水形态与田间自然形成的基本一致, 所表现的特征为: 1) 锯齿毛和叶尖部位有大雾滴存在; 2) 叶片大部分区域有细小的露珠存在并且尺寸结构基本一致。实验室模拟露水形成的露水量测试结果见表 2。

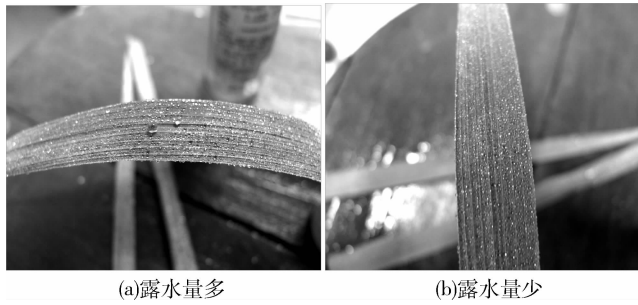


图 3 水稻叶片上露水量形成的实验室模拟

Fig. 3 Laboratory simulation result of dew formation process on rice leaf

表 2 实验室模拟水稻叶片上露水量的统计结果

Table 2 Mass of dew simulated in laboratory on rice leaf

露水量	m_1 /mg	m_2 /mg	露水质量/mg	叶片面积/cm ²	露水量/(mg/cm ²)	平均值
多	341.8	420.7	78.9	19.526 6	4.040 64	4.03
	276.8	364.1	87.3	19.251 4	4.534 74	
	248.2	315.2	67.0	15.730 3	4.259 30	
	196.3	243.4	47.1	14.088 9	3.343 05	
	155.7	195.3	39.6	10.003 5	3.958 60	
少	209.6	234.2	24.6	14.517 0	1.694 57	1.84
	188.5	211.9	23.4	14.129 8	1.656 08	
	201.0	227.1	26.1	13.887 3	1.879 41	
	140.1	158.7	18.6	10.909 3	1.704 97	
	132.0	153.5	21.5	9.549 9	2.251 33	

注： m_1 为干燥水稻叶片的质量，g； m_2 为有露水后露水和叶片的总质量，g。

2.2 沉积量试验结果

2.2.1 田间试验

农药雾滴在水稻叶片上单位面积的沉积量田间测试结果(表 3)显示：露水能够增加农药雾滴在水稻叶片上的沉积量，并且随着露水量增多，农药雾滴的沉积量增大。露水量最多时的农药雾滴沉积量较

没有露水时提高了约 10%~30%。由于水稻叶片上的露水改变了水稻叶片的超疏水性质，使得农药雾滴与叶片的直接撞击行为变为农药雾滴与露水的撞击，从而增加了农药沉积。

田间测试农药雾滴在水稻叶片上沉积量的单因素方差分析，是对不同喷头下以露水量为影响因素进行的单因素方差分析。数据(表 4)显示：使用 ST110-03 号喷头喷雾时，露水量对沉积量的影响不显著性，而使用 ST1100-15, IDK120-03 和 IDK120-015 号喷头喷雾时，露水量最大与没有露水相比较农药雾滴的沉积量有显著性差异。015 号喷头比 03 号喷头产生的农药雾滴粒径小，比较利于沉积，故而沉积效果显著。03 号喷头雾滴粒径较大，导致 ST110-03 的喷雾效果不显著，然而 IDK 为射流防飘喷头，产生液包气的雾滴，雾滴在撞击水稻叶片时会发生二次破碎，使得大雾滴变为细小雾滴从而

表 3 水稻叶片上单位面积农药雾滴沉积量田间测试结果

Table 3 Field test result of deposition per leaf area of pesticide droplets on rice leaf

喷头类型	10 ⁻³ μL/mm ²		
	露水量多	露水量少	没有露水
ST110-03	5.559 97	5.455 96	5.230 21
IDK120-03	6.117 35	5.924 62	4.016 40
ST110-015	5.499 10	4.626 36	4.327 69
IDK120-015	6.562 75	5.634 10	3.677 45

IDK120-03 喷雾效果显著。

表 4 田间测试农药雾滴在水稻叶片上沉积量的单因素方差分析

Table 4 Single factor analysis of field experiment of pesticide deposition on rice leaf

喷头类型	露水量	沉积量/($10^{-3} \mu\text{L}/\text{mm}^2$)
ST110-03	无	5.083 53 a
	少	5.349 22 a
	多	5.524 81 a
ST110-015	无	4.276 24 b
	少	4.873 44 b
	多	5.483 92 a
IDK120-03	无	3.683 69 b
	少	5.758 81 a
	多	5.973 26 a
IDK120-015	无	3.614 87 b
	少	5.509 10 a
	多	6.207 63 a

注:同列相同字母代表差异不显著, $P=0.05$ 。

2.2.2 实验室模拟

水稻叶片上单位面积农药雾滴沉积量实验室模拟测试结果(表 5)显示,随着叶片上露水量的增加农药雾滴沉积量逐渐增加,变化趋势与田间试验结果相一致;并且没有露水时与露水量最多时的沉积量相差 1 个数量级。证明露水能够增加农药雾滴在水稻叶片上的沉积量。

