

不同喷雾助剂在植保无人机喷施作业中对雾滴沉积特性的影响

兰玉彬^{1,2}, 单常峰¹, 王庆雨¹, 刘琪¹, 杨承磊¹, 谢英杰¹, 王国宾^{1*}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院/山东理工大学生态无人农场研究院/国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心山东理工大学分中心, 淄博 255022; 2. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642)

摘要: 为研究不同喷雾助剂的理化性质及喷雾助剂在玉米叶片上的沉积特性, 该研究将6种喷雾助剂对药液表面张力、药液在玉米叶片上接触角以及无人机喷施6种不同的喷雾助剂对雾滴的沉积特性进行对比。结果表明: 喷雾助剂可以显著降低($P=0.000$)溶液的表面张力, 与清水溶液的表面张力相比 Starguard4A 喷雾助剂对降低溶液表面张力的作用效果最好, 降低了67.8%。喷雾助剂对溶液在玉米叶片上接触角的变化程度影响不同, 随着时间的增加雾滴在玉米叶片上的接触角均逐渐降低, 其中 Ultimate 喷雾助剂的雾滴在滴落到玉米叶片上90 s后接触角降低至0°。与清水溶液相比倍达通喷雾助剂的雾滴密度、覆盖率与沉积量作用效果最好, 雾滴密度与覆盖率、沉积量分别提高了35.1%、93.8%、31.9%; 添加喷雾助剂后除倍达通喷雾助剂外, 其他喷雾助剂溶液的雾滴体积中径 $D_{v0.5}$ 均有所降低; 添加喷雾助剂对雾滴谱宽的影响不明显。在田间进行无人机植保喷施作业时, 可以优选使用倍达通喷雾助剂, 虽然倍达通喷雾助剂的表面张力与接触角并不是最优, 但是也能够满足田间使用植保无人机喷雾作业的要求。同时, 该试验也为进一步提高农药的利用率提供数据参考。

关键词: 无人机; 喷雾助剂; 雾滴密度; 覆盖率; 沉积量; 表面张力; 接触角

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.005

中图分类号: S491

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-16-0031-08

兰玉彬, 单常峰, 王庆雨, 等. 不同喷雾助剂在植保无人机喷施作业中对雾滴沉积特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 31-38. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.005 http://www.tcsae.org

Lan Yubin, Shan Changfeng, Wang Qingyu, et al. Effects of different spray additives on droplet deposition characteristics during plant protection UAV spraying operations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 31-38. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.005 http://www.tcsae.org

0 引言

中国农药的施用量居世界的前列, 据统计, 单位面积农药的施用量约为世界平均水平的2.5倍, 受污染的耕地面积约占可耕种面积的1/10^[1-2]。传统的施药方式不仅造成了农药的大量浪费, 还严重污染了生态环境^[3]。农药对环境的污染已经成为人们关注的焦点。2015年, 农业农村部开展了化肥农药使用零增长计划, 截止到2020年底国内化肥农药的使用量明显降低。相比2015年农药利用率提高了4个百分点, 达到40.6%^[4]。2021年1月, 农业农村部再次发文称, 力争到2025年农药的利用率再提高3个百分点^[4]。

随着植保无人机技术的快速发展, 植保无人机技术改变了传统“粗放式”的喷洒方式, 但是还存在着农药利用率低、雾滴易飘移等问题^[5-7], 喷雾时添加喷雾助剂是改善目前所存在问题的主要途径之一。喷雾助剂也是

影响药液理化性质的主要因素, 其一般能够降低药液的表面张力、提高润湿渗透性、优化雾滴分布的均匀性、降低雾滴在作物表面上的接触角、增加药液在作物上的沉积量, 进而提高农药的利用率^[8-10]。在作物病虫害的防治中, 部分药剂不能达到理想的防治效果, 通常会使用喷雾助剂提高药液在作物表面上的沉积特性来提高防效^[11]。

目前, 国外航空喷雾助剂的研究主要以大飞机为主, 并且主要以雾滴的飘移为研究对象^[12]。Lan等^[13]使用固定翼大飞机研究了抗飘移喷雾助剂对雾滴沉积特性的影响, 并筛选出抗飘移性能较好的喷雾助剂。Guler等^[14]在风洞中进行了喷雾助剂对抗飘移性能的试验, 结果表明喷雾助剂对雾滴的飘移具有抑制作用。国内航空喷雾助剂的研究主要以大容量喷洒与室内试验为主^[15-17]。袁会珠等^[15]使用地面喷雾机械在桃树上进行了喷雾助剂的沉积试验, 结果表明添加喷雾不仅可以降低药液的流失率还可以提高雾滴沉积的均匀性。张瑞瑞等^[16]研究了喷雾助剂类型及浓度对喷头雾化效果的影响, 结果表明助剂类型及助剂浓度均可对雾滴粒径产生显著的影响。

国内外学者研究了喷雾助剂对药液理化性质、雾滴沉积特性的影响, 但他们的研究很少使用植保无人机对此进行研究。由于植保无人机具有高浓度、低容量喷雾的特点, 药液理化性质与雾滴沉积特性对提高农药利用率至关重要。同时, 不同的喷雾助剂对药液理化性质与雾滴沉积特性的影响各有差异。因此, 本文研究了6种

收稿日期: 2021-03-10 修订日期: 2021-06-29

基金项目: 山东省引进顶尖人才“一事一议”专项经费资助项目(2018.01-2021.12); 生态无人农场研究院项目(2019ZBXC200)

作者简介: 兰玉彬, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为精准农业航空。

Email: ylan@sdu.edu.cn.

