

王聪博, 徐广春, 徐德进, 等. 不同生育期黄欧宝甜椒叶片润湿性分析[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 882-887.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.011

不同生育期黄欧宝甜椒叶片润湿性分析

王聪博, 徐广春, 徐德进, 徐 鹿, 顾中言

(江苏省农业科学院植物保护研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了研究叶面理化特性对喷洒的农药雾滴在叶面润湿行为的影响, 利用接触角法获得 3 种测试液(水、丙三醇、二碘甲烷)在不同生育期黄欧宝甜椒叶面上的稳定接触角后, 按 Van Oss-Chaudhury-Good 法估测并分析叶片的界面特性。结果表明, 3 种测试液在与甜椒不同生育期的叶片接触 36 s 时为最佳稳定接触角测量时间。苗期、开花期和结果期的甜椒叶片正、反面的表观表面自由能分别为 41.46 mJ/m² 和 40.12 mJ/m²、39.55 mJ/m² 和 37.67 mJ/m²、34.06 mJ/m² 和 33.15 mJ/m²。随着生育期的延长, 甜椒叶片越来越难被润湿, 表观表面自由能的非极性作用分量(γ^LW)百分率逐渐增加, 极性作用分量(γ^{AB})百分率逐渐降低。在同一生育期叶片表观表面自由能分量中, 非极性作用分量(γ^LW)百分率均大于极性作用分量(γ^{AB})百分率。该结果可为辣椒叶面喷雾和特定农药剂型设计提供依据。

关键词: 叶面喷雾; 甜椒; 润湿性; 表面自由能; 稳定接触角

中图分类号: S641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-0882-06

Wettability analysis on leaves of Huangoubao sweet pepper at different growth stages

WANG Cong-bo, XU Guang-chun, XU De-jin, XU Lu, GU Zhong-yan

(Institute of Plant Protection, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to study the effects of physicochemical properties of plant leaf surfaces on wettability during foliar spray, static contact angles of a single droplet on sweet pepper leaf surfaces at different growth stages were determined by contact angle method with three test solutions (water, glycerol, diiodomethane). Then the interface characteristics were evaluated by vanOss-Chaudhury-Good (OCG) method. The results indicated that the optimal measuring time of static contact angles was 36 s after the single droplets of three test solutions were in contact with the leaves of sweet pepper at different growth stages. According to the OCG method, the surface free energy (SFE) values of sweet pepper leaf surfaces at seedling, blooming, fruiting stages were 41.46 mJ/m² and 40.12 mJ/m², 39.55 mJ/m² and 37.67 mJ/m², 34.06 mJ/m² and 33.15 mJ/m², respectively. With the extension of the growth period, the sweet pepper leaves were more harder to be wetted. Accordingly, their calculated percentages of non-polar components of the SFE of pepper leaf surfaces were gradually increased. On the contrary, their calculated percentages of polar components were gradually decreased. At the same growth stage, calculated percentages of non-polar components of the SFE of pepper leaf surfaces were greater than those of polar components. The results can provide basis for pepper foliar spray and specific pesticide formulation design

Key words: foliar spray; sweet pepper; wettability; surface free energy; static contact angles

收稿日期: 2019-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200305)

作者简介: 王聪博 (1995-), 女, 山东莱芜人, 本科, 研究实习员, 主要从事农药应用技术研究。(E-mail) 963846560@qq.com

通讯作者: 徐广春, (Tel) 025-84390403; (E-mail) xgc551@163.com。顾中言, (E-mail) guzy@jaas.ac.cn

黄欧宝甜椒作为甜椒 (*Capsicum frutescens* var. *grossum* Sent) 的一种, 因其座果时形状似灯笼, 具有一定的观赏性, 加上口感脆嫩而受到人们的普遍欢

迎。近年来,随着观光、休闲农业的发展,黄欧宝甜椒自身优良的特性使其种植面积逐渐扩大。黄欧宝甜椒在设施大棚种植过程中受到桃蚜 (*Myzus persicae* Sulzer)、棉蚜 (*Aphis gossypii* Glover)、烟粉虱 (*Bemisia tabaci* Gennadius)、烟青虫 (*Heliothis assulta* Guenée)、辣椒灰霉病、辣椒病毒病等多种病虫的单一为害或几种病虫的同时为害,病虫发生较重时甜椒的外观、产量及品质^[1-3]受影响程度较为严重。设施辣椒种植过程中对于这些病虫的防治往往是以化学农药喷雾防治为主^[4-5],喷雾过程中药液在叶片上界面效应的好坏对喷洒液的持留、润湿和扩散等性能产生直接影响,并决定了喷洒液药效的好坏^[6-7]。

