

引用格式:

王恺帝, 王士林, 徐陶, 祁雁楠, 吕晓兰, 李雪. 植物叶片表面结构表征及其润湿性能分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(6): 69–78.

WANG K D, WANG S L, XU T, QI Y N, LYU X L, LI X. Characterization of plant leaf surface structure and its wettability performance analysis[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(6): 69–78.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



植物叶片表面结构表征及其润湿性能分析

王恺帝^{1,2}, 王士林², 徐陶^{2,3}, 祁雁楠^{2,3}, 吕晓兰^{2,3}, 李雪^{1,2,3*}

(1. 南京信息工程大学自动化学院, 江苏南京 210044; 2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏南京 210014; 3. 农业农村部园艺作物农业装备重点实验室, 江苏南京 210014)

摘要: 为了解不同植物叶片的表面结构及其润湿性, 本研究使用扫描电镜分别对梨、桃、辣椒和水稻4种典型植物表面结构进行表征, 同时测试去离子水、甲酰胺、乙二醇和N,N-二甲基甲酰胺4种液体在各叶面的接触角并用OWRK法计算表面自由能及其分量。结果表明: 梨、桃、辣椒叶片的反面均有明显的椭圆状气孔, 辣椒叶表面气孔数量明显多于其他3种植物叶片的; 水稻叶正面具有明显的条纹状结构和均匀分布的球状突起, 反面则为条状结构上有大量对称的圆形结构突起物。梨叶、桃叶、辣椒叶为亲水叶片, 水稻叶为疏水叶片; 梨、桃、辣椒的正面接触角均小于反面的, 而水稻叶则与之相反。在同组检测液下, 桃叶正面表面自由能大于反面的, 而水稻叶反面的表面自由能大于正面的; 梨叶、桃叶、水稻叶的表面自由能以色散分量为主, 可与非极性药液产生强黏附或润湿效应; 辣椒叶以极性分量为主, 极性溶剂的药剂在该表面润湿性和附着力更强。

关键词: 润湿性; 叶面; 接触角; OWRK法; 表面自由能

中图分类号: S48

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)06-0069-10

Characterization of plant leaf surface structure and its wettability performance analysis

WANG Kaidi^{1,2}, WANG Shilin², XU Tao^{2,3}, QI Yannan^{2,3}, LYU Xiaolan^{2,3}, LI Xue^{1,2,3*}

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;
2. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, Jiangsu 210014, China; 3. Key Laboratory of Modern Horticultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing, Jiangsu 210014, China)

Abstract: To investigate the surface microstructures and wettability of different plant leaves, scanning electron microscopy(SEM) was employed to characterize the surface morphologies of four representative plant species: pear, peach, pepper and rice. Meanwhile, the contact angles of four probe liquids-deionized water, formamide, ethylene glycol and N, N-dimethylformamide on both adaxial and abaxial leaf surfaces were measured. Based on these measurements, the surface free energy(SFE) and its components were calculated using the Owens-Wendt-Rabel-Kaelble(OWRK) method. The results showed that the abaxial surfaces of pear, peach, and pepper leaves exhibited distinct elliptical stomata, with pepper leaves showing a significantly higher stomatal density than those of the other three species. In contrast, the adaxial surface of rice leaves displayed pronounced striated structures with uniformly distributed spherical protrusions, whereas the abaxial surface was characterized by striped structures accompanied by numerous symmetrically arranged circular protrusions. Pear, peach and pepper leaves exhibited hydrophilic behavior, while rice

收稿日期: 2025-01-19

修回日期: 2025-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901419); 国家梨产业技术体系项目(CARS-28); 山东省重点研发项目(2022SFGC0204)

作者简介: 王恺帝(2001—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事精准施药技术研究, vangkaidi@163.com; *通信作者, 李雪, 博士, 副研究员, 主要从事精准施药技术研究, neigelee99@163.com

leaves were predominantly hydrophobic. For pear, peach, and pepper leaves, the contact angles on the adaxial surfaces were lower than those on the abaxial surfaces, whereas the opposite trend was observed for rice leaves. Consistently, the SFE of the adaxial surfaces of peach leaves was higher than that of its corresponding abaxial surfaces, while rice leaves showed higher SFE on the abaxial surface. Furthermore, the SFE of pear, peach and rice leaves was mainly governed by the dispersive component, suggesting stronger wettability and adhesion toward nonpolar liquid agents. In contrast, the SFE of pepper leaves was dominated by the polar component, indicating that polar solvent-based agents exhibited enhanced wettability and adhesion on pepper leaf surfaces.

Keywords: wettability; leaf surface; contact angle; OWRK method; surface free energy

梨、桃、辣椒及水稻是我国重要的果蔬作物和粮食作物，种植面积广，产量高，在国内外农业生产中占有重要地位。然而，害虫对作物的侵害严重影响了农业生产的正常进行^[1]。为了保障作物产量，病虫害防治环节至关重要。目前我国主要的病虫害防治手段仍是化学防治，但农药的有效利用率却相对较低，仅为30%~40%^[2]。在化学农药施用过程中，大量农药因飘移、脱靶、蒸发而流失，严重影响生态环境，危害食品安全^[3~5]。造成农药流失的原因比较复杂，主要受药械性能、农药理化性质、植物表面特性以及环境因素等方面的影响^[6]。其中，农药雾滴的理化性质和植物叶片表面的亲疏水性是影响农药雾滴黏附、铺展及其在靶标表面有效沉积的关键因素。

植物叶片的亲疏水性与其表面的微观结构密切相关。现有研究表明，植物叶片表面的蜡质层分布^[7]、叶毛密度^[8]、气孔分布^[9]等微观结构，都会影响其表面的亲疏水性。通常叶片表面的亲疏水性通过接触角(CA)和表面自由能(SFE)来量化^[10]。当叶片接触角小于90°时，可认为其是亲水性的；当接触角为90°~180°时，可认为其是疏水性的^[11]。表面自由能作为另外一种重要的润湿参数，能从能量的角度更好地描述固体的润湿特性与液滴之间的相互作用^[12~14]。MORAN PUENTE等^[15]研究发现，不同生长时期的大豆叶片的表面自由能存在明显差异。郭瑞峰等^[16]发现苹果叶片正面自由能显著高于反面自由能，且均以色散分量为主。