*通信作者: 王国宾, 博士, 讲师, 研究方向为农业航空喷施技术。

Email: guobinwang@sdu.edu.cn

中国农业工程学会高级会员: 兰玉彬(E041200725S)

不同的航空喷雾助剂对溶液的表面张力、接触角、雾滴密度、雾滴覆盖率、沉积量等的影响, 以期为田间使用植保无人机对喷雾助剂的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次喷雾作业使用广州极飞科技有限公司的 XP2020 植保无人机, 植保无人机具体参数如表 1 所示。植保无人机的喷雾系统由 4 个蠕动泵、药箱、流量计、喷头组成, 蠕动泵分别以 0~0.675 L/min 的流量向 4 个离心雾化喷嘴提供药液。无人机上安装有 20 L 快速拔插的药箱。在每个转子的下方装有垂直向下的离心雾化喷头, 在不同的电压下, 喷嘴的转速可以在 0~16 000 r/min 之间变化^[18]。在田间测试作业时, 使用 XP2020 植保无人机的“极飞农业” APP 可对植保无人机的喷幅宽度、雾滴粒径及喷液量等参数进行设定。该植保无人机具有自主飞行的功能, 采用实时动态 (Real-Time Kinematic, RTK) 差分定位技术, 可实现厘米级的定位^[18]。喷雾设备如图 1 所示。

表 1 极飞 XP2020 植保无人机主要参数		
Table 1 Main parameters of XAG XP2020 plant protection UAV		
主要参数 Main parameter	数值或类型 Values or type	
外形尺寸 Dimensions/mm×mm×mm	2 195×2 210×552	
药箱容量 Tank capacity/L	20	
飞行速度 Flight speed/(m·s ⁻¹)	5.0	
飞行高度 Flight height/m	2.0	
喷幅宽度 Spraying width/m	4	
喷头个数 Nozzle number	4	
喷头类型 Nozzle type	离心式喷头	

表 2 不同喷雾助剂的特点			
Table 2 The characteristics of different spray additives			
助剂 Additives	类型 Type	特点 Characteristic	生产厂家 Manufacturer
Ultimate	水基+表面活性剂	抗飘移、除草剂 (尤其草甘膦) 增效	比利时 Solvay 公司
Starguar4A	瓜尔胶+甲酯油+乳化体系	抗飘移、抗蒸发、增加叶面上的黏附、抗弹跳	比利时 Solvay 公司
Starguar4	瓜尔胶+甲酯油+乳化体系	抗飘移、抗蒸发、增加叶面上的黏附、抗弹跳	比利时 Solvay 公司
迈飞 Mai Fei	改性植物油+乳化体系	增加雾滴在叶面上的润湿、铺展	北京广源益农有限公司
倍达通 Bei Datong	改性植物油+乳化体系	抗蒸发、抗飘移、增加雾滴在叶面上的润湿、铺展	河北明顺农业有限公司
Atplus Mso-Hs 500	改性植物油	抗蒸发、抗飘移	英国禾大农化助剂

1.2.2 表面张力的测定

使用表面张力测定仪测定不同助剂溶液的表面张力时, 先使用纯水对仪器进行标定, 使其在正常的测量范围之内。再取配置好的助剂溶液 30 mL 加入待测容器中, 通过操作表面张力测定仪对助剂溶液的表面张力进行测定。每组助剂溶液重复测定 3 次。

1.2.3 接触角的测定

试验时, 取三叶一芯期品种为红太阳 3 号的新鲜玉米叶片平整固定在接触角测量仪载物台上, 通过调整摄像机的焦距与卤素灯的亮度, 使液滴图像清楚呈现在电脑屏幕上。为了保证液滴大小一致, 每次试验自动移液枪的注射体积为 5 μL。设置拍摄时间为 10 s 一帧, 分别

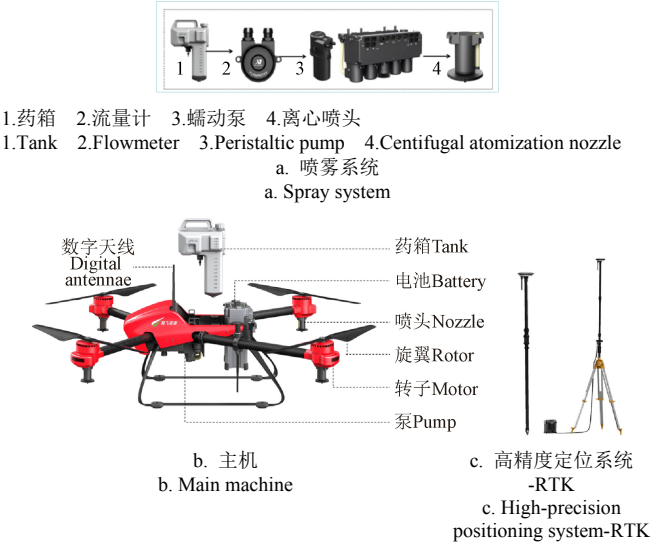


图 1 极飞 XP2020 植保无人机
Fig.1 XAG XP2020 plant protection UAV

试验材料还包括山东本创仪器有限公司的 BCZ-600 型全自动界面张力测定仪、上海棱光科技有限公司的 723S 可见分光光度计、东莞市普赛特检测设备有限公司的 CAPST-2000At 全自动水滴角测试仪、美国 Kestrel 5500 气象仪以及 Ultimate、Starguar4A、Starguar4、倍达通、迈飞、Atplus Mso-Hs 500 喷雾助剂。不同喷雾助剂的特点如表 2 所示。

1.2 试验方法

1.2.1 助剂溶液配制

试验前, 为测定表面张力与接触角, 将 Ultimate、Starguar4A、Starguar4、倍达通、迈飞、Atplus Mso-Hs 500 喷雾助剂配置成体积浓度为 1%的水溶液各 50 mL。

测试雾滴滴落到玉米叶片上 0~120 s 的接触角, 每间隔 10 s 测试一次 (当液滴滴到玉米叶片的瞬间点击开始测量按钮, 记此时的测试时间为 0)。

1.2.4 田间喷雾试验

试验地点位于山东省淄博市临淄区 (E118°12'50"; N36°57'47") 山东理工大学生态无人农场基地。试验田种植的作物为玉米, 玉米的株高、行距、种植密度分别为 (30 ± 3) cm、(40 ± 4) cm、(4.5 × 10⁴ ± 1 000) 株/hm², 玉米的生长期为三叶一芯期, 叶面积指数约为 0.4。试验时的气象条件如表 3 所示。试验时设定 XP2020 植保无人机的飞行速度为 5.0 m/s, 飞行高度 2.0 m, 喷幅宽度 4.0 m, 雾滴体积中径 135 μm, 喷液量 22.5 L/hm²。田间