植物叶片的界面结构特性对喷洒的农药雾滴在靶标作物表面的润湿行为影响极为明显,叶表层蜡质的化学组分、表面拓扑形貌以及特定结构的附属物(如毛、腺体)等均是影响药液润湿的关键因子^[8-10]。绝大部分靶标作物表面蜡质成分多由长链烷烃、脂肪醇、醛、酮、脂肪酸以及萜类物质组成,这些极性、非极性物质分子的组成决定了植物叶片表面自由能的大小,叶片表面自由能的大小一定程度上决定了叶片可润湿的难易度,而其分量可进一步描述叶片的润湿性^[11]。接触角法是众多固体表面自由能估测方法中较为简便的一种^[12]。依据其估测获得的靶标植物叶片表面自由能及其分量可定性和定量分析植物叶面的内在特性,是研究植物叶面内在属性与喷洒农药雾滴润湿、渗透关系的桥梁。由于在具体试验中叶片的粗糙度及其表面化学组成对液滴在叶面上的行为均产生影响,实际上实验室测定获得的表面自由能其实是叶片的表观表面自由能。在借助几何平均数法(OWRK)分析生长部位、生长时期因子对表观表面自由能及其分量影响的过程中,远轴面叶面的表观自由能数值均大于近轴面,与之对应的色散分量数值明显上升^[13]。在估测植物叶面表面自由能时,选择单一测试液的朱定一法(ZDY)获得的结果易形成较大的偏差;需要2种检测液的调和平均数法(HM)或OWRK法易因测试液极性选择不当而获得截然不同的结果;需要3种测试液的三液法(OCG)获得的结果较为可靠^[14-15]。本研究采用OCG法研究黄欧宝甜椒叶面在不同生育期的表观表面自由能大小及其分量,以期用来指导设施辣椒病虫害防治时的叶面均匀喷雾以及为与甜椒叶片相匹配的农药剂型的设计提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

分别于黄欧宝甜椒苗期、花期、结果期3个生育期采集新鲜、无病虫为害的成熟叶片进行测试。用到的测试液有二次蒸馏水、上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产的丙三醇(含量99%)和二碘甲烷(含量98%)。

1.2 试验仪器

接触角测量仪 JC2000C1B,上海中晨数字技术设备有限公司产品;表面张力仪 DCAT11EC,德国 Dataphysics 公司产品;0~50 μL 微量注射器,上海高鸽工贸有限公司产品;便携式丁烷喷枪,韩国 SUN Aerosol Can Products Co., Ltd 公司产品。

1.3 试验方法

1.3.1 甜椒叶面的稳定接触角 将3种测试液(二次蒸馏水、丙三醇和二碘甲烷)2 μL 的液滴点滴在固定好的新鲜的黄欧宝甜椒叶面上,每隔6 s用接触角测量仪上的图像传感器拍摄试验过程中的液滴,并用拟合分析法计算出黄欧宝甜椒叶面上液滴的接触角,分析获得3种测试液在黄欧宝甜椒叶片上的稳定接触角。

1.3.2 液体表面张力的测定 按吊片法利用表面张力仪测定液体的表面张力,重复3次,试验时的温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。当测量新的液体时,用丁烷喷枪将吊片上的液体残留焚烧干净冷却后再进行测定。

1.3.3 甜椒叶片表观表面自由能的测定 按照 Van 等提出的 OCG 法^[12,14-15]测定辣椒叶片的表观表面自由能,可表示表面自由能中非极性作用分量(γ^{LW})和表面自由能中极性作用分量(γ^{AB})之和,而 γ^{AB} 又由 γ^+ (电子受体分量)和 γ^- (电子给体分量)组成。因此,表面能(固体或液体)可根据方程(1)和(2)计算获得:

$$\gamma_{\text{s}} = \gamma_{\text{s}}^{\text{LW}} + \gamma_{\text{s}}^{\text{AB}} = \gamma_{\text{s}}^{\text{LW}} + 2\sqrt{\gamma_{\text{s}}^+ \gamma_{\text{s}}^-} \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{L}} = \gamma_{\text{L}}^{\text{LW}} + \gamma_{\text{L}}^{\text{AB}} = \gamma_{\text{L}}^{\text{LW}} + 2\sqrt{\gamma_{\text{L}}^+ \gamma_{\text{L}}^-} \quad (2)$$