植物叶片表面的亲疏水性决定了农药雾滴在叶面上的润湿行为^[17]。农药雾滴在叶面上的润湿特性是液面张力和叶面结构共同作用的结果^[18]。徐广春等^[19]发现Silwet-408溶液的雾滴在不同倾角叶片上的前进角大于后退角，由此形成的润湿滞后与稻叶表面存在的高密度乳突密切相关。孙艳红等^[20]

指出荷叶的强疏水性源于其乳突层和蜡质层的复合结构。LEE等^[21]认为水稻叶片表面的层次结构是影响水稻叶片疏水性的重要因素。此外，PANDEY等^[22]测试了30种植物叶片的亲疏水性，发现气孔密度越大，叶片的亲水性越差。ZHU等^[23]证实了新鲜油菜叶片具有明显的疏水性。王潇楠等^[24]研究发现，荔枝叶片正面的润湿性明显优于反面的润湿性。目前，已有研究者深入探讨了叶片表面结构与润湿性能之间的关系，但大多数研究聚焦于单一植物，针对不同种植物叶片润湿性能的研究较少。

为明确植物叶片的表面结构及其润湿性能，本研究使用扫描电镜分别对梨、桃、辣椒和水稻4种典型植物叶片表面结构进行表征；分别选用水(W)、乙二醇(EG)、甲酰胺(F)和N,N-二甲基甲酰胺(DMF)作为检测液，测量这4种植物叶片上的接触角，采用OWRK方法计算叶片表面的自由能及其分量，以期为研究农药雾滴在植物表面的润湿沉积行为提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试试剂与材料

试验试剂：2%戊二醛(采用磷酸缓冲液配制，pH=7.0)，3%戊二醛(采用磷酸缓冲液配制，pH=7.2)，磷酸缓冲液(0.2 mol/L，pH=6.5)，去离子水，N,N-二甲基甲酰胺(纯度>99.9%，上海阿拉丁生化科技股份有限公司)，甲酰胺(纯度为99%，上海麦克林生化科技股份有限公司)，乙二醇(纯度≥99.5%，国药集团化学试剂有限公司)。

试验材料：梨叶(‘苏翠1号’)、桃叶(‘碧桃’)、辣椒叶(‘苏椒27号’)、水稻叶(‘南粳802’)。

1.2 试验仪器

主要试验仪器包括CO₂临界点干燥仪(K850型，英国Quorum公司)，离子溅射仪(108auto型，英国

Cressington 公司), 扫描电镜(产品型号为 EVO-LS10, 德国ZEISS公司), 接触角测量仪(产品型号为JC2000C, 上海中晨数字技术设备有限公司), 4 μL微量注射器。

1.3 叶片表面结构测量

统一使用成熟期植物叶片进行表面结构测量。试验开始前0.5 h内采集新鲜叶片, 用清水冲洗后放入清水中浸泡以待使用。将备用的梨、桃、水稻、辣椒新鲜叶片分别剪成1 cm×1 cm的小块(避开中脉), 然后用2%戊二醛固定30 min后, 再用3%戊二醛浸泡16 h。配制30%~90%系列乙醇溶液, 将叶片依次脱水15 min, 再用无水乙醇各脱水2次(每次15 min)。每隔30 min用乙酸异戊酯置换1次乙醇, 共置换2次。将叶片用滤纸包裹后放入CO₂临界点干燥仪(K850)干燥(36 °C, 8.1 MPa)。将干燥后的样品贴在样品台上并用离子溅射仪喷金, 然后使用扫描电镜(ZEISS EVO-LS10), 分别在500倍、1 000倍和4 000倍的放大倍数下进行扫描, 选取合适的图像用于后续分析。

1.4 接触角测量

将待测的新鲜植物叶片用清水冲洗干净, 然后将其裁剪为小块(1 cm × 1 cm), 保持自然状态, 平整地固定在载玻片上, 并置于接触角测量仪的载物台上, 轻轻压实以防止卷曲。用微量注射器分别抽取4 μL去离子水、N,N-二甲基甲酰胺、甲酰胺和乙二醇液滴, 滴在叶面上, 待液滴稳定后利用接触角测量仪上的CCD摄像头对液滴进行连续拍摄(4 s/次), 后利用拟合分析法对拍摄的图像进行处理, 测得40 s后的稳定接触角(温度控制在(25±0.5) °C, 相对湿度为60%~70%)。试验选用成熟植株新鲜叶片正反两面, 每面重复测量3次, 数据以平均值±标准差的形式表示。采用SPSS Statistics 25软件对试验数据进行显著性分析。

1.5 表面自由能计算

表面自由能的计算方法主要包括HM法、OWRK法、OCG法、ZDY法及Zisman法等^[25~28]。由于OWRK法具有操作简单、适用范围广和结果准确等优点^[26], 故本试验选用OWRK法。OWRK法基于Berthelot假说, 认为界面相互作用不仅受色散力(色

散分量)影响, 还受氢键等极性作用力(极性分量)的影响。它们可以用来表征材料的表面特性, 帮助解释和预测材料的润湿性等。固液两相间的表面自由能 γ_{SL} 可以表示为

$$\gamma_{SL} = \gamma_s + \gamma_l - 2(\sqrt{\gamma_s^d} \sqrt{\gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^{nd}} \sqrt{\gamma_l^{nd}}) \quad (1)$$

式中: γ_l 和 γ_s 分别为液体和固体的表面自由能; γ_s^d 和 γ_l^d 分别为固体和液体的色散分量; γ_s^{nd} 和 γ_l^{nd} 分别为固体和液体的极性分量。

结合Young方程, 可得到:

$$\gamma_l(1+\cos\theta) = 2(\sqrt{\gamma_s^d} \sqrt{\gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^{nd}} \sqrt{\gamma_l^{nd}}) \quad (2)$$

