



不同作业方式和施药模式下杀虫剂 对褐飞虱的防治效果

魏琪 万品俊 何佳春 赖凤香 王渭霞 傅强*

(中国水稻研究所, 水稻生物学国家重点实验室, 杭州 311401)

摘要: 为探讨植保无人机施药沉积利用率高但防治效果不稳定的问题, 利用液相色谱串联质谱法测定植保无人机和背负式喷雾器喷施后药液在水稻植株上的农药沉积率, 选择烯啶虫胺、吡蚜酮、呋虫胺和毒死蜱4种杀虫剂分别对分蘖期和拔节期水稻进行不同施药模式的室内喷施试验, 以模拟分析水稻非靶标部位的农药沉积对褐飞虱防治效果的影响。结果表明, 植保无人机喷施后水稻中上部的农药沉积率为34.83%, 显著高于背负式喷雾器的农药沉积率(15.30%), 但药后7 d的校正防治效果分别为61.4%和64.4%, 两者之间差异不显著。烯啶虫胺、呋虫胺和吡蚜酮3种内吸性杀虫剂室内模拟喷施后1 d和4 d均为直接喷施处理的水稻基部农药含量最高, 且该处理药后1、4和7 d的校正死亡率最高, 分别为23.33%~70.00%、46.67%~80.42%和70.00%~87.50%; 其次为遮挡茎部喷施处理, 而水中加药和叶片受药处理的防治效果最差。对于兼有触杀和熏蒸毒性的有机磷类杀虫剂毒死蜱, 水中加药处理和直接喷施处理药后1、2和4 d的校正死亡率均在98.33%以上, 显著高于其他2种处理。表明不同杀虫剂的吸收传导特性不同, 这直接影响其能否到达水稻基部, 进而影响其对褐飞虱的防治效果。

关键词: 褐飞虱; 植保无人机; 杀虫剂; 农药沉积率; 施药模式; 防治效果

Control efficacies of insecticides against the brown planthopper *Nilaparvata lugens* under various field operation modes and indoor application patterns of insecticide spraying

Wei Qi Wan Pinjun He Jiachun Lai Fengxiang Wang Weixia Fu Qiang*

(State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 311401, Zhejiang Province, China)

Abstract: To explore the problem of higher utilization rates of pesticides with unstable control efficacies using the agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer, the deposition rates of pesticides on rice plants were determined with liquid chromatography-tandem mass spectrometry after the field spraying operations by UAV and knapsack power sprayer (KPS), respectively. Four insecticides (nitenpyram, pymetrozine, dinotefuran and chlorpyrifos) were selected to carry out the laboratory experiments of insecticide spraying through various application patterns for the simulation analysis of the effects of off-target pesticide deposits on the control efficacies of insecticides against the brown planthopper *Nilaparvata lugens* in paddy fields. The results showed that the deposition rate of pesticide on the middle-upper section of rice plants was 34.83% by UAV application, which was significantly higher than KPS

基金项目: 国家水稻产业技术体系(CARS-01-35), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CPSIBRF-CNRRRI-202122), 中国水稻研究所级重点研发项目(CNRRRI-2020-05)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: fuqiang@caas.cn

收稿日期: 2021-03-06

(15.30%). However, their corrected control efficacies on the seventh day after treatment (DAT) were 61.4% and 64.4%, respectively, and no significant differences existed between these two operation modes. In the laboratory simulation applications of insecticide spraying, the maximum pesticide contents assessed in the base samples of rice plant were observed in the direct spraying treatments for all three systemic insecticides (nitenpyram, dinotefuran and pymetrozine) on both first DAT and fourth DAT. Their corresponding corrected mortalities were also the highest in all treatments on first DAT (23.33%–70.00%), fourth DAT (46.67%–80.42%) and seventh DAT (70.00%–87.50%), respectively. The spraying with rice stem bottom covered ranked second, while the treatments of spraying leaves and adding insecticides into water had lower mortalities. For the organophosphate insecticide chlorpyrifos with contact toxicity and fumigant action, both spraying directly and adding the insecticide into water resulted in more than 98.33% corrected mortalities on first DAT, second DAT and fourth DAT, respectively, which were remarkably higher than those of the other two treatments. As observed, different insecticides had different characteristics of uptake and translocation, which directly influence whether they could be transferred to the rice stems, thus affecting their control efficacies against *N. lugens*.