表 5 水稻叶片上单位面积农药雾滴沉积量实验室模拟结果

Table 5 Laboratory simulation result of deposition per area of pesticide droplets on rice leave

喷头类型	$10^{-3} \mu\text{L}/\text{mm}^2$		
	露水量多	露水量少	没有露水
ST110-03	12.816 92	8.953 45	7.732 67
IDK120-03	12.892 36	6.298 74	4.853 98
ST110-015	12.555 68	8.734 23	5.184 37
IDK120-015	14.374 83	10.606 92	5.143 59

实验室模拟试验以露水量为影响因素进行的单因素方差分析结果(表 6)显示,使用 ST110-03 号喷头进行喷雾时露水量对沉积量的影响不著性,而

IDK120-03 号喷头有露水量对沉积量的改变有显著性影响与田间试验结果一致。ST110-015 和 IDK120-015 露水量多,露水量少,没有露水之间均存在显著性差异。较之田间试验效果更好,可能因为室内试验受自然环境的影响比较少。

表 6 实验室模拟农药雾滴在水稻叶片上沉积量的单因素方差分析

Table 6 Single factor analysis of laboratory simulation experiment of pesticide deposition on rice leaf

喷头类型	露水量	沉积量/($10^{-3} \mu\text{L}/\text{mm}^2$)
ST110-03	无	7.730 94 b
	少	8.928 50 ab
	多	12.770 71 a
ST110-015	无	5.167 53 c
	少	8.750 25 b
	多	12.626 28 a
IDK120-03	无	4.829 68 b
	少	5.963 00 b
	多	12.900 46 a
IDK120-015	无	5.164 61 c
	少	10.559 22 b
	多	14.386 63 a

注:同列相同字母表示差异不显著, $P=0.05$ 。

2.3 高速摄影拍摄露水影响沉积试验

对倾斜的干燥叶片上农药雾滴沉积过程分析发现:水稻叶片干燥时,农药雾滴直接撞击水稻叶片,大部分雾滴会直接弹跳或者滚落,无法沉积停留在叶片上(图 4)。

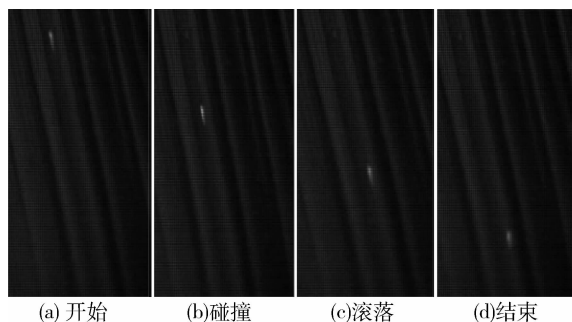


图 4 倾斜的干燥叶片上雾滴沉积过程

Fig. 4 Droplet deposit station on dry and incline rice leaves

当倾斜放置的水稻叶片有露水时,大部分农药雾滴不是直接与叶片表面接触而是撞击到凝结形成的露珠上。部分雾滴与露珠聚合,经过一定的震荡后持留在叶片上;部分农药雾滴与露珠聚合后,先向下滚落一段时间再沉积;另外一小部分农药雾滴发生弹跳和滚落。图5示出农药与水稻叶片上露水撞击、融合和沉积过程:首先水稻叶片上存在露水水滴

(图5(a)),当进行农药喷雾后液滴降落并与叶片上的水滴碰撞(图5(b)),雾滴与叶片上的水滴融合后向下移动一段距离后沉积(图5(c))。通过比较干燥叶片和有露水的叶片可以直接观察到有露水时候利于农药雾滴在水稻叶片上的持留。由此可见露水的存在使得雾滴与叶片相互撞击的界面性质发生变化,从而增加了持留。

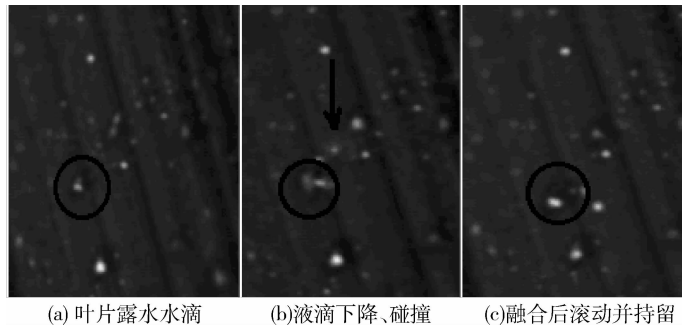


图5 倾斜的有露水叶片表面农药雾滴沉积状态

Fig. 5 Droplet deposit station on wet and incline rice leaves

3 讨论

水稻叶片特殊的微纳米结构使得农药雾滴撞击到水稻叶片后,农药雾滴与水稻叶片的接触为复合接触^[19],即液滴悬着于粗糙表面的突起之上,液滴与表面的接触面积非常小 Cassie 和 Baxter^[19]在对大量自然界超疏水表面的研究过程中,在杨氏方程的基础上得到