喷雾试验所用的助剂溶液为体积浓度 1%的水溶液，诱惑红染色剂浓度为 5 g/L。预试验以及其他学者的研究表明，诱惑红的加入不会改变溶液的表面张力以及接触角的大小^[19]。

表 3 试验时各助剂处理的气象参数
Table 3 Meteorological parameter of each treatment with adding additives

助剂处理 Additives treatment	温度 Temperature/℃	湿度 Humidity/%	风速 Wind speed/(m·s ⁻¹)
清水 Pure water	34.6~35.2	58.1~60.2	0.3~0.5
Ultimate	35.1~35.3	58.2~59.8	0.4~0.6
Starguar4A	35.0~35.6	57.9~58.6	0.6~1.1
Starguar4	35.3~36.1	54.8~58.4	0.0~0.0
倍达通 Bei Datong	35.3~35.7	56.7~57.3	0.4~0.5
迈飞 Mai Fei	34.7~34.9	66.3~67.4	0.0~0.0
Atplus Mso-Hs 500	34.2~34.4	65.8~66.0	0.0~0.0

1.2.5 采样点布置

喷雾开始前，在距植保无人机起飞处前 30、50、70 m 处设 3 条平行雾滴采样线，植保无人机航线垂直于采样线并居中^[20]。根据植保无人机的作业喷幅设置采样点，每条采样线上布置 19 个采样点，每个采样点间隔 1 m，总长度为 18 m，在每个采样点处放置一个采样架，将铜版纸卡（35 mm× 80 mm）和麦拉卡（50 mm×80 mm）分别通过双头夹布置在玉米的冠层上，与玉米的叶芯高度一致。采样点布置如图 2 所示，试验装置实物与现场如图 3 所示。试验中以植保无人机的喷幅宽度定义沉积区（8~12 采样点），采样区中除去沉积区的部分定义为非沉积区。

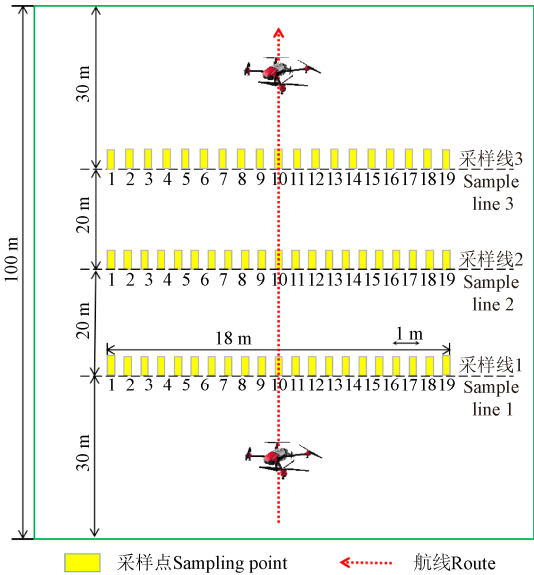


图 2 采样点布置
Fig.2 Sampling point arrangement

1.2.6 沉积测定

每次试验完成后，收集采样点上的铜版纸卡放置在密封袋中，铜版纸卡带回实验室使用扫描仪在 600 dpi 灰度下进行扫描，并使用 DepositScan 软件分析雾滴的覆盖率、密度及雾滴粒径等参数^[3,21]。

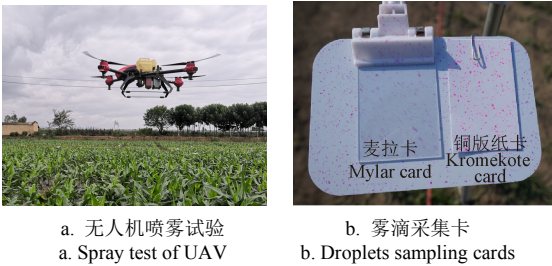


图 3 试验装置现场
Fig.3 Test set-up site

测定麦拉卡上雾滴的沉积量时先使用 723S 可见分光光度计进行浓度-吸光度的标定。通过线性拟合获得诱惑红浓度与吸光值之间的线性回归方程 $A_s = 0.250\ 13C_e + 0.014\ 8$ ($R^2=0.998\ 6$)， C_e 为诱惑红浓度， A_s 为测定溶液的吸光值。

试验前，向药液中加入诱惑红作为喷雾染色剂以代替药剂测定喷雾雾滴的沉积量^[22]。试验结束后，收集各采样点处的麦拉卡放入自封袋中带回试验室进行处理。洗脱时，向每个自封袋中加入 5 mL 的纯水，震荡 5 min，然后取洗脱液 3 mL 使用 723S 可见分光光度计测定其吸光值，根据拟合的回归曲线测定其浓度。最后，根据公式（1）计算单位面积的雾滴沉积量。

$$\beta = C_e \times V / S \tag{1}$$

式中 β 为单位面积的雾滴沉积量， $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ； V 为加入洗脱液的体积，mL； S 为雾滴收集器麦拉卡的面积， cm^2 。

1.2.7 雾化效果的测定

试验中雾滴粒径的大小以及 $D_{V0.1}$ 、 $D_{V0.5}$ 、 $D_{V0.9}$ 是使用 DepositScan 软件进行测定。 $D_{V0.1}$ 是指等于或小于该雾滴粒径的体积之和占总体积的 10%； $D_{V0.5}$ 是指等于或小于该雾滴粒径的体积之和占总体积的 50%，又被称为雾滴体积中径（ $D_{V0.5}$ ）； $D_{V0.9}$ 是指等于或小于该雾滴粒径的体积之和占总体积的 90%。雾滴粒径的均匀性也是描述雾化性能的重要指标，根据美国农业与生物工程学会（ASABE）和美国国家标准局（ANSI）572.1 标准，通常使用雾滴谱宽来评价，雾滴谱宽是衡量雾滴粒径分布宽度的指标之一，简称 RS（Relative Span）。RS 越小，雾滴粒径越均匀，极限值为 0，其定义如下^[23]：

$$RS = \frac{D_{V0.9} - D_{V0.1}}{D_{V0.5}} \tag{2}$$

1.2.8 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析。喷雾助剂对药液表面张力、雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 、雾滴谱宽的影响采用单变量方差分析在显著性水平 95%的条件下检验差异显著性。