Key words: *Nilaparvata lugens*; unmanned aerial vehicle; insecticide; pesticide deposition rate; insecticide application pattern; control efficacy

褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 是我国及东南亚地区最重要的水稻害虫之一,该虫栖息于稻茎基部,主要以刺吸式口器取食韧皮部汁液进行为害,发生严重时可致使稻株枯死,直接影响水稻的产量和品质(Cheng, 2015)。目前化学防治仍是我国水稻病虫害防控的主要手段(吴孔明, 2018),然而杀虫剂按田间推荐剂量、以叶面喷施方式防治褐飞虱,其有效利用率不足0.1%,且在生产中如遇虫害重发时又通常会采取增加药量或防治次数(顾中言等, 2018),进而引发生态环境污染、害虫抗药性和生产成本提高等一系列问题(张凯等, 2019)。因此,如何提高褐飞虱防控药剂的利用率已经成为保障水稻安全生产的核心任务之一。

农药利用率是指单位面积内农药喷施后沉积在作物上的药量相对于施药总量的比值(袁会珠等, 2011),也是评价农药使用水平高低的基本参数。自2015年农业农村部组织开展化肥农药使用量零增长行动以来,我国农药施用量已连续4年负增长,2020年三大粮食作物的农药利用率达到40.6%,相比于2015年提高了4个百分点(http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202101/t20210117_6360031.htm),然而与欧美等发达国家50%~60%的水平相比仍存在较大差距(何雄奎, 2020)。“十三五”期间,随着我国农业现代化步伐的加快,农业机械化水平也在不断提高,其中以航空植保技术发展最迅速(何雄奎, 2019)。目前,以植保无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)为载体的低空低容量航空施药技术已被

用于防控水稻、小麦、玉米等作物田的病虫害防治,其农药利用率分别达到了49.1%、57.1%和52.7%,均显著高于传统的人工背负式喷雾作业(袁会珠等, 2018a)。然而,在植保无人机推广应用过程中也存在一系列问题,如施药不均匀、防治效果不稳定以及操作不规范等(兰玉彬等, 2019; 万品俊等, 2020),制约了我国农用航空植保技术的普及与发展。

近些年来,稻田无人机基础理论和应用技术受到了广泛关注。王明(2019)利用诱惑红指示剂法测得单旋翼和多旋翼无人机在水稻分蘖期、拔节期和破口期的农药沉积利用率分别为45.6%~47.0%、48.9%~70.3%和66.4%~69.6%,显著高于喷杆喷雾机、担架式动力喷雾机、背负式电动和手动喷雾器。然而多项田间试验结果表明,植保无人机防控稻飞虱的效果并不理想或无异于常规喷雾方式,比如在常规用量和不添加助剂的情况下,3WQF120-12型植保无人机施药对稻飞虱的防治效果为91.28%,低于背负式电动喷雾的95.40%(唐中兴等, 2020);詹国祥等(2020)通过对比不同药械的防治效果后发现,极飞P20型植保无人机对稻飞虱防治效果为86.83%,低于喷杆喷雾机和电动喷雾器的防治效果;苟栋等(2015)研究表明,TH80-1无人机和3WBD-16HBA电动喷雾器在分蘖期施药后3、7和14 d对褐飞虱的防治效果差异均不显著;薛新宇等(2013)试验结果表明,虽然N-3型无人直升机在分蘖后期施药对稻飞虱防治效果均显著高于担架式喷雾机,但这2种药械在孕穗期喷施则对稻飞虱的防