γ_{s} 表示固体表面自由能; γ_{L} 表示液体表面自由能; $\gamma_{\text{s}}^{\text{LW}}$ 表示固体表面自由能非极性作用分量; $\gamma_{\text{s}}^{\text{AB}}$ 表示固体表面自由能极性作用分量; $\gamma_{\text{L}}^{\text{LW}}$ 表示液体表面自由能非极性作用分量; $\gamma_{\text{L}}^{\text{AB}}$ 表示液体表面自由能极性作用分量; γ_{s}^+ 表示固体表面自由能极性作用分量中的电子受体分量; γ_{s}^- 表示固体表面自由能

极性作用分量中的电子给体分量; γ_L^+ 表示液体表面自由能极性作用分量中的电子受体分量; γ_L^- 表示液体表面自由能极性作用分量中的电子给体分量。

固液之间的相互作用的分量^[12,16]可分别表示为:

$$\gamma_{SL}^{LW} = \gamma_S^{LW} + \gamma_L^{LW} - 2\sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}} \quad (3)$$

$$\gamma_{SL}^{AB} = 2(\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_S^-} - \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-})$$

$$= 2(\sqrt{\gamma_S^+} - \sqrt{\gamma_L^+})(\sqrt{\gamma_S^-} - \sqrt{\gamma_L^-}) \quad (4)$$

γ_{SL}^{LW} 表示固液间相互作用中的非极性作用分量;
 γ_{SL}^{AB} 表示固液间相互作用中的极性作用分量。

方程(3)+(4),得到新的固液关系方程(5):

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SL}^{LW} + \gamma_{SL}^{AB}$$

$$= (\gamma_S^{LW} - \gamma_L^{LW})^2 + 2(\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+}) \quad (5)$$

γ_{SL} 表示固液间相互作用。

再借助 Young 方程^[12],可得到

$$\gamma_L^{LW} + 2\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} (1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+} \quad (6)$$

从公式(6)中可知,已知3种液体的表面张力分量及其在叶片表面的接触角,便可计算获得叶片的表面自由能。同时发现水(极性)、丙三醇(极性)和二碘甲烷(非极性)组合作为测试液估算的表面自由能准确度和重现性较好^[16]。本试验将采用这3种测试液,测定其在甜椒叶片上的稳定接触角,按公式(6)建立方程组,估测黄欧宝甜椒叶片表面表面自由能及其分量。

2 结果与分析

2.1 测试液在不同生育期黄欧宝甜椒叶片上的润湿动态

3种测试液在苗期(图1)、开花期(图2)和结果期(图3)黄欧宝甜椒叶片上的动态润湿行为较为相似,随着时间推移,其在叶面的接触角先快速下降,然后趋于平衡。不同测试液在不同生育期黄欧宝甜椒叶片正反面上的接触角平衡时间存在差异,水在苗期、开花期和结果期黄欧宝甜椒叶片正面的接触角平衡时间分别为30 s、36 s和30 s;水在其反面的接触角平衡时间分别为36 s、30 s和30 s。丙三醇在苗期、开花期和结果期黄欧宝甜椒叶片正面的接触角平衡时间均为30 s;丙三醇在其反面的接触角

平衡时间分别为30 s、24 s和30 s。二碘甲烷在苗期、开花期和结果期黄欧宝甜椒叶片正面的接触角平衡时间分别为24 s、24 s和30 s;二碘甲烷在其反面的接触角平衡时间分别为24 s、24 s和30 s。考虑到测量时间过长会因液体挥发而影响接触角测量的准确性,选用测试液与黄欧宝甜椒叶片接触36 s时为最佳稳定接触角测量时间。在测试液与黄欧宝甜椒叶片接触的36 s内,水和丙三醇在不同生育期黄欧宝甜椒叶片上的接触角变化率相差不大,但均小于二碘甲烷在不同生育期黄欧宝甜椒叶片上的接触角变化率。