2 试验结果与分析

2.1 助剂溶液对表面张力的影响

添加喷雾助剂可以降低溶液的表面张力（如表 4）。与清水溶液相比，添加喷雾助剂后溶液的表面张力值降低了 56.4%~67.8%，且具有极显著性差异（ $P=0.000$ ）。Ultimate 助剂与 Starguar4A 助剂之间的表面张力不存在

显著性差异($P=0.338$), 这表明不同助剂对溶液表面张力的改变程度不同。

表面张力越小收缩力越小, 雾滴越容易在作物的表面润湿铺展。在植保无人机喷施作业中, 润湿铺展对雾滴的沉积行为至关重要。通过表面张力测定的试验结果可以得出, 在进行田间作业时, 为了提高药液在玉米叶片上的润湿铺展可以优先使用 Ultimate 与 Starguar4A 喷雾助剂。

表 4 不同助剂溶液的表面张力

Table 4 Surface tension of different treatment additive solutions

助剂溶液 Additive solutions	表面张力 Surface tension/(mN.m ⁻¹)
清水 Pure water	71.8±0.20 a
Ultimat	23.2±0.21 f
Starguar4A	23.0±0.06 f
Starguar4	28.8±0.12 e
倍达通 Bei Datong	29.6±0.15 d
迈飞 Mai Fei	30.9±0.06 c
Atplus Mso-Hs 500	31.3±0.25 b

注: 表中的数字为平均值±标准误差, 不同小写字母表示助剂溶液的表面张力存在显著性差异。

Note: The numbers in the table is the mean ± standard error, and different lowercase letters represent significant differences for the surface tension of the additive solution.

2.2 助剂溶液在玉米叶片上接触角的变化

表 5 为不同助剂溶液在玉米叶片上不同时刻接触角的测量值。添加喷雾助剂后, 随着时间的增加助剂溶液在玉米叶片上的接触角均逐渐降低。清水溶液在玉米叶片上的接触角有所波动, 这表明雾滴刚接触到玉米叶片时, 由于雾滴和固体界面之间还未达到平衡状态, 雾滴接触角在一定时间内的变化与时间成负相关^[11]。在所有的测试助剂中, 0 s 时 Ultimate、Starguar4、倍达通、Atplus Mso-Hs 500 助剂溶液的接触角均低于 90°, 表明溶液达到了亲水状态, 具有较好的润湿性。而 Starguar4A 与迈飞助剂的接触角均大于 90°, 表明药液在玉米叶片上还处于疏水状态。90 s 时 Ultimate 助剂溶液的接触角变为 0°, 其变化率为 100% 优于其他助剂溶液在玉米叶片上的接触角, 这表明 Ultimate 助剂溶液 90 s 时在玉米叶片上完全润湿铺展。

喷雾助剂通过影响表面张力进而影响接触角。一般来说, 同一种作物叶片表面的接触角会随着表面张力的降低而降低^[11]。接触角越小表明雾滴越容易在作物表面上润湿铺展。表 5 的试验结果表明, Ultimate 喷雾助剂具有较优的润湿铺展性。在田间进行喷雾作业时, 可以优先使用 Ultimate 喷雾助剂。

2.3 助剂溶液对雾滴沉积特性的影响

2.3.1 助剂溶液对雾滴密度、覆盖率的影响

不同处理对雾滴密度、覆盖率的影响见表 6。在采样区内, 不同处理雾滴密度、覆盖率的变化范围分别为 8.5~12.1 个/cm² 与 0.7%~1.17%。与清水溶液相比, 添加喷雾助剂后, 雾滴密度、覆盖率均有所增加, 这表明添加喷雾助剂后雾滴的中值粒径有所增加, 降低了雾滴的蒸发与飘移, 其中倍达通喷雾助剂对雾滴密度、覆盖率的增加最为显著, 这表明倍达通喷雾助剂抑制雾滴的蒸发与

飘移作用最强。在沉积区内雾滴密度的变化范围为 21.1~28.5 个/cm², 达到国家民航标准中飞机在农林作物中进行喷洒作业时 15 个/cm² 的雾滴密度要求^[24]。与清水溶液相比, 倍达通喷雾助剂在沉积区雾滴密度 (28.5 个/cm²) 增加了 35.1%, 考虑到往返作业时雾滴的叠加, 此雾滴密度可以有效防治农田常见病虫害。在沉积区内雾滴覆盖率的变化范围为 1.6%~3.1%。与清水溶液相比, 倍达通喷雾助剂在沉积区雾滴覆盖率 (3.1%) 增加了 93.8%。

表 5 不同助剂溶液在玉米叶片上不同时刻接触角测量值

Table 5 Contact angle measurement values of different additive solutions on maize leaves at different times (°)

时间 Time/s	清水 Pure water	Ultimate	Starguar4A	Starguar4	倍达通 Bei Datong	迈飞 Mai Fei	Atplus Mso-Hs 500
0	110.77	73.71	94.67	89.10	85.4	95.82	83.93
10	111.27	37.24	65.43	74.43	74.23	83.13	75.23
20	109.25	28.80	56.90	69.41	68.74	77.51	68.84
30	109.25	21.93	46.72	66.70	65.95	73.75	68.34
40	109.25	17.62	43.70	61.63	63.14	72.04	63.24
50	108.68	14.01	40.05	59.10	61.56	71.53	63.85
60	108.68	10.13	36.30	55.23	57.98	68.55	60.18
70	108.63	5.85	36.13	51.80	52.55	70.64	59.75
80	108.63	5.34	34.14	47.91	52.17	68.29	55.94
90	108.53	0.00	32.12	45.43	45.01	64.54	55.70
100	108.42	0.00	30.92	44.64	39.84	61.60	54.16
110	108.31	0.00	30.20	41.12	33.19	59.67	51.94
120	108.10	0.00	28.55	36.13	29.84	58.66	50.94