治效果无显著差异;夏海荣(2018)、马金龙和陈吟(2020)等也得到类似的结果。植保无人机虽然能提高农药利用率,但并未增加农药对稻飞虱的防治效果,究其原因可能是植保无人机低量喷雾和液滴漂移等因素导致药剂分子无法直接喷洒至褐飞虱为害的稻丛基部,而药液剂量及分布又直接影响防治效果(顾中言等,2020)。在稻田病虫害防治过程中通常采取地毯式施药,但农药液滴并不能全部落到水稻植株上,多集中于水稻冠层或落到水中(徐德进等,2011;2014),而这些沉积于非靶标部位的药剂如何影响褐飞虱防治效果目前还尚不清楚。

为探究无人机施药沉积利用率高但对稻飞虱防治效果不稳定的问题,本研究利用液相色谱串联质谱法测定植保无人机和背负式喷雾器在水稻植株上的农药沉积率,选择烯啶虫胺、吡蚜酮、呋虫胺和毒死蜱4种杀虫剂分别对分蘖期和拔节期水稻进行不同施药模式的室内喷施试验,模拟分析水稻非靶标部位的农药沉积对褐飞虱防治效果的影响,并验证非内吸传导性杀虫剂毒死蜱对褐飞虱若虫的熏蒸作用,以期明晰农药叶面喷雾在水稻植株中的分布规律、传导特性、损失途径及防治效果贡献,同时也能为优化稻茎基部病虫害防控药剂利用率评估方法和研发精准施药技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫和植物:于2019年9月自浙江省杭州市富阳区水稻田采集褐飞虱成虫及高龄若虫种群,在不接触任何药剂的前提下,在温度(27±1)℃、相对湿度为(70±5)%、光周期16 L:8 D的人工气候室内饲养,用无虫、分蘖期高感褐飞虱的TN1水稻苗饲喂。TN1水稻种子由中国水稻研究所国家水稻种质中期库提供;甬优7850水稻种子自宁波种业股份有限公司购买;中浙优8号水稻种子自浙江勿忘农种业股份有限公司购买。

杀虫剂和试剂:20%烯啶虫胺(nitenpyram)·60%吡蚜酮(pymetrozine)水分散粒剂,拜耳作物科学(中国)有限公司;30%烯啶虫胺水分散粒剂,陕西华戎凯威生物有限公司;50%吡蚜酮水分散粒剂,安徽华星化工有限公司;20%呋虫胺(dinotefuran)可溶粒剂,日本三井化学AGRO株式会社;40%毒死蜱(chlorpyrifos)乳油,浙江新农化工股份有限公司;用于农药含量检测的4种杀虫剂标准样品,农业农村部环境质量监督检验测试中心。其他所有试剂均

为国产分析纯。

仪器:DW-86L386超低温冰箱,青岛海尔股份有限公司;MS0735W背负式机动喷雾器,日本株式会社丸山制作所;MG-1P多旋翼无人机,深圳市大疆创新科技有限公司;500 mL手压式喷雾器,佛山市施达清洁设备有限公司;Survryor系列液相色谱仪,美国Thermo Fisher公司;TSQ Quantum Access Max三重四极杆质谱仪和配电喷雾离子源,美国Thermo Fisher公司。