由式(2)可知, 仅需测定2种已知表面张力的液体在固体表面的接触角θ, 就可获得固体表面自由能分量 γ_s^d 和 γ_s^{nd} , 然后利用式(3)计算表面自由能 γ_s :

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^{nd} \quad (3)$$

本研究选择去离子水、N,N-二甲基甲酰胺、甲酰胺和乙二醇为检测液, 其表面自由能及其分量如表1所示。

表1 检测液的表面自由能及其分量

Table 1 Surface free energy and components for the tested liquids

检测液	表面自由能	色散分量	极性分量	mJ/m ²
去离子水	72.80	29.10	43.70	
N,N-二甲基甲酰胺	37.30	32.42	4.88	
甲酰胺	58.20	35.10	23.10	
乙二醇	48.20	29.29	18.91	

2 结果与分析

2.1 植物叶片的表面结构表征

为了观察不同放大倍数下4种植物叶片正反表面的微观结构, 获得不同程度的表面结构信息, 使用扫描电镜对同种叶片的不同部位进行拍摄, 每种叶片拍摄3组, 本文仅选取其中1组进行展示, 如图1所示。

由图1可知, 在500倍放大倍数下, 梨叶正面结构排列紧密, 表面具有明显的条纹及起伏特征。在4 000倍的放大倍数下, 叶片的表面纹理更加清晰, 能够观察到条纹的结构。梨叶反面分布有密集的气孔, 呈椭圆形的开口结构, 密度大约为5×10³个/mm², 孔径为10~20 μm, 气孔周围的细小突起或鳞片增加了表面的粗糙度。

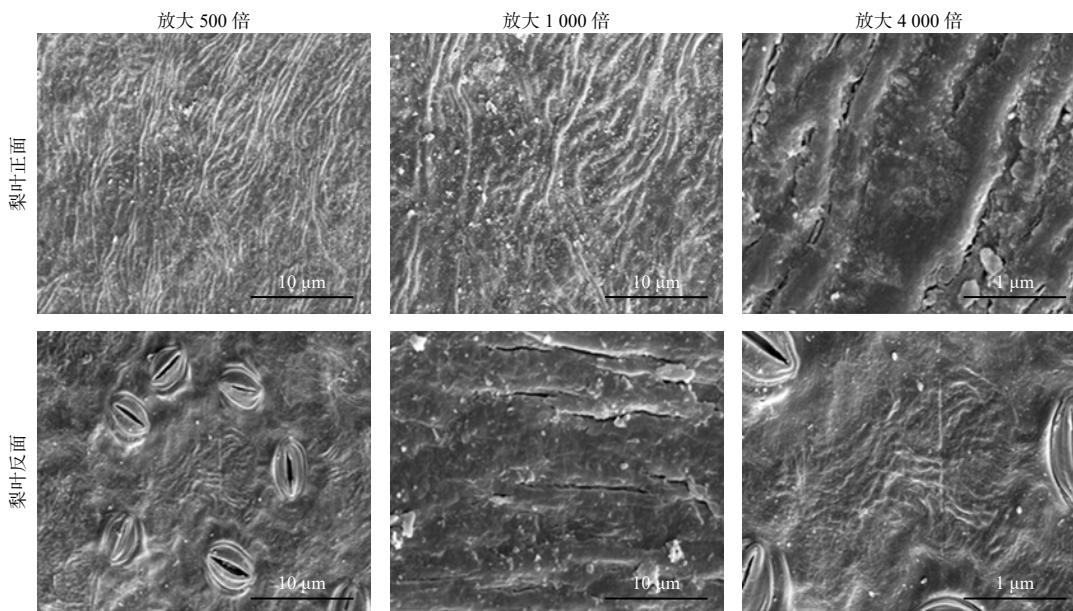


图1 梨叶正面和反面的微观结构

Fig. 1 The microstructures of the adaxial surface and the abaxial surface of pear leaves

图2所示为桃叶正反两面的微观结构。由图2可见：桃叶正面出现明显的呈波状起伏的表面结构，看起来比较粗糙^[29]，具有随机分布的纤维状纹理，使得叶片正面形成复杂的局部结构；桃叶反面呈现

出波浪状的纹理，叶面上出现大量的气孔结构，约 1.2×10^4 个/ mm^2 ，孔径为 $12\sim18 \mu\text{m}$ ，气孔呈略微凸出的椭圆形，分布在整个叶片表面。

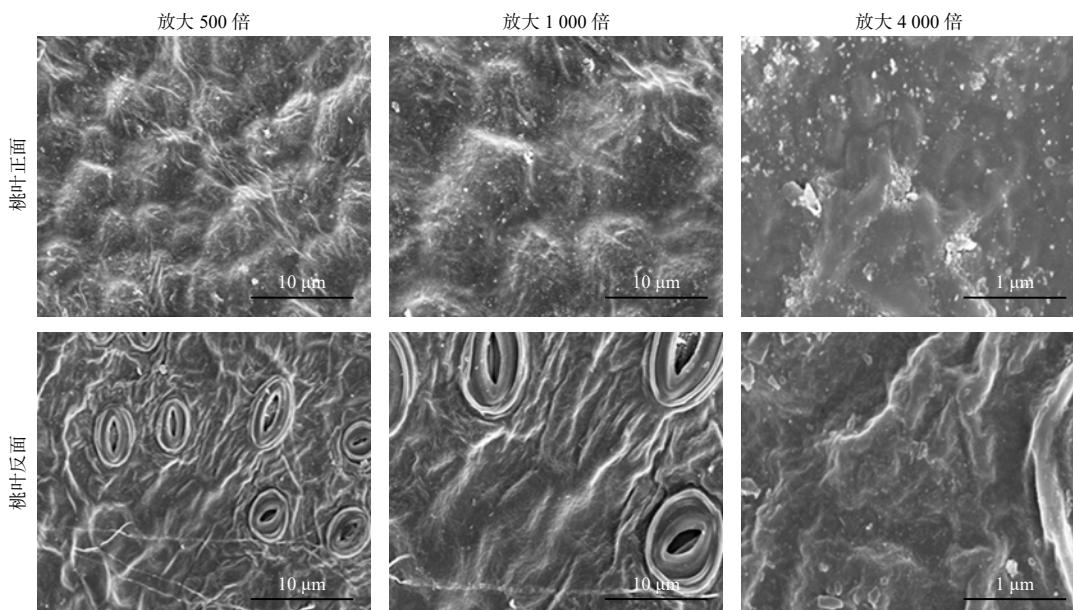


图2 桃叶正面和反面的微观结构

Fig. 2 The microstructures of the adaxial surface and the abaxial surface of peach leaves