表 6 添加喷雾助剂对采样区及沉积区雾滴密度和覆盖率的影响

Table 6 Effects of adding spray additives on density and coverage of droplets in sampling area and deposition area

助剂溶液 Additive solutions	雾滴密度平均值 Average droplet density / (个·cm ⁻²)		雾滴覆盖率平均值 Average droplet coverage/%	
	采样区 Sampling area	沉积区 Deposition area	采样区 Sampling area	沉积区 Deposition area
清水 Pure water	8.5±1.6	21.1±4.3	0.70±0.1	1.6±0.1
Ultimate	10.0±0.9	22.7±5.2	0.72±0.1	1.7±0.1
Starguar4A	9.8±0.7	24.9±4.3	0.74±0.1	1.8±0.2
Starguar4	10.6±2.3	25.0±3.4	0.79±0.2	2.2±0.1
倍达通 Bei Datong	12.1±1.1	28.5±5.1	1.17±0.2	3.1±0.2
迈飞 Mai Fei	9.4±0.9	21.7±2.8	0.77±0.0	1.9±0.1
Atplus Mso-Hs 500	11.3±2.9	27.5±3.2	0.89±0.2	2.4±0.2

注: 表中采样区与沉积区的平均值是将 3 条采样带上对应区域采样点上的雾滴密度与覆盖率分别求平均值。

Note: The average value of the sampling area and the deposition area in the table is the average of the droplet density and coverage rate on the sampling points of the corresponding areas on the three sampling belts.

在田间使用植保无人机进行喷施作业时, 不同药剂类型对雾滴密度及覆盖率的要求有所不同。对于触杀性药剂提高覆盖率可以增加防效。因此, 在田间进行触杀性药剂喷施时, 建议使用倍达通喷雾助剂提高覆盖率来增加防效。

2.3.2 助剂溶液对雾滴沉积量的影响

不同喷雾助剂溶液的沉积量如图 4 所示。从图 4 可以看出, 添加喷雾助剂后非沉积区雾滴沉积量的变化范围为 0.011~0.019 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$, 其中迈飞喷雾助剂的沉积量最小, 这可能与试验时的风速 (0 m/s) 以及助剂溶液的抗飘移性有关。Wang 等^[18]的研究表明, 环境风速为 0 的情

况下，旋翼风场也会影响雾滴的飘移。而 Starguar4、Atplus Mso-Hs 500 喷雾助剂试验风速也为 0 m/s，但 Starguar4、Atplus Mso-Hs 500 喷雾助剂的沉积量高于迈飞喷雾助剂的沉积量，这是因为，与 Starguar4、Atplus Mso-Hs 500 喷雾助剂相比，迈飞喷雾助剂具有较好的抗飘移性能。沉积区雾滴沉积量的变化范围为 0.049~0.072 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，与清水溶液相比均有所增加，其中倍达通喷雾助剂的沉积量最大，达 0.072 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，这一结果也与雾滴密度、覆盖率的结果相同，这与助剂溶液的抗蒸发性能有关，也进一步表明倍达通喷雾助剂具有较好的抗蒸发性能。在喷雾过程中，雾滴的沉积量不仅会受到表面张力与接触角的影响，还会受到雾滴的飘移与蒸发等因素的影响。结合表 4 与表 5 可知，Ultimate 喷雾助剂的表面张力与接触角均优于倍达通喷雾助剂，但是沉积区倍达通喷雾助剂的沉积量最大，这是因为助剂溶液的表面张力与接触角不是影响雾滴沉积量的主要因素，而是助剂溶液的抗蒸发与抗飘移性能。

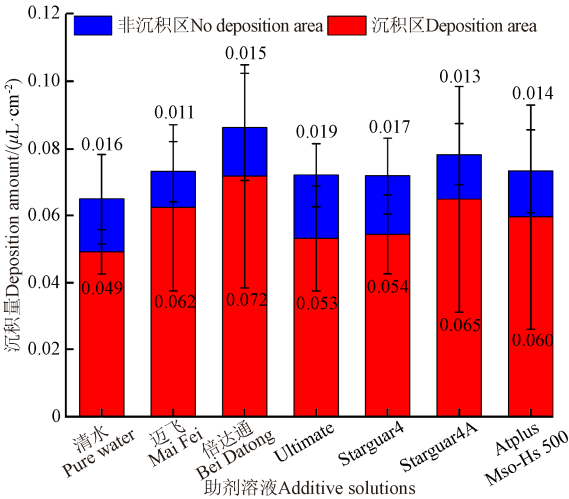


图 4 不同助剂溶液的沉积量

Fig.4 Amount of deposition of different additive solutions

2.3.3 助剂溶液对雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 的影响

不同助剂溶液对雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 的影响如表 7 所示。从表 7 可知，不同助剂溶液雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 的变化范围为 227.3~300.5 μm ，根据 ASABE S572.1 标准属于中等和粗雾滴。与清水溶液相比，添加喷雾助剂后迈飞、Ultimate、Starguar4、Starguar4A、Atplus Mso-Hs 500 助剂溶液的雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 分别减少了 12.05%、13.84%、7.75%、17.44%、24.36%。与清水溶液的雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 相比，添加倍达通喷雾助剂后溶液的雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 增加了 8.75%，但不存在显著性差异 ($P=0.064$)，与其他喷雾助剂溶液的雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 相比存在显著性差异 ($P<0.05$)。在田间进行植保作业时，为了减少雾滴的飘移，可以优先使用倍达通喷雾助剂来增加雾滴粒径。小雾滴能够增加雾滴密度及覆盖率^[22]。在田间进行植保作业时，为了提高雾滴密度及覆盖率，可以优先使用 Atplus Mso-Hs 500 喷雾助剂。

表 7 不同助剂溶液的雾滴体积中径 $D_{V0.5}$

Table 7 Diameter of droplet volume $D_{V0.5}$ of different additive solutions

助剂溶液 Additive solutions	雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ Diameter of droplet volume $D_{V0.5}/(\mu\text{m})$
清水 Pure water	300.5±34.4 ab
迈飞 Mai Fei	264.3±32.3 bcd
倍达通 Bei Datong	326.8±39.6 a
Ultimate Ultimate	258.9±20.4 bcd
Starguar4 Starguar4	277.2±20.8 bc
Starguar4A Starguar4A	248.1±42.4 cd
Atplus Mso-Hs 500 Atplus Mso-Hs 500	227.3±41.0 d

注：不同小写字母为下同助剂溶液的雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 存在显著性差异。
Note: Different lowercase letters is significant differences in the diameter of droplet volume $D_{V0.5}$ of the different additive solution.