1.2 方法

1.2.1 不同作业方式下田间药效试验

于2019年9月中旬(水稻灌浆期,此时为褐飞虱盛发期)在浙江省杭州市萧山区戴村镇水稻田进行不同作业方式田间药效试验,水稻品种为甬优7850,5月中旬播种,6月上旬移栽,机插行距为30 cm,株距为18 cm,试验总面积约0.5 hm²,分别采取MG-1P多旋翼无人机和MS0735W背负式机动喷雾器2种作业方式进行喷药。MG-1P多旋翼无人机喷头为TX-VK8,流量为0.525 L/min,喷幅为3 m,作业高度为1.5 m,飞行速度是4 m/s,喷施药液量为15 L/hm²,MS0735W背负式机动喷雾器喷头为扇形D-5型喷头,喷施药液量为375 L/hm²,每种作业方式的试验小区长75 m、宽30 m,以不施药水稻田为空白对照区,长35 m、宽15 m,各处理不设置重复。2种作业方式均按照20%烯啶虫胺·60%吡蚜酮水分散粒剂的最高推荐剂量150 g/hm²进行喷施,并保证单位面积的药剂使用量相同。喷施1 h后对每个试验小区采用Z型五点取样法取样,每点取2株水稻,共采集10株,将其地上部分取下,高出地面30 cm部分为水稻植株基部,其他部分为水稻植株中上部,分别混合10株水稻的相同部位样品,每个小区重复取样3次;将样品带回实验室后铡碎、混匀后称重,于-80℃超低温冰箱冻存,用于农药含量检测。施药前和施药后7 d调查每个小区水稻植株上褐飞虱的虫口数量,采用平行跳跃法取样,每隔15行取1行,共取10行,每行取2点,每点调查2穴水稻,共计调查40穴,每个小区重复取样3次,计算虫口减退率和校正防治效果。虫口减退率=(药剂喷施前虫口数量-药剂喷施数天后虫口数量)/药剂喷施前虫口数量×100%,校正防治效果=(试验区虫口减退率-对照区虫口减退率)/(1-对照区虫口减退率)×100%。

1.2.2 不同施药模式下室内药效试验

在恒温人工气候室内进行不同施药模式下4种杀虫剂对褐飞虱的防治效果试验,种植中浙优8号

水稻,于5月下旬播种,6月中旬将其移栽至长40 cm、宽30 cm、高28 cm的蓝色周转箱中,每箱移栽6株,水面高度约4 cm,待水稻分蘖期进行以下5个处理,(1)空白对照:未喷施杀虫剂;(2)直接喷施:使用手压式喷雾器对水稻整株进行药液喷施;(3)遮挡茎部喷施:用塑料瓶对褐飞虱主要为害部位——茎基部(水面上15 cm)进行遮挡,然后再进行药液喷施;(4)叶片喷药:用塑料瓶和塑料平板对茎基部和泥面进行遮挡,仅对中上部叶片进行药液喷施;(5)水中加药:将药液均匀加入周转箱的水中,小心搅拌均匀。处理中喷施的药剂为烯啶虫胺、吡蚜酮、呋虫胺和毒死蜱,按照周转箱的面积和田间推荐最高用药量计算各药剂药量,具体操作如下:先称取上述4种杀虫剂分别在100 mL容量瓶中配制成有效成分为500 mg/L的母液,然后用10 mL移液管按需量取一定体积母液在100 mL容量瓶中配制成供试药液,4种药液的有效成分含量分别为13.5、13.5、14.4和90 mg/L;每箱为同一处理,每株水稻为1个重复;用手压式喷雾器进行喷施,将雾化喷嘴调制最大档位,每株水稻按压喷施约13次,以保证各株水稻受药均匀。喷施30 min后,其中3株分别套入直径3.5 cm、高15 cm的圆柱双通塑料笼罩,笼罩一端插于泥中,同时接入15头褐飞虱3龄若虫,另一端塞上脱脂棉,防止褐飞虱逃逸;另外3株分别取其2个分蘖约15 g,将茎、叶分开,分别装入30 cm×20 cm自封袋中作好标签和记录,于-80℃超低温冰箱中保存,用于农药含量检测。烯啶虫胺、吡蚜酮、呋虫胺3种杀虫剂分别于喷药后1、4和7 d观察和记录死亡虫数,计算校正死亡率,按照上述方法收集水稻分蘖样品,用于农药含量检测;毒死蜱分别于喷药后1、2和4 d观察和记录死亡虫数,计算校正死亡率,按照上述方法收集水稻分蘖样品,用于农药含量检测。用毛笔轻触虫体,虫体不能活动视为死亡。校正死亡率=(处理组死亡率-空白对照组死亡率)/(1-空白对照组死亡率)×100%。水稻拔节期仅进行未喷施杀虫剂、直接喷施、叶片喷药和水中加药4个处理,试验方法、步骤等同水稻分蘖期。