由图3可见：辣椒叶正面表皮细胞形态清晰，呈蜂窝状排列，表皮细胞之间具有明显的边界，形成了凹凸不平的表面结构；辣椒叶的反面出现大量

的气孔，密度约为 1.5×10^4 个/ mm^2 ，孔径为 $15\sim25 \mu\text{m}$ ，气孔为椭圆形，分布较均匀。辣椒叶片反面与叶片正面的结构特征相似。

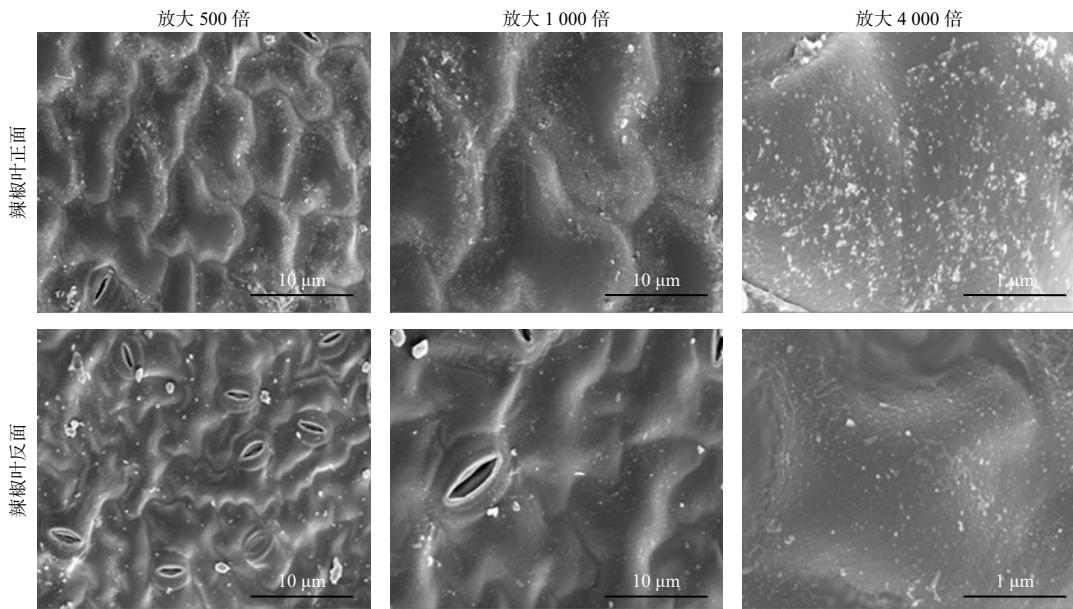


图3 辣椒叶正面和反面的微观结构

Fig. 3 The microstructures of the adaxial surface and the abaxial surface of pepper leaves

由图4可知,水稻叶的正面具有明显的条纹状结构和均匀分布的球状突起(其间均匀而随机地分布少量的钩毛和纤细毛^[30]),这些结构构成叶片表面的主要微观结构,覆盖密度约为 1.6×10^4 个/mm²,

基宽约为2 μm,大多数高度相对均匀,高度与基宽之比为0.7~1.5;水稻叶反面呈明显的条状结构,有大量对称的圆形结构突起物。

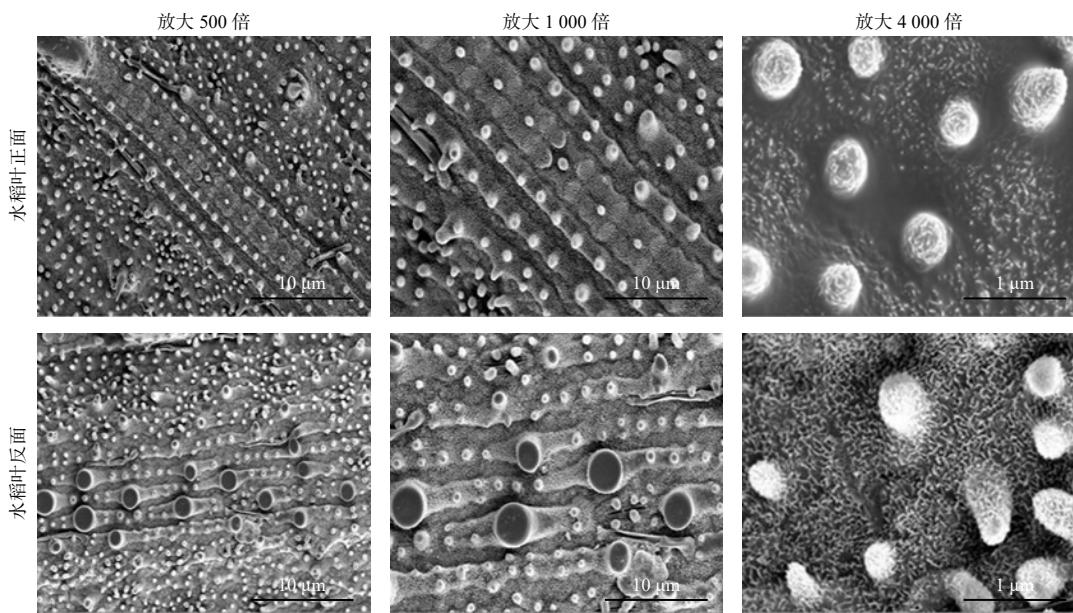


图4 水稻叶正面和反面的微观结构

Fig. 4 The microstructures of the adaxial surface and the abaxial surface of rice leaves