2.3.4 助剂溶液对雾滴谱宽的影响

不同溶液的雾滴谱宽为 0.95~1.10（如表 8）。与清水溶液相比，添加喷雾助剂后迈飞助剂溶液的雾滴谱宽减少了 2.06%，倍达通、Ultimate、Starguar4、Starguar4A 助剂溶液的雾滴谱宽分别增加了 4.12%、13.40%、10.31%、4.12%，添加喷雾助剂后溶液的雾滴谱宽变化较小，且无显著性差异 ($P>0.05$)，这说明 6 种喷雾助剂与水混合后雾化效果均比较稳定。在田间进行植保作业时，为了提高雾滴粒径的均匀性，可以优先使用迈飞喷雾助剂。

表 8 不同助剂溶液的雾滴谱宽

Table 8 Droplet relative span of different additive solutions

助剂溶液 Additive solutions	雾滴谱宽 Droplet spectral width
清水 Pure water	0.97±0.05 a
迈飞 Mai Fei	0.95±0.06 a
倍达通 Bei Datong	1.01±0.10 a
Ultimate	1.10±0.16 a
Starguar4	1.07±0.19 a
Starguar4A	1.01±0.05 a
Atplus Mso-Hs 500	0.97±0.14 a

注：不同小写字母代表不同助剂溶液的雾滴谱宽存在显著性差异。
Note: Different lowercase letters represent significant differences in the relative span of the different additive solution.

3 讨论

添加喷雾助剂能够改变溶液的表面张力与药液在作物表面上的接触角。该试验中添加喷雾助剂均降低了溶液的表面张力与药液在玉米叶片上的接触角，但作用效果表现不一，这与喷雾助剂的类型有关。景亮亮等^[25]研究了不同的喷雾助剂类型对表面张力与接触角的影响，结果表明有机硅类型的喷雾助剂对降低表面张力与接触角的效果最好。该试验中 Ultimate 喷雾助剂具有较好的表面张力与接触角，在雾滴滴落到玉米叶片上 90 s 时接触角降低至 0°，这可能与 Ultimate 喷雾助剂中的表面活性剂成分有关。表面活性剂具有固定的亲水亲油基团，能够显著降低水的表面能进而降低溶液的表面张力与接触角。清水溶液在玉米叶片上的接触角变化范围为 111.27°~108.10。这一结果与其他学者的研究结果有所不同，可能与玉米的品种及测试时期有关。潘文轩等^[26]使用“先玉 335”在 5~6 叶期时测得清水在玉米叶片上的接触角为

74.0°。张萍^[27]使用“先玉 335”在三叶一心期测得清水在玉米叶片上的接触角约为 90.0°。

喷雾助剂不仅能够改变溶液的理化特性,还能够对雾滴的沉积特性产生影响。在进行田间喷雾试验时,与清水溶液相比较各喷雾助剂的沉积特性均有所增加,这与添加喷雾助剂后雾滴的抗飘移、抗蒸发性增加以及溶液的表面张力、接触角降低有关^[11]。表面张力与接触角的降低更有利于雾滴的润湿与铺展^[23]。在所有助剂溶液中,倍达通喷雾助剂的作用效果最好,其雾滴密度、覆盖率及沉积量与清水溶液相比分别增加了 35.1%、93.8%、31.9%。结合表 4 与表 5 可知,Ultimate 喷雾助剂具有较好的表面张力与接触角,但对雾滴沉积特性的作用效果不及倍达通喷雾助剂。产生这一结果的原因是与 Ultimate 喷雾助剂相比较,倍达通喷雾助剂具有较好的抗飘移、抗蒸发性。根据表 7 可知,由于倍达通喷雾助剂的雾滴中值粒径增加进而抑制了雾滴的蒸发与飘移。同时,由于 Ultimate 喷雾助剂本身具有较弱的抗飘移、抗蒸发性也使得沉积区雾滴覆盖率与沉积量最差。添加 Atplus Mso-Hs 500 喷雾助剂后,雾滴的中值粒径在所有助剂中最小,这可能与喷雾助剂的添加浓度有关。张文君等^[9]的研究结果表明雾滴粒径随着喷雾助剂浓度的增加先增加后降低,峰值出现在喷雾助剂浓度为 0.03% 左右。添加迈飞喷雾助剂后,雾滴具有较好的雾滴谱宽,但与其他喷雾助剂没有显著性差异。添加 Starguar4 喷雾助剂后,溶液的表面张力最优,但是 Starguar4 喷雾助剂溶液在玉米叶片上的接触角并不是最优,这可能与助剂的成分有关^[25]。

综上所述,添加喷雾助剂均可对溶液的表面张力、药液在玉米叶片上的接触角以及雾滴沉积特性等因素产生影响。在所研究的喷雾助剂中,倍达通喷雾助剂对溶液理化性质和沉积特性具有较好的促进作用。虽然倍达通喷雾助剂对溶液表面张力以及雾滴在玉米叶片上的接触角与 Ultimate 喷雾助剂相比存在一定的差距,但也能满足田间植保无人机喷施作业的要求。添加喷雾助剂对病虫害的防治效果是否有显著影响,还需要进一步的田间试验进行验证。