$$\cos\theta_c = f\cos\theta - (1-f) \quad (2)$$

式中: f 为表面的固态相分率,其值小于1; θ_c 为表观接触角。由式(2)可以得出, f 越小,并且原平坦表面的 θ 越大,表面的疏水性就越高,不利于农药雾滴沉积。农药雾滴撞击干燥叶片时,雾滴与片状蜡质结构接触,使得 f 很小。对比叶片干燥与有露水时的叶片表面特性,有露水时露水填充了乳突微纳米结构中间的缝隙,使得叶片表面成为一个平面。农药雾滴撞击有露水的叶片时,一部分雾滴与水膜接触, $f=1$,此时接触面积变大,而且接触介质有疏水性质的蜡质层变为亲水的水膜。这2方面的原因使得接触面上的粘附力变大,从而增加了农药雾滴在水稻叶片上的沉积量,这是增加沉积的根本原因。

影响农药雾滴沉积除了接触面特性外还有雾滴

粒径、雾滴密度、雾滴动能等。根据农药雾滴在水稻叶片表面的沉积与持留理论,当雾滴动能过大时,会发生弹跳,而且雾滴在叶片上持留存在一个最大持留半径。喷雾时,部分动能过大的雾滴撞击到露水上破碎或者弹跳,使得农药雾滴脱离叶片。在高速摄影实验观测中发现,部分沉积的雾滴会在叶片上发生滚动,滚动过程中可能会聚合其他雾滴,当聚合后的雾滴大小超过最大持留粒径时,雾滴也会从叶片上滚落。正是因为这些原因使得不同喷头的喷雾效果不同。要进一步理解沉积机理,需要从微观方面进行细致研究。

4 结论

1)田间试验与实验室模拟试验证明,露水对农药雾滴在水稻叶片上的沉积产生影响,露水能显著增加叶片上农药雾滴沉积量。

2)高速摄影观察结果表明,露水的存在减少了雾滴弹跳情况,农药雾滴在沉积过程中雾滴与叶片的直接作用变为农药雾滴与露水的作用,从而增加了沉积。

3)不同型号喷头对沉积产生不同影响,015号喷头喷雾时沉积效果较03号喷头好;有露水时IDK120-03号喷头比ST110-03号喷头喷雾效果好。

参 考 文 献

- [1] 郭善竹,张丽,张凯,等. Silwe 系列农用有机硅在水稻害虫防治中的应用[J]. 植物保护, 2008, 24(4): 41-42
- [2] 高希武, 马军. 害虫的化学防治与作物抗虫性[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(1): 75-82
- [3] 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(1): 77-78
- [4] 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
- [5] 屠豫钦. 农药使用技术标准化[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001, 160-189
- [6] 傅泽田, 祁力钧. 国内外农药使用现状及解决农药超量使用问题的途径[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 2-12
- [7] 袁会珠, 齐淑华, 杨代斌. 药液在作物叶片的流失点和最大稳定持留量研究[J]. 农药学学报, 2002, 2(4): 66-71
- [8] 袁会珠, 陈万权, 杨代斌. 药剂浓度、雾滴密度与氧乐果防治麦蚜的关系研究[J]. 农药学学报, 2000, 2(1): 58-62
- [9] Symmons P M. Pesticide droplet size and efficacy: a series of trials on grasshoppers[J]. Crop Protection, 1991, 10(2): 136-144
- [10] Combella J H. Herbicide application ; a review of ground application techniques[J]. Crop Protection, 1984, 3(1): 9-34
- [11] Knoche M. Effect of droplet size and carrier volume on performance of foliage-applied herbicides[J]. Crop Protection, 1994, 13(3): 163-178
- [12] Cunningham G P, Harden J. Reducing spray volumes applied to mature citrus trees[J]. Crop Protection, 2002, 29(1): 617-623
- [13] 宋淑然, 洪添胜, 王卫星, 等. 水稻田农药喷雾分布与雾滴沉积量的试验分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 90-93
- [14] 徐德进, 顾中言, 徐广春, 等. 药液表面张力与喷雾方法对雾滴在水稻植株上沉积的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(2): 213-218
- [15] 朱金文, 吴慧明, 朱国念. 叶片倾角、雾滴大小与施药液量对毒死蜱在水稻植株沉积的影响[J]. 植物保护学报, 2004, 31(3): 259-263
- [16] 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]. 中国农技推广, 2008, 24(4): 41-42
- [17] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. Planta, 1997, 202: 1-8
- [18] 陈春茂. 稻田施药要讲究环境[N]. 云南科技报: 种植天地, 2006-06-15(003)
- [19] Cassie A, Baxter S. Wet tability of porous surfaces[J]. Trans Faraday Soc, 1944, 40: 546-551

责任编辑: 刘迎春