1.2.3 水稻样品农药含量和农药沉积率的测定

将1.2.1田间药效试验和1.2.2室内药效试验收集的水稻样品送至中国水稻研究所农业农村部稻米及制品质量监督检验测试中心进行农药含量测定,检测方法参考曹赵云等(2010)方法。称取5 g稻茎样品置于120 mL离心管中,加入20 mL蒸馏水浸泡30 min后加入25 mL乙腈,于高速匀浆机中以

10 000 r/min速度匀浆2 min,分别加入10 g MgSO₄、1 g NaCl,5 000 r/min低速匀浆1 min,再以3 500 r/min离心3 min。准确移取5 mL上层乙腈相置于装有1 g MgSO₄、100 mg 乙二胺-N-丙基硅烷(primary-secondary amine, PSA)和100 mg 十八烷基键合硅胶吸附剂的15 mL离心管中,旋涡混匀,以3 500 r/min离心3 min,取1 mL上清液过孔径为0.22 μm的有机相滤膜后置于液相色谱仪上进行农药含量检测。室内喷施试验中水稻茎基部的农药含量=单位质量水稻样品的农药含量测定值×样品总质量;田间药效试验中每株水稻中上部或基部的农药含量=单位质量水稻样品的农药含量测定值×水稻中上部或基部总质量/10,每株水稻的农药平均含量=每株水稻中上部的农药平均含量+每株水稻基部的农药平均含量;田间药械喷施的农药沉积率=水稻各部位样品的农药含量/(单位面积施药量/单位面积稻株数)×100%。

1.2.4 毒死蜱对褐飞虱的熏蒸毒力验证

在人工气候室中种植浙优8号水稻,待秧苗长至3叶1心时移栽到长40 cm、宽30 cm、高28 cm的蓝色周转箱中,每箱6株水稻,水面高度约4 cm,待分蘖期时将泥土自然晾干至表面无明显水后进行以下4个处理:(1)空白对照:向周转箱中直接加入6 L清水;(2)直接喷施:用塑料板和滤纸遮挡泥面后对水稻进行毒死蜱药液喷施,供试药量与1.2.2室内试验相同,然后在周转箱中加入6 L清水;(3)水中加药:向周转箱中加入混有同(2)处理毒死蜱药量的6 L溶液;(4)熏蒸处理:按(3)浓度配制药液,取30 mL药液分装到离心管中,用尼龙纱网封口,然后将离心管插入泥土中,再向周转箱中加入6 L清水。每箱进行同一处理,每株水稻为1个重复。处理30 min后,按1.2.2室内药效试验方法接入褐飞虱3龄若虫,每隔24 h检查1次若虫死亡情况并记录,连续观察3 d。死亡判断标准和校正死亡率计算方法同1.2.2。

1.3 数据分析

采用SPSS 25.0和DPS 14.50数据处理软件进行数据分析,不同作业方式之间采用 t 测验法进行差异显著性检验;不同施药模式之间采用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验,百分制数据方差分析前进行反正弦平方根转换。

2 结果与分析

2.1 不同作业方式下水稻植株的农药含量

背负式油动喷雾器作业后,整株水稻中烯啶虫

胺和吡蚜酮含量分别为0.026 mg/株和0.049 mg/株;植保无人机喷施作业后,整株水稻中烯啶虫胺和吡蚜酮含量分别为0.058 mg/株和0.087 mg/株(图1),分别显著高于背负式油动喷雾器作业后烯啶虫胺和吡蚜酮的含量,表明在单位面积相同施药量下,植保无人机喷施后在水稻植株上的农药沉积量高于背负式油动喷雾器。

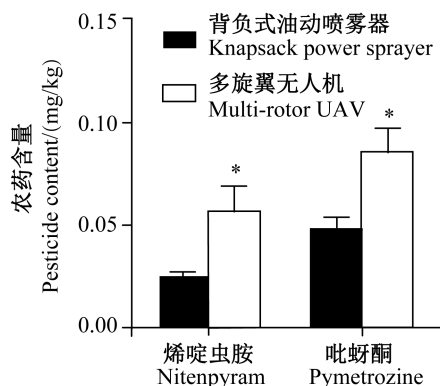


图1 不同作业方式下水稻植株上的农药含量

Fig. 1 Insecticide contents in rice plants under different modes of operation

图中数据为平均数±标准误。*表示经 *t* 测验法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data in the figure are mean±SE. * indicates significant difference at $P < 0.05$ level by *t* test.