4 结 论

本文研究了喷雾助剂对溶液表面张力、药液在玉米叶片上接触角的变化、雾滴沉积特性等因素的影响。所得结论如下:

1) 不同的喷雾助剂对降低药液的表面张力与药液在作物表面上的接触角的能力有所不同。其中 Ultimate 喷雾助剂的作用效果较好,接触角的变化率为 100%,与清水相比表面张力与接触角分别降低了 67.8%。进行田间喷施作业时,在疏水作物表面可以优先使用 Ultimate 喷雾助剂。

2) 添加喷雾助剂后雾滴密度、覆盖率以及沉积量均有所增加,说明喷雾助剂对雾滴具有一定的抗蒸发、抗飘移性能。其中,倍达通喷雾助剂的作用效果较显著,与清水溶液相比雾滴密度、覆盖率以及沉积量分别增加

了 35.1%、93.8%与 31.9%。在田间喷施触杀性时可以优先使用倍达通喷雾助剂来提高沉积特性。

3) 添加喷雾助剂后助剂溶液对雾滴 $D_{V0.5}$ 具有显著性差异 ($P < 0.05$),与清水溶液相比较除倍达通喷雾助剂的雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 增加 8.75% 外其他喷雾助剂的雾滴体积中径 $D_{V0.5}$ 均有所降低。在田间进行作业时,可以优先使用倍达通喷雾助剂以减小雾滴的飘移。

[参 考 文 献]

- [1] 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国国土资源部和环境保护部, 2014.
- [2] Wei J, Tang Y, Wang M, et al. Wettability on plant leaf surfaces and its effect on pesticide efficiency[J]. Int J Precis Agric Aviat, 2020, 3(1): 30-37.
- [3] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 植保无人机航空喷施作业有效喷幅的评定与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 82-90.
Chen Shengde, Lan Yubin, Li Jiyu, et al. Evaluation and test of effective spraying width of aerial spraying on plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 82-90. (in Chinese with English abstract)
- [4] 中华人民共和国农业农村部. 化肥农药使用量零增长行动目标顺利实现 我国三大粮食作物化肥农药利用率双双达 40% 以上[EB/OL]. 2021-1-17. http://www.moa.gov.cn/xw/zwtd/202101/t20210117_6360031.htm
- [5] Chen Y, Qi H L, Li G Z, et al. Weed control effect of unmanned aerial vehicle (UAV) application in wheat field[J]. Int J Precis Agric Aviat, 2019, 2(2): 25-31.
- [6] Wang G, Lan Y, Qi H, et al. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat[J]. Pest Management Science, 2019, 75(6): 1546-1555.
- [7] Zhu H, Jiang Y, Li H Z, et al. Effects of application parameters on spray characteristics of multi-rotor UAV[J]. Int J Precis Agric Aviat, 2019, 2(1): 18-25.
- [8] 石伶俐, 陈福良, 郑斐能, 等. 喷雾助剂对三唑磷在水稻叶片上沉积量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4228-4233.
Shi Lingli, Chen Fuliang, Zheng Feineng, et al. The influence of triazophos deposition on rice leaves by adding spray adjuvants[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(12): 4228-4233. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张文君, 何雄奎, 宋坚利, 等. 助剂 S240 对水分散性颗粒剂及乳油药液雾化的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 61-67.
Zhang Wenjun, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Effect of adjuvant S240 on atomization of water dispersible granule and emulsion solution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 61-67. (in Chinese with English abstract)
- [10] Xiao Q G, Du R, Zhou T T, et al. Effects of alkyl ethyl

- sulfonate dosage on cotton defoliation efficacy sprayed by UAV[J]. *Int J Precis Agric Aviat*, 2019; 2(2): 67-75.
- [11] 周晓欣. 雾滴蒸发规律的探索及几种航空喷雾助剂的评价[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- Zhou Xiaoxin. Droplets Evaporation Rule of Exploration and Evaluation of Several Aviation Spray Adjuvants[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 53-59.
- Zhang Dongyan, Lan Yubin, Chen Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 53-59. (in Chinese with English abstract)
- [13] Lan Y, Hoffmann W C, Fritz B K, et al. Spray drift mitigation with spray mix adjuvants[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2008, 24(1): 5-10.
- [14] Guler H, Zhu H, Ozkan E, et al. Wind tunnel evaluation of drift reduction potential and spray characteristics with drift retardants at high operating pressure[J]. *Journal of ASTM International*, 2006, 3(5): 1-9.
- [15] 袁会珠, 王忠群, 孙瑞红, 等. 喷洒部件及喷雾助剂对担架式喷雾机在桃园喷雾中的雾滴沉积分布的影响[J]. *植物保护*, 2010, 36(1): 106-109.
- Yuan Huizhu, Wang Zhongqun, Sun Ruihong, et al. Influences of nozzle type and spray adjuvant on the distribution of spray droplets with stretcher mounted sprayer in peach orchards[J]. *Plant Protection*, 2010, 36(1): 106-109. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张瑞瑞, 张真, 徐刚, 等. 喷雾助剂类型及浓度对喷头雾化效果影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(20): 36-43.
- Zhang Ruirui, Zhang Zhen, Xu Gang, et al. Effect of spray adjuvant types and concentration on nozzle atomization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(20): 36-43. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张靖, 吕和平, 曹立冬, 等. 六种喷雾助剂提高硝磺草酮防除稗草及反枝苋效果的作用机理初探[J]. *农药学报*, 2015, 17(3): 348-356.
- Zhang Jing, Lü Heping, Cao Lidong, et al. Synergism of six spray adjuvants on me sotrione in controlling *Echinochloa crus-galli* and *Amaranthus retroflexus*[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2015, 17(3): 348-356. (in Chinese with English abstract)
- [18] Wang G, Han Y, Li X, et al. Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737:139793.
- [19] 杨云海, 赵芸, 王凯博, 等. 农药助剂对 70%吡虫啉水分散粒剂在小麦叶片上附着性能的影响[J]. *云南农业大学学报: 自然科学*, 2019, 34(6): 954-964.
- Yang Yunhai, Zhao Yun, Wang Kaibo, et al. The Influence of Different Adjuvants on the Adhesion Property of 70% Imidacloprid WG on Wheat Leaves[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2019, 34(6): 954-964. (in Chinese with English abstract)
- [20] Chen S, Lan Y, Zhou Z, et al. Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV[J]. *Agronomy*, 2020, 10(2): 195.
- [21] Zhu H, Salyani M, Fox R D. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 76(1): 38-43.
- [22] Shan C, Wang G, Wang H, et al. Effects of droplet size and spray volume parameters on droplet deposition of wheat herbicide application by using UAV[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(1): 74-81.
- [23] 王国宾. 植保无人机喷雾质量评价及影响因素分析[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- Wang Guobin. Spraying Quality Evaluation on Plant Protection UAV[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [24] 漆海霞, 陈鹏超, 兰玉彬, 等. 不同电动植保无人机稻田雾滴沉积分布试验研究[J]. *农机化研究*, 2019, 9: 147-151.
- Qi Haixia, Chen Pengchao, Lan Yubin, et al. Experimental study on droplet deposit distribution of different electric UAVs in rice fields[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 9: 147-151. (in Chinese with English abstract)
- [25] 景亮亮, 柴军发, 高强, 等. 6 种喷雾助剂对 3 种药剂表面张力与接触角的影响[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(10): 1823-1833.
- Jing Liangliang, Chai Junfa, Gao Qiang, et al. Effect of 6 kinds of spray adjuvant on surface tension and contact angle of 3 kinds of pesticide[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(10): 1823-1833. (in Chinese with English abstract)
- [26] 潘文轩, 王索, 高宁, 等. 助剂对 40%丁香·戊唑醇悬浮剂在玉米叶片上润湿性能及药效的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2021, 49(5):138-145.
- Pan Wenxuan, Wang Suo, Gao Ning, et al. Effect of adjuvants on wetting performance and efficacy of coumoxystrobin and tebuconazol 40% SC on corn leaves[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2021, 49(5):138-145. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张萍. 四种喷雾助剂提高啞菌酯在玉米叶片上耐雨水冲刷能力的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- Zhang Ping. Study on Four Spray Adjuvants Improving the Rainfastness of Azoxystrobin on Maize Leaf Surfaces[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)