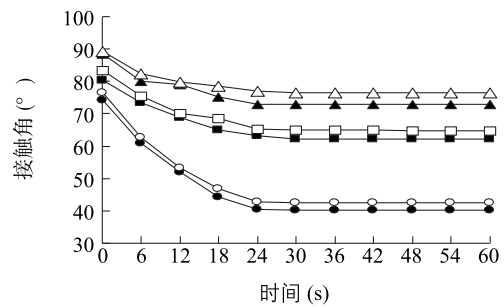


图1 测试液在苗期黄欧宝甜椒叶片上的接触角
Fig. 1 Contact angles of test solutions on leaf surface of Huangoubao sweet pepper at seedling stage

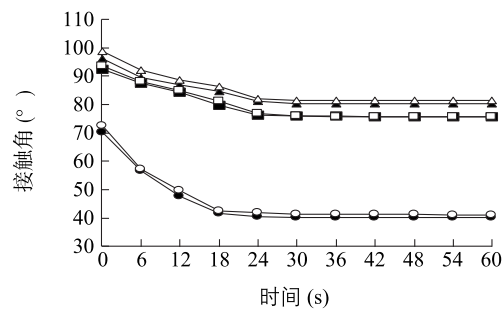


图2 测试液在开花期黄欧宝甜椒叶片上的接触角
Fig. 2 Contact angles of test solutions on leaf surface of Huangoubao sweet pepper at blooming stage

2.2 测试液在不同生育期黄欧宝甜椒叶片上的稳定接触角

不同测试液在不同时期黄欧宝甜椒叶面上的润湿性不同(表1)。药液叶面润湿性能的优劣常借助接触角来评判,润湿性好,接触角小于60°;润湿性

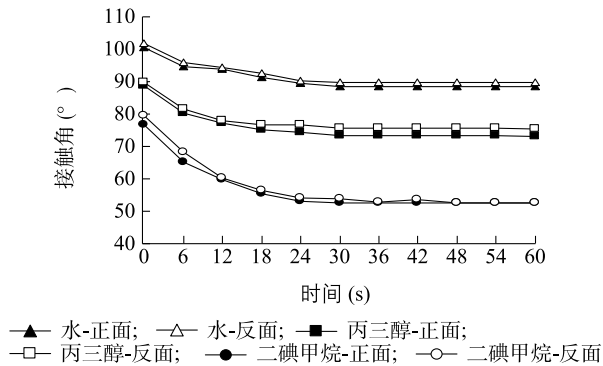


图3 测试液在结果期黄欧宝甜椒叶片上的接触角

Fig.3 Contact angles of test solutions on leaf surface of Huangoubao sweet pepper at fruiting stage

中等,接触角大于等于 60° 且小于 80° ;润湿性较差,接触角大于等于 80° 且小于 100° ;润湿性差,接触角大于等于 100° ^[17]。水在苗期黄欧宝甜椒叶片上的润湿性中等,而在开花期、结果期叶片上的润湿性较差;丙三醇在黄欧宝甜椒苗期叶片上的稳定接触角显著低于开花期和结果期叶片上的稳定接触角 ($P < 0.05$),润湿性中等;二碘甲烷在黄欧宝甜椒苗期和开花期叶片上的稳定接触角显著低于结果期叶片上的稳定接触角 ($P < 0.05$),且均低于 60° ,表现出较好的润湿性。3种测试液在黄欧宝甜椒叶片上的稳定接触角随生育期的延长而逐渐增大,表明随着生育期的延长,黄欧宝甜椒叶片越来越难被3种测试液润湿。

表1 测试液在不同生育期黄欧宝甜椒叶片上的稳定接触角

Table 1 Static contact angles of test solutions on leaf surface of Huangoubao sweet pepper at different growth stages

生育期	叶片	稳定接触角 ($^\circ$)		
		水	丙三醇	二碘甲烷
苗期	正面	72.84 \pm 2.49c	62.14 \pm 3.19b	40.32 \pm 2.27b
	反面	76.54 \pm 3.90bc	64.85 \pm 3.26b	42.63 \pm 2.26b
开花期	正面	80.37 \pm 3.14b	75.83 \pm 2.24a	40.25 \pm 2.75b
	反面	81.44 \pm 3.07b	75.82 \pm 3.10a	41.65 \pm 3.24b
结果期	正面	88.54 \pm 4.68a	73.38 \pm 3.45a	52.64 \pm 3.27a
	反面	89.78 \pm 3.87a	75.68 \pm 2.33a	53.75 \pm 2.72a