2.2 不同作业方式下农药沉积率及其防治效果

植保无人机喷施后水稻中上部农药沉积率为34.83%,显著高于背负式油动喷雾器(15.30%)。2种作业方式下水稻中上部的农药的沉积率占整株农药沉积的比例介于94.7%~95.5%之间,且极显著高于其水稻基部;水稻基部的药剂沉积量极少,且2种作业方法下水稻基部农药沉积率之间差异不显著。植保无人机喷施和背负式油动喷雾器作业后第7天的校正防治效果分别为61.4%和64.4%,两者之间差异不显著(表1)。

表1 不同作业方式下水稻植株上农药沉积率和校正防治效果

Table 1 Pesticide deposition rates and corrected control efficacies under different modes of operation

作业方式 Operation mode	农药沉积率 Pesticide deposition rate/%		校正防治效果 Corrected control efficacy/%
	水稻中上部 Middle-upper section of rice plant	水稻基部 Base of rice plant	
背负式油动喷雾器 Knapsack power sprayer	15.30±1.65 Ab	0.85±0.15 Ba	61.4±3.06 a
多旋翼植保无人机 Multi-rotor plant protection UAV	34.83±7.42 Aa	1.66±0.58 Ba	64.4±3.20 a

表中数据为平均数±标准误。同行不同大写字母、同列不同小写字母分别表示经 *t* 测验法检验在 $P < 0.001$ 和 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data in the table are mean±SE. Different upper letters in the same row, different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.001$ and $P < 0.05$ levels by *t* test, respectively.

2.3 不同施药模式下水稻基部农药含量

对于烯啶虫胺、呋虫胺和吡蚜酮3种内吸性杀虫剂,施药后1 d直接喷施处理的水稻基部农药含量均最高,分别为0.56、0.87和0.29 mg/kg;其次为遮挡茎部喷施,分别为0.17、0.53和0.23 mg/kg,平均占直接喷施量的64.90%;最后为叶片施药或水中加药处理,农药含量分别介于0.17~0.37 mg/kg和0.03~0.19 mg/kg之间,分别占直接喷施量的41.52%和33.98%(表2)。施药后4 d,烯啶虫胺、呋虫胺和吡蚜酮3种内吸性杀虫剂仍是直接喷施处理的水稻基部农药含量最高,分别为0.23、0.69和0.26 mg/kg,但相比于药后1 d,烯啶虫胺水中加药处理以及呋虫胺遮挡茎部喷施和水中直接加药3个处理的水稻基部农药含量均明显增加,而吡蚜酮水中加药、叶片施药和遮挡茎部喷施3个却明显降低(表2)。对于毒死蜱,施药后1 d和4 d直接喷施处理的水稻基部农药含量最高,分别为0.37 mg/kg和0.25 mg/kg,均显著高于其他3个杀虫剂处理,且同一处理的农药含量之间无显著差异(表3)。

2.4 分蘖期不同施药模式下对褐飞虱的防治效果

不同施药模式下,4种杀虫剂对褐飞虱的防治效果与水稻基部的农药含量直接相关。烯啶虫胺、呋虫胺和吡蚜酮药后1、4和7 d,直接喷施处理的校正死亡率最高,分别为23.33%~70.00%、46.67%~80.42%和70.00%~87.50%,其次是遮挡茎基部喷施处理,药后1、4和7 d校正死亡率分别为10.00%~50.00%、13.33%~73.33%和56.67%~75.00%,而水中加药和叶片施药处理最差,药后7 d校正死亡率依次为呋虫胺>烯啶虫胺>吡蚜酮(表2)。毒死蜱药后1、2和4 d,水中加药处理和直接喷施处理的校正死亡率均在98.33%以上,显著高于其他2种处理(表3)。