从叶片的微观角度来看,这4种叶片正面都呈现出有规则的表皮细胞排列,形成凹凸不平的表面。梨叶正面呈现波浪状纹理,桃叶和辣椒叶正面都呈现出类似球状的突起,水稻叶正面的规则球状突起更加明显。在相同放大倍数下,辣椒叶表面气孔数量明显多于其他3种植物叶片的;梨、桃、辣

椒叶片的反面均有明显的椭圆状气孔,与水稻叶面相比,梨、桃、辣椒的叶片表面没有毛刺结构和乳突结构。

2.2 检测液在不同叶面上的润湿性

表2所示为不同检测液在不同植物叶片正、反

面的接触角。由表2可见：不同检测液在同种叶面上的接触角不同，多数情况下，去离子水、甲酰胺、乙二醇、N,N-二甲基甲酰胺的接触角依次减小，说明溶液性质会影响液体在植物表面的润湿性。由表2还可知：相同检测液在不同植物、同向叶面上的接触角亦有不同。例如，以去离子水为检测液时，水稻、桃、辣椒、梨的接触角依次减小，其中检测

液在水稻叶面正面的接触角最大为128.20°，反面为118.58°，表明检测液在水稻叶面的润湿性最差。除水稻叶片外，相同检测液在其他3种植物叶片反面的接触角均大于正面的，说明相比于叶片正面，检测液在叶片反面的润湿性较差，这可能是植物叶片正反表面化学组成和表面微观结构不同所致。

表2 植物叶片正面和反面的接触角

Table 2 The contact angles of tested liquids on the adaxial surface and abaxial surfaces of plants

植物	叶面	接触角/(°)			
		去离子水	乙二醇	N,N-二甲基甲酰胺	甲酰胺
梨	正面	65.06±8.68 ^c	46.61±6.87 ^{cd}	19.14±3.74 ^f	52.15±8.16 ^c
	反面	76.14±2.50 ^{cd}	51.43±8.43 ^{bcd}	27.62±2.44 ^c	53.20±5.55 ^c
桃	正面	70.44±2.97 ^{de}	43.04±4.55 ^d	20.58±0.16 ^{ef}	53.99±3.75 ^c
	反面	83.92±1.79 ^c	59.11±6.50 ^b	28.80±3.63 ^c	66.13±6.09 ^d
辣椒	正面	67.50±4.01 ^c	57.06±4.27 ^{bc}	60.13±8.02 ^d	70.09±8.87 ^d
	反面	82.46±2.76 ^c	61.64±8.14 ^b	69.50±4.14 ^c	80.92±5.27 ^c
水稻	正面	128.20±4.97 ^a	118.25±7.76 ^a	119.64±4.74 ^a	126.54±3.61 ^a
	反面	118.58±2.56 ^b	110.03±1.47 ^a	91.61±6.14 ^b	95.45±1.06 ^b

注：同列数据不同小写字母表示植物间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

以接触角90°判定表面亲疏水性，由表2还可知，除水稻叶片正反面外，去离子水在其他3种作物叶片表面上的接触角均小于90°，表明梨、辣椒和桃叶片表现为亲水性，而水稻叶片则表现为疏水性。去离子水在不同植物叶片上的接触角差异很大，水稻的接触角明显大于其他3种植物的，且与其他植物之间的差异显著($P<0.05$)。对比乙二醇在不同植物叶片上的接触角可知，水稻叶的接触角依然显著高于其他植物的，桃叶的反面接触角显著大于正面的($P<0.05$)。当以N,N-二甲基甲酰胺作为检测液时，水稻叶的接触角仍最大，和其他3种植物有显著差异，辣椒叶正反面接触角差异显著($P<0.05$)。当以甲酰胺为检测液时，水稻叶正面的接触角显著大于其他3种植物的，其差异性最高；辣椒叶和桃叶正反面的接触角差异显著($P<0.05$)。水稻叶的接触角在4种检测液中都较高，表现出强烈的疏水性。当使用乙二醇、甲酰胺和N,N-二甲基甲酰胺作为检测液时，水稻、辣椒、桃、梨叶片的接触角均呈现下降趋势，其中，以N,N-二甲基甲酰胺为检测液时上述4种植物叶片的接触角下降幅度最大，正面接触角范围约为19.14°~119.64°，反面为27.62°~91.61°。然而，在不同检测液下水稻叶面接触角均大于90°，说明水稻叶正反面都不容易被常规药液润湿，且正

面比反面更难被润湿。这表明检测液在水稻叶表面难以润湿和展布，润湿性较差。

2.3 叶片表面自由能

当靶标叶片的总表面自由能越大时，该植物的润湿性能越好；当总表面自由能越小时，该植物的润湿性能越差^[31]。由4种检测液体的表面自由能及其色散分量、极性分量(表1)和接触角(表2)，根据OWRK法计算得到4种植物叶片的表面自由能。

2.3.1 梨叶表面自由能及其分量

由表3可知：梨叶正面的表面自由能为35.68~38.59 mJ/m²，其中，W-DMF组表面自由能最大，为38.59 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为14.81 mJ/m²和23.78 mJ/m²；EG-DMF组表面自由能最小，为35.68 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为7.55 mJ/m²和28.13 mJ/m²。梨叶反面的表面自由能为32.92~48.51 mJ/m²，其中，W-F组表面自由能最大，为48.51 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为1.52 mJ/m²和46.99 mJ/m²；W-EG组最小，为32.92 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为7.23 mJ/m²和25.69 mJ/m²。结合图1可知，反面密集的椭圆状气孔结构增加了叶片粗糙度，使接触角变大，不利于液滴的铺展；正面可能具有较少的蜡质覆盖，增