表中数值为平均值 \pm 标准差,同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 测试液的表面自由能及其分量

OCG法需要的3种测试液以及测试液的非极性作用分量 γ^{LW} 和极性作用分量 γ^{AB} 见表2。试验中

所用的水、丙三醇和二碘甲烷3种测试液的表面张力分别为 72.80 mN/m、63.70 mN/m 和 50.80 mN/m^[12,14]。常温差压下,其表面自由能的数值和表面张力的数值一致,因此3种测试液的表面自由能分别为 72.80 mJ/m²、63.70 mJ/m² 和 50.80 mJ/m²。

表2 测试液的表面自由能及其分量(20 $^\circ$ C)

Table 2 Total surface free energy and its components of test solutions

测试液	表面自由能 (mJ/m ²)	表面自由能分量 (mJ/m ²)		
		γ^{LW}	γ^{AB}	
			γ^+	γ^-
水	72.80	21.80	25.50	25.50
丙三醇	63.70	33.60	8.41	31.16
二碘甲烷	50.80	50.80	0.56	0

γ^{LW} : 表面自由能中非极性作用分量; γ^{AB} : 表面自由能中极性作用分量; γ^+ : γ^{AB} 中电子受体分量; γ^- : γ^{AB} 中电子给体分量。

2.4 黄欧宝甜椒叶片的表面自由能及其分量

不同生育期黄欧宝甜椒叶片的表观表面自由能及其分量不同(表3)。不同生育期甜椒叶片表观表面自由能的 γ^{LW} (非极性作用分量)均大于 γ^{AB} (极性作用分量);苗期和开花期的电子受体分量(γ^+)均低于电子给体分量(γ^-),而结果期的电子受体分量(γ^+)高于电子给体分量(γ^-)。苗期黄欧宝甜椒叶片正、反面的表面自由能分别为 41.46 mJ/m² 和 40.12 mJ/m²;开花期的表面自由能分别为 39.55 mJ/m² 和 37.67 mJ/m²;结果期的表面自由能分别为 34.06 mJ/m² 和 33.15 mJ/m²。随着生育期的延长,黄欧宝甜椒叶片的表观表面自由能逐渐变小。

表3 不同生育期黄欧宝甜椒叶片的表观表面自由能及其分量

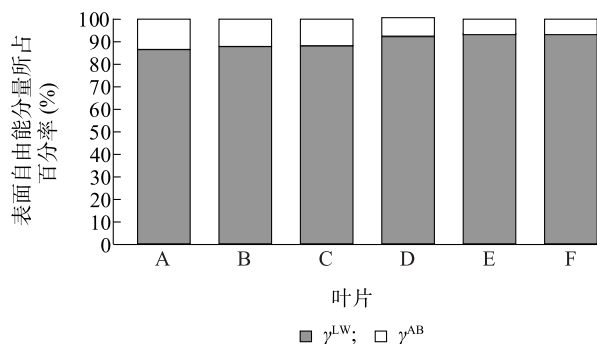
Table 3 Total surface free energy and its components of Huangoubao sweet pepper leaves at different growth stages

生育期	叶片	γ^{LW} (mJ/m ²)	γ^{AB} (mJ/m ²)		γ_s (mJ/m ²)
			γ^+	γ^-	
苗期	正面	35.85	1.00	7.86	41.46
	反面	35.25	1.05	5.65	40.12
开花期	正面	34.88	0.42	12.98	39.55
	反面	34.56	0.22	11.00	37.67
结果期	正面	31.73	1.65	0.82	34.06
	反面	30.95	1.12	1.08	33.15