Effects of different spray additives on droplet deposition characteristics during plant protection UAV spraying operations

Lan Yubin^{1,2}, Shan Changfeng¹, Wang Qingyu¹, Liu Qi¹, Yang Chenglei¹, Xie Yingjie¹, Wang Guobin^{1*}

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology/Academy of Ecological Unmanned Farm, Shandong University of Technology/Shandong University of Technology Sub-center of National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology, Zibo 255022, China; 2. College of Electronics Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: With the rapid development and application of plant protection UAV in China, its high-efficiency and low-volume spraying technology has gradually become a research hotspot. At present, domestic and foreign researches on spray additives for plant protection UAV are mainly based on droplet drift and laboratory tests. Few studies have been conducted on the physical and chemical properties of spray additives and the effects of droplet deposition characteristics. Spray additives can reduce the surface tension of the solution and increase the retention of droplets, which is of great significance for improving the utilization of pesticides. Therefore, this study explored the effects of different spray additives on the surface tension of the solution, the change law of the contact angle of the solution on the maize leaves, and the droplet deposition characteristics. In the experiment, surface tension-meter, contact angle measurement, 723S visible spectrophotometer, and XAG XP2020 plant protection UAV were used to measure the surface tension, contact angle, droplet deposition characteristics, and other parameters of six kinds of aviation spray additives (Ultimate, Starguar4A, Starguar4, Bei Datong, Mai Fei, Atplus Mso-Hs 500). Kromekote cards and Mylar were used to sample the droplet deposition characteristics, and DepositScan software was used to measure the droplet density, coverage, $D_{V0.5}$ and other parameters on the Kromekote cards. The test results showed that the addition of spray additives could significantly reduce the surface tension of the solution and had a significant difference ($P=0.000$). The surface tension value of the solution after adding the spray additives was reduced by 56.4%-67.8% compared with the pure water solution. Among them, Starguar4A spray additives had the best effect on reducing the surface tension of the solution, but it was not significant difference effects of Ultimate spray additives. The spray additives had different effects on the contact angle of the solution on the maize leaves. The contact angle of the pure water solution on the maize leaves varies from 111.27° to 108.10° . With the increase of time, the contact angle of the spray additive solution on the maize leaves gradually decreases and Ultimate spray additive had the best effect, and the contact angle decreased to 0° after the droplets fall on the corn leaves for 90 s. Adding spray additives can increase the density and coverage of the droplets in the deposition area and sampling area, among which the effect of Bei Datong spray additives was the best, and the density and coverage of droplets and deposition were increased by 35.1%, 93.8% and 31.9% respectively compared with the pure water solution. The deposition of the deposition area after adding spray additives varies from $0.049\text{--}0.072\ \mu\text{L}/\text{cm}^2$, which is increased compared with the pure water solution. Among them, the deposition of Bei Datong spray additives was up to $0.072\ \mu\text{L}/\text{cm}^2$. The distribution of the deposition amount of the droplets with the sampling position basically conforms to the normal distribution. After adding spray additives, the $D_{V0.5}$ of most of the additive solutions had been reduced and there was a significant difference ($P<0.05$). Except for the increase of droplet $D_{V0.5}$ by Bei Datong, other spray additives all reduce droplet $D_{V0.5}$, generally reducing by about $50\ \mu\text{m}$. Adding spray additives had no obvious influence on the droplet relative span, and there was no significant difference compared with the pure water solution ($P<0.05$). When plant protection spraying operations were carried out in the field, it can be preferable to use Bei Datong spray additives. Although the surface tension and contact angle of Bei Datong spray additives are not optimal, it can also meet the needs of field use of UAV. Meanwhile, the test can also provide a data basis for further improving the utilization rate of pesticides.

Keywords: UAV; spray additives; droplet density; coverage; deposition; surface tension; contact angle