强了液滴的润湿性，导致液体与其表面更容易发生相互作用，从而表现出较高的自由能。

表3 梨叶正面和反面的表面自由能及其分量

Table 3 Surface free energy and its component of the adaxial surface and the abaxial surface of pear leaves mJ/m ²				
叶面	检测液体	表面自由能	色散分量(所占比例)	极性分量(所占比例)
正面	W-EG	36.92	12.60(34%)	24.32(66%)
	W-DMF	38.59	23.78(62%)	14.81(38%)
	W-F	37.93	21.73(57%)	16.20(43%)
	F-DMF	37.95	24.44(64%)	13.51(36%)
	EG-DMF	35.68	28.13(79%)	7.55(21%)
	W-EG	32.92	25.69(78%)	7.23(22%)
	W-DMF	33.49	26.67(80%)	6.82(20%)
	W-F	48.51	46.99(97%)	1.52(3%)
	F-DMF	37.23	21.54(58%)	15.69(42%)
	EG-DMF	33.40	26.99(81%)	6.41(19%)

注：“W-EG”表示检测液水(W)和乙二醇(EG)的组合，结合式(2)与式(3)计算得到叶面表面自由能及分量；其余以此类推。

由表3还可知，梨叶正反面的表面自由能为32.92~48.51 mJ/m²，除正面的W-EG组外，其余检测液组的色散分量均高于极性分量，表明梨叶适合施用非极性药剂，以提高液滴在叶面的润湿性和附着性。

2.3.2 桃叶表面自由能及其分量

由表4可知，桃叶正面的表面自由能为36.21~38.03 mJ/m²，其中，W-F组表面自由能最大，为38.03 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为8.50 mJ/m²和29.53 mJ/m²；W-DMF组最小，为36.21 mJ/m²，其

极性分量和色散分量分别为10.13 mJ/m²和26.08 mJ/m²。桃叶反面的表面自由能为31.69~35.44 mJ/m²，其中，W-F组表面自由能最大，为35.44 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为1.85 mJ/m²和33.59 mJ/m²；W-EG组最小，为31.69 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为2.94 mJ/m²和28.75 mJ/m²。桃叶正面表面自由能均大于反面的，结合图2可知，桃叶反面波浪状的纹理与大量的气孔结构可能不利于液滴的润湿与铺展。

表4 桃叶正面和反面的表面自由能及其分量

Table 4 Surface free energy and its component of the adaxial surface and the abaxial surface of peach leaves mJ/m ²				
叶面	检测液体	表面自由能	色散分量(所占比例)	极性分量(所占比例)
正面	W-EG	36.87	27.39(74%)	9.48(26%)
	W-DMF	36.21	26.08(72%)	10.13(28%)
	W-F	38.03	29.53(78%)	8.50(22%)
	F-DMF	36.91	25.06(68%)	11.85(32%)
	EG-DMF	36.47	25.67(70%)	10.80(30%)
	W-EG	31.69	28.75(91%)	2.94(9%)
	W-DMF	33.12	30.65(93%)	2.47(7%)
	W-F	35.44	33.59(95%)	1.85(5%)
	F-DMF	32.93	29.76(90%)	3.17(10%)
	EG-DMF	33.31	31.27(94%)	2.04(6%)

注：“W-EG”表示检测液水(W)和乙二醇(EG)的组合，结合式(2)与式(3)计算得到叶面表面自由能及分量；其余以此类推。

由表4还可知，桃叶正面和反面表面自由能为31.69~38.03 mJ/m²，桃叶正反面的表面自由能色散分量均高于极性分量，表明桃叶适合施用以色散分量为主的药剂。

2.3.3 辣椒叶表面自由能及其分量

由表5可知，辣椒叶正面的表面自由能为27.06~45.38 mJ/m²，其中，W-F组表面自由能最大，为45.38 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为43.92 mJ/m²

和1.46 mJ/m²；F-DMF组最小，为27.06 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为15.71 mJ/m²和11.35 mJ/m²。辣椒叶反面的表面自由能为19.58~32.52 mJ/m²，其中，EG-DMF组表面自由能最大，为32.52 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为26.67 mJ/m²和5.85 mJ/m²；F-DMF组最小，为19.58 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为8.93 mJ/m²和10.65 mJ/m²。结合图3推测可知，辣椒叶反面密集气孔结构的粗糙度大于正面

凹凸不平的表面结构的粗糙度，正面可能含有更多极性物质，这些物质有助于增加液滴在正面的润湿

性，导致正面表面自由能较高。

表5 辣椒叶正面和反面的表面自由能及其分量

Table 5 Surface free energy and its component of the adaxial surface and the abaxial surface of pepper leaves mJ/m ²				
叶面	检测液体	表面自由能	色散分量(所占比例)	极性分量(所占比例)
正面	W-EG	38.70	5.03(13%)	33.67(87%)
	W-DMF	36.06	8.17(23%)	27.89(77%)
	W-F	45.38	1.46(3%)	43.92(97%)
	F-DMF	27.06	11.35(42%)	15.71(58%)
	EG-DMF	31.84	9.52(30%)	22.32(70%)
	W-EG	26.98	20.50(76%)	6.48(24%)
	W-DMF	23.31	8.61(37%)	14.70(63%)
	W-F	25.60	3.52(14%)	22.08(86%)
	F-DMF	19.58	10.65(54%)	8.93(46%)
	EG-DMF	32.52	5.85(18%)	26.67(82%)

注：“W-EG”表示检测液水(W)和乙二醇(EG)的组合，结合式(2)与式(3)计算得到叶面表面自由能及分量；其余以此类推。

由表5还可知，辣椒叶正反面表面自由能为19.58~45.38 mJ/m²，辣椒叶正面的表面自由能极性分量占比均高于色散分量占比，在检测液体为W-EG和F-DMF时，叶片反面的表面自由能色散分量占比均高于极性分量占比，其余组极性分量占比高于色散分量占比，表明辣椒叶适合施用以极性分量为主的药剂。

2.3.4 水稻叶表面自由能及其分量

由表6可知，水稻叶正面的表面自由能为2.44~3.94 mJ/m²，其中W-EG组表面自由能最大，为3.94 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为0.30 mJ/m²和3.64 mJ/m²；F-DMF组最小，为2.44 mJ/m²，其极