γ^{LW} 、 γ^{AB} 、 γ^+ 、 γ^- 见表2注; γ_s : 叶片表面自由能。

2.5 黄欧宝甜椒叶片的表面自由能分量所占比率

不同生育期黄欧宝甜椒叶片的表观表面自由能分量所占的百分率不同(图4)。黄欧宝甜椒苗期叶片正、反面表观表面自由能中 γ^{LW} (非极性作用分量) 所占百分率分别为 86.47% 和 87.86%; 开花期叶片正、反面表观表面自由能中 γ^{LW} 所占百分率分别为 88.19% 和 92.59%; 结果期叶片正、反面表观表面自由能中 γ^{LW} 所占百分率分别为 93.17% 和 93.36%, 均介于 85%~95%。黄欧宝甜椒苗期叶片正、反面表观表面自由能中 γ^{AB} (极性作用分量) 所占百分率分别为 13.53% 和 12.14%; 开花期叶片正、反面表观表面自由能中 γ^{AB} 所占百分率分别为 11.81% 和 8.26%; 结果期叶片正、反面表观表面自由能中 γ^{AB} 所占百分率分别为 6.83% 和 6.64%, 均低于 15%。随着生育期的延长, 黄欧宝甜椒叶片正、反面表观表面自由能中 γ^{AB} (极性作用分量) 所占百分率逐渐减少, 而 γ^{LW} (非极性作用分量) 逐渐增加。



A: 苗期叶片正面; B: 苗期叶片反面; C: 开花期叶片正面; D: 开花期叶片反面; E: 结果期叶片正面; F: 结果期叶片反面;

图4 不同生育期黄欧宝甜椒叶片表观表面自由能分量的百分率

Fig. 4 Percentage of surface free energy components of Huangoubao sweet pepper at different growth stages

3 讨论

绝大多数植物叶片表面存在着占表皮层 1%~10% 的蜡质层^[18], 水、农药等小分子物质进入叶片细胞的难易程度很大程度上取决于表皮蜡质层, 其内在的形貌特征随着品种或生育期等因子的不同而存在差异^[19-20]。表皮蜡质层的化学组分很大程度上决定了叶面非极性分量和极性分量的比例^[21], 在辣椒表皮蜡质层组分分析中发现其主要由非极性物

质和极性物质构成, 其中非极性物质相对较多^[22]。从不同生育期叶片的表观表面自由能分量所占百分率来看, 非极性作用分量 (γ^{LW}) 所占比例逐渐增大, 极性作用分量 (γ^{AB}) 所占比例逐渐降低, 一定程度上表明非极性物质含量随着生育期的延长逐渐积累, 极性物质积累的速度低于非极性物质, 这一点还有待更多的试验结果来验证。另外本研究中黄欧宝甜椒 3 个生育期叶片表观表面自由能虽存在差异, 但其最大差值分别为 7.40 mJ/m² (正面) 和 6.97 mJ/m² (反面), 总的来说相差不大。如果差值过大的话将使得通过叶面喷雾防治甜椒病虫害更为复杂。如在对 5 个品种玉米叶片表面自由能分析过程中发现, 5 个品种中叶片正面表面自由能最大值与最小值之间相差 24.93 mJ/m², 叶片反面表面自由能最大值与最小值的差值更大^[23], 这就有可能使得同一药液叶面喷雾后药液在叶面上的滞留量差异大, 喷雾不均匀, 间接地导致药效的差异, 因此很有必要建立喷施靶标叶面属性数据库以便更科学的施用农药。

设施辣椒病虫害防治时, 多将农药制剂兑水喷雾以控制病虫害。水的表面张力为 72.80 mN/m, 其在黄欧宝甜椒不同生育期叶片上表现出的润湿性较差, 而设施辣椒中常用的农药制剂稀释喷雾时的药液表面张力多集中在 30~50 mN/m^[7], 而甜椒叶片的表观表面自由能介于 33.15~41.46 mJ/m², 属于较难润湿的靶标。一般认为喷洒农药稀释液的表面张力数值低于靶标对象 (如叶面) 的表面自由能数值时, 药液在靶标叶面上展现出的润湿性良好^[24]。若采用乳油、可分散油悬浮剂、微乳剂等润湿性相对较好的农药剂型兑水喷雾, 大多数药液的表面张力低于黄欧宝甜椒叶面的表观表面自由能数值, 可以取得较好的防治效果; 而使用水乳剂、悬浮剂、可湿性粉剂等润湿性相对较差的农药剂型兑水喷雾, 大多数药液的表面张力高于黄欧宝甜椒叶面的表观表面自由能数值, 防治效果欠佳, 需要在喷雾时添加具有润湿性能的桶混助剂来提高防效。因此在对黄欧宝甜椒进行病虫害防治时, 需根据实际应用场景选择适合的桶混助剂来调节药液的表面张力, 获得药液在黄欧宝甜椒叶面上较好的润湿性, 使药液理化性能与叶面内在属性相匹配, 进而达到提高农药有效利用率和防治效果的目的。