性分量和色散分量分别为0.61 mJ/m²和1.83 mJ/m²。水稻叶反面的表面自由能为5.21~12.99 mJ/m²，其中，F-DMF组表面自由能最大，为12.99 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为8.83 mJ/m²和4.16 mJ/m²；W-EG组最小，为5.21 mJ/m²，其极性分量和色散分量分别为1.98 mJ/m²和3.23 mJ/m²。水稻叶反面各组的表面自由能均大于正面的，结合图4，推测其原因是水稻叶正面的钩毛和纤细毛导致液滴无法完全润湿其表面。由于水稻叶表面的疏水性较强，建议在喷雾剂中加入表面活性剂，以降低药液的表面张力，增强液滴的润湿性。

表6 水稻叶正面和反面的表面自由能及其分量

Table 6 Surface free energy and its component of the adaxial surface and the abaxial surface of rice leaves mJ/m ²				
叶面	检测液体	表面自由能	色散分量(所占比例)	极性分量(所占比例)
正面	W-EG	3.94	3.64(92%)	0.30(8%)
	W-DMF	2.72	1.51(56%)	1.21(44%)
	W-F	2.71	0.70(26%)	2.01(74%)
	F-DMF	2.44	1.83(75%)	0.61(25%)
	EG-DMF	3.78	1.02(27%)	2.76(73%)
	W-EG	5.21	3.23(62%)	1.98(38%)
	W-DMF	9.32	9.16(98%)	0.16(2%)
	W-F	5.61	0.62(11%)	4.99(89%)
	F-DMF	12.99	4.16(32%)	8.83(68%)
	EG-DMF	6.30	5.92(94%)	0.38(6%)

注：“W-EG”表示检测液水(W)和乙二醇(EG)的组合，结合式(2)与式(3)计算得到叶面表面自由能及分量；其余以此类推。

由表6还可知，水稻叶正反面表面自由能为2.44~12.99 mJ/m²，水稻叶正面W-F、EG-DMF组的表面自由能极性分量均高于色散分量；在检测液体为W-F和F-DMF时，2组叶片反面的表面自由能的极

性分量均高于色散分量，表明水稻叶片的表面自由能分量呈现各异性。

综上可知，4种植物叶片按最大表面自由能从大到小顺序排列依次为梨叶反面、辣椒正面、梨叶正面、

桃叶正面、桃叶反面、辣椒反面、水稻反面、水稻正面。具体来说,梨叶的最大表面自由能分别为 38.59 mJ/m^2 (正面)和 48.51 mJ/m^2 (反面),而水稻叶的最大表面自由能则较低,分别为 3.94 mJ/m^2 (正面)和 12.99 mJ/m^2 (反面)。这些数据表明,不同植物以及同一植物的正反面叶片的表面自由能存在显著差异。梨、辣椒、桃这些植物的叶片表面自由能较高,主要由色散力和极性力共同作用。这些植物叶片表面微结构的间距较大,雾滴容易穿透间隙并形成Wenzel状态,表现为亲水特性,液滴能够较好地润湿表面并均匀铺展。水稻叶的表面自由能较低,表现为疏水性强。这是因为水稻叶表面更加粗糙,表面微结构更加复杂,有较长的钩毛和纤细毛,增加了其表面的粗糙度,这种复杂的结构和粗糙度对流体运动特性产生重要影响,促使液滴在水稻叶片处于Cassie状态,从而形成水稻的超疏水性,导致其表面不容易被水基药液润湿,液滴更容易聚集成珠状并滚落。

通过比较不同植物的表面自由能,发现梨叶和桃叶的正反面叶片中色散分量占主导地位,表明它们的表面性质在色散力的作用下表现出较强的润湿性;而辣椒叶和水稻叶则表现出更复杂的表面自由能组成,其表面自由能的分量主导特性取决于检测液的组成和叶片的化学成分。

以上结果表明靶标植物叶片的表面自由能及其分量因植物而异,即使是同一植物叶片,其正反面自由能也存在差异。

3 讨论

为防治植株病虫害,喷雾是最常用的施药手段。植物叶片的表面特性在农药施用过程中起着至关重要的作用,特别是在药液液滴的润湿性、黏附性和渗透性等方面^[32–34]。叶片表面覆盖的蜡质层、绒毛结构、化学成分以及表面形态等因素,都会直接影响农药液滴的行为^[35]。叶片在正反面都会发生病虫害,所以叶片正反两面的润湿性对施药效果有直接的影响。

本文通过分析植物叶片表面结构及润湿性能,探讨叶片表面特性对农药雾滴黏附性的影响。结果表明,水稻叶表面的接触角明显比其他3种植物叶面的高,且不同种检测液在梨、桃、辣椒3种叶片反面的接触角测量值都高于正面的,而水稻叶片反

面的接触角测量值却低于正面的,这可能是由植物叶面化学组成成分和表面微观结构不同所致。辣椒叶片的反面虽然有大量的微孔,但表面自由能中极性分量占比很高,去离子水作为高极性的液体,其在辣椒叶面的亲和力更强,导致接触角变小。表面自由能计算结果表明,同种植物的叶片正反面表面自由能均有差异,其中,梨叶、桃叶中色散分量占主导。范仁俊等^[17]用OWRK法测得的不同生长时期的桃叶表面自由能则以极性分量为主,本研究所选成熟期新鲜桃叶的结果与其相反,可能是不同品种的桃叶的化学组成或生长时期不同所致。徐广春等^[36]选用苏紫1号、GR甜椒、苏椒13这3种辣椒叶片,分别用水(W)、丙三醇(G)、二碘甲烷(DM)这3种检测液进行测量,发现辣椒叶的色散分量占比均高于极性分量占比。与文献[36]的结果不同,本研究中,仅辣椒叶反面W-EG和F-DMF组合的色散分量占比高于极性分量的,其余组极性分量占比均高于色散分量占比,推测与选用的辣椒品种及检测液极性不同相关。ZHU等^[37]发现水稻叶面的自由能以色散分量为主。因此,在防治病虫害的过程中,应选用与其表面自由能、极性成分相近的药剂,以利于叶面药液的润湿与铺展。