参考文献:

- [1] 陈丽,樊民周,卫军锋,等. 陕西辣椒病毒病的毒原鉴定及化学防治药剂筛选[J]. 西北农林科技大学学报, 2007, 35(1): 121-126.
- [2] 徐广春,顾中言,徐德进,等. 5种杀虫剂对设施大棚辣椒蚜虫的防治效果[J]. 农药, 2013, 52(11): 844-845.
- [3] 吴明峰,高尚,杨耀,等. 棉铃虫和烟青虫初孵幼虫对植物顶尖嫩叶的偏好性差异[J]. 植物保护, 2016, 42(3): 63-69.
- [4] 李北兴,李俊杰,高杨杨,等. 山东省露地辣椒病虫害的化学防治及高产稳产策略[J]. 农药科学与管理, 2018, 39(1): 57-62.
- [5] 袁会珠,杨代斌,闫晓静,等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 14-20.
- [6] XU L Y, ZHU H P, OZKAN H E, et al. Droplet evaporation and spread on waxy and hairy leaves associated with type and concentration of adjuvants[J]. Pest Management Science, 2011, 67: 842-851.
- [7] 徐广春,顾中言,徐德进,等. 常用农药在水稻叶片上的润湿能力分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1731-1740.
- [8] KOLYVA F, STRATAKIS E, RHIZOPOULOU S, et al. Leaf surface characteristics and wetting in *Ceratoniasiliqua* L. [J]. Flora, 2012, 207(8): 551-556.
- [9] ZHU L, GE J R, QI Y Y, et al. Droplet impingement behavior analysis on the leaf surface of Shu-ChaZao under different pesticide formulations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 16-25.
- [10] 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.
- [11] 范仁俊,张晓曦,周璐,等. 利用 OWRK 法预测桃叶表面润湿性能的研究[J]. 农药学报, 2011, 13(1): 79-83.
- [12] VAN OSS C J, CHAUDHURY M K, GOOD R J. Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems[J]. Chemical Reviews, 1988, 88: 927-941.
- [13] 张晨辉,赵欣,雷津美,等. 非离子表面活性剂 Triton X-100 溶液在不同生长期小麦叶片表面的润湿行为[J]. 物理化学学报, 2017, 33(9): 1846-1854.
- [14] FERNANDEZ V, KHAYET M. Evaluation of the surface free energy of plant surfaces: toward standardizing the procedure[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 510.
- [15] 徐广春,顾中言,徐德进,等. 辣椒叶片表面自由能的计算方法[J]. 中国农业科学, 2018, 51(16): 3084-3094.
- [16] 陈晓磊. 固体聚合物表面接触角的测量及表面能研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- [17] 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.
- [18] FERNÁNDEZ V, SANCHEZ-KNAPIK D, GUZMAN P, et al. Wettability, polarity, and water absorption of holm oak leaves: effect of leaf side and age[J]. Plant Physiology, 2014, 166(1): 168-180.
- [19] PUENTE D W M, BAUR P. Wettability of soybean (*Glycine max* L.) leaves by foliar sprays with respect to developmental changes[J]. Pest Management Science, 2011, 67: 798-806.
- [20] TAYLOR P. The wetting of leaf surface[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2011, 16(4): 326-334.
- [21] KHAYET M, FERNÁNDEZ V. Estimation of the solubility parameters of model plant surfaces and agrochemicals: a valuable tool for understanding plant surface interactions[J]. Theoretical Biology and Medical Modelling, 2012, 9: 45.
- [22] BAUER S, SCHULTE E, THIER H P. Composition of the surface waxes from bell pepper and eggplant[J]. European Food Research and Technology, 2005, 220(1): 5-10.
- [23] REVILLA P, FERNÁNDEZ V, ALVAREZ-LGLESIAS L, et al. Leaf physico-chemical and physiological properties of maize (*Zea mays* L.) populations from different origins[J]. Plant Physiology Biochemistry, 2016, 107: 319-325.
- [24] GASKIN R E, PATHAN A K. Characterising plant surfaces and adjuvant interactions to improve pesticide spray retention and coverage on avocados[J]. New Zealand Avocado Growers' Association Annual Research Report, 2006, 6: 63-70.

(责任编辑:陈海霞)