4 结论

本研究结果表明:梨叶、桃叶、辣椒叶为亲水叶片,水稻叶为疏水叶片;梨、桃、辣椒的正面接触角均小于反面的,而水稻叶则与之相反;在同组检测液下,桃叶正面表面自由能大于反面的,而水稻叶反面的自由能均大于正面的;梨叶、桃叶、水稻叶的表面自由能以色散分量为主,适合喷施非极性药剂以增加雾滴的黏附性和润湿性;辣椒叶以极性分量为主,适合喷施极性药剂。

参考文献:

- [1] 黄政,张涛,孔万仔,等.基于YOLOv8n的梨树叶片病害检测模型[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2025, 51(2): 113–121.
- [2] 张永强,王飞钊,谢锦钿,等.不同植保器械在水稻不同生育期喷施农药的沉积率及雾滴参数[J].农药学报,2022, 24(2): 376–384.
- [3] 宋玉莹,曹冲,徐博,等.农药雾滴在植物叶面的弹跳行为及调控技术研究进展[J].农药学报,2019, 21(S1): 895–907.
- [4] 王士林,陆岱鹏,Jonathan VANBEEK,等.用于农药

- 喷施的液力式喷头雾化与沉积分布特性分析[J]. 农药学学报, 2024, 26(1): 168–178.
- [5] 孙乐鑫, 陈兵, 赵静, 等. 无人机施药技术在农业生产中的应用研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 31–42.
- [6] 李园园, 蔡润泽, 徐博, 等. 农药的靶向传输与剂量效应研究进展[J]. 现代农药, 2024, 23(5): 24–31.
- [7] TAYLOR P. The wetting of leaf surfaces[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2011, 16(4): 326–334.
- [8] NEINHUIS C, BARTHLOTT W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces[J]. Annals of Botany, 1997, 79(6): 667–677.
- [9] BREWER C A, NUÑEZ C I. Patterns of leaf wettability along an extreme moisture gradient in western Patagonia, Argentina[J]. International Journal of Plant Sciences, 2007, 168(5): 555–562.
- [10] CHIOU C H, HSIEH S J. Empirical study and prediction of contact angle and surface free energy of commonly used plastics with pillar-like structure[J]. Surface and Interface Analysis, 2015, 47(1): 45–55.
- [11] LIN H, ZHOU H P, XU L Y, et al. Effect of surfactant concentration on the spreading properties of pesticide droplets on Eucalyptus leaves[J]. Biosystems Engineering, 2016, 143: 42–49.
- [12] 王志玲, 王正, 阎昊鹏. 麦秆表面自由能及其分量研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2007(3): 207–210.
- [13] YU Y, ZHU H, FRANTZ J M, et al. Evaporation and coverage area of pesticide droplets on hairy and waxy leaves[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(3): 324–334.
- [14] 王会霞, 石辉, 玉亚, 等. 植物叶面自由能特征和水滴形态对截留降水的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 249–252, 259.
- [15] MORAN PUENTE D W, BAUR P. Wettability of soybean(*Glycine max* L.) leaves by foliar sprays with respect to developmental changes[J]. Pest Management Science, 2011, 67(7): 798–806.
- [16] 郭瑞峰, 张鹏九, 刘中芳, 等. 基于苹果叶片表面自由能的吡虫啉田间减量化研究[J]. 中国果树, 2020(1): 64–67, 91.
- [17] 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]. 农药学学报, 2011, 13(1): 79–83.
- [18] 林翰宸, 魏巍, 宁立可, 等. 农药液滴在植物叶片表面润湿性研究与展望[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2025, 38(1): 51–59.
- [19] 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.
- [20] 孙艳红, 杨晓东, 杨卓娟, 等. 典型状态下荷叶润湿性差异及其机理分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 263–267.
- [21] LEE S G, LIM H S, LEE D Y, et al. Tunable anisotropic wettability of rice leaf-like wavy surfaces[J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(5): 547–553.
- [22] PANDEY S, NAGAR P K. Patterns of leaf surface wetness in some important medicinal and aromatic plants of Western Himalaya[J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2003, 198(5): 349–357.
- [23] ZHU H, GUO Z G. Wetting characterizations of oilseed rapes[J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(2): 213–219.
- [24] 王潇楠, 刘艳萍, 王思威, 等. 助剂对10%苯醚甲环唑水分散粒剂在荔枝叶片表面润湿性能的影响[J]. 农药学学报, 2018, 20(6): 803–808.
- [25] WU S H. Calculation of interfacial tension in polymer systems[J]. Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia, 1971, 34(1): 19–30.
- [26] OWENS D K, WENDT R C. Estimation of the surface free energy of polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1969, 13(8): 1741–1747.
- [27] 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(6): 927–941.
- [28] 朱定一, 戴品强, 罗晓斌, 等. 润湿性表征体系及液固界面张力计算的新方法(I)[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(13): 3057–3062.
- [29] 吴剑坚. 植保无人机喷施雾滴沉积分布规律及评价方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [30] 张文绪, 赵云云. 水稻叶鞘表面的扫描电镜观察[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(3): 59–63.
- [31] 冯泽腾, 王浩兵, 王国强, 等. 几种植物叶片表面自由能的测定[J]. 世界农药, 2024, 46(12): 44–49.
- [32] KOLYVA F, STRATAKIS E, RHIZOPOULOU S, et al. Leaf surface characteristics and wetting in *Ceratonia siliqua* L.[J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2012, 207(8): 551–556.
- [33] ZHENG Q S, LÜ C J. Size effects of surface roughness to superhydrophobicity[J]. Procedia IUTAM, 2014, 10: 462–475.
- [34] 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.
- [35] 石辉, 王会霞, 李秧秧. 植物叶表面的润湿性及其生态学意义[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4287–4298.
- [36] 徐广春, 顾中言, 徐德进, 等. 辣椒叶片表观表面自由能的计算方法[J]. 中国农业科学, 2018, 51(16): 3084–3094.
- [37] ZHU Y Q, YU C X, LI Y, et al. Research on the changes in wettability of rice(*Oryza sativa*) leaf surfaces at different development stages using the OWRK method[J]. Pest Management Science, 2014, 70(3): 462–469.

责任编辑: 伍锦花

英文编辑: 张承平