表2 不同施药模式下3种杀虫剂在水稻茎基部的农药含量及对褐飞虱的防治效果

Table 2 Contents of three insecticides at the rice stem and their control efficacies against *Nilaparvata lugens* under various patterns of pesticide application

杀虫剂 Insecticide	施药模式 Pesticide application pattern	药后 1 d		药后 4 d		药后 7 d
		One day after application		Four days after application		校正死亡率
		农药含量 Pesticide content/(mg/kg)	校正死亡率 Corrected mortality/%	农药含量 Pesticide content/(mg/kg)	校正死亡率 Corrected mortality/%	校正死亡率 on seven days after application/%
烯啶虫胺 Nitenpyram	直接喷施 Spraying directly	0.56±0.10 a	23.33±11.55 a	0.23±0.08 a	46.67±17.64 a	73.33±6.38 a
	遮挡茎部喷施 Spraying with rice stems covered	0.17±0.05 b	10.00±15.87 a	0.14±0.04 b	13.33±11.55 b	68.33±9.43 a
	水中加药 Adding insecticide into water	0.03±0.01 c	6.67±5.44 a	0.11±0.02 b	18.33±3.33 b	43.33±8.39 b
	叶片施药 Leaves exposed to insecticide	0.17±0.05 b	13.33±5.44 a	0.13±0.02 b	11.67±6.38 b	50.00±11.39 b
呋虫胺 Dinotefuran	直接喷施 Spraying directly	0.87±0.14 a	70.00±8.61 a	0.69±0.32 a	80.42±14.49 a	87.50±14.69 a
	遮挡茎部喷施 Spraying with rice stems covered	0.53±0.14 b	50.00±11.55 b	0.61±0.18 a	73.33±6.38 ab	75.00±8.61 b
	水中加药 Adding insecticide into water	0.19±0.00 c	8.33±6.38 d	0.26±0.01 b	53.33±20.64 b	55.00±8.61 bc
	叶片施药 Leaves exposed to insecticide	0.37±0.16 bc	23.33±11.55 c	0.23±0.02 b	35.00±11.55 c	50.00±14.78 c
吡蚜酮 Pymetrozine	直接喷施 Spraying directly	0.29±0.11 a	45.00±10.00 a	0.26±0.01 a	50.00±12.80 ab	70.00±17.53 a
	遮挡茎部喷施 Spraying with rice stems covered	0.23±0.08 ab	43.33±8.61 a	0.18±0.02 b	53.33±5.53 ab	56.67±16.67 ab
	水中加药 Adding insecticide into water	0.13±0.01 b	33.33±10.89 ab	0.11±0.00 c	58.75±24.28 a	55.42±30.38 a
	叶片施药 Leaves exposed to insecticide	0.17±0.02 ab	20.00±9.43 b	0.08±0.02 d	23.33±5.53 b	25.00±5.44 b

表中数据为平均数±标准误。同种杀虫剂同列不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data in the table are mean±SE. Different lowercase letters in the same column of the same insecticide indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

表3 不同施药模式下毒死蜱在水稻茎基部的农药含量及对褐飞虱的校正死亡率

Table 3 Contents of chlorpyrifos in the rice stem and corrected mortalities of *Nilaparvata lugens* under various patterns of pesticide application

施药模式 Pesticide application pattern	药后 1 d		药后 2 d	药后 4 d	
	One day after application		校正死亡率	Four days after application	
	农药含量 Pesticide content/ (mg/kg)	校正死亡率 Corrected mortality/%	校正死亡率 Corrected mortality on two days after applica- tion/%	农药含量 Pesticide content/ (mg/kg)	校正死亡率 Corrected mortality/%
直接喷施 Spraying directly	0.37±0.13 a	98.33±3.33 a	100.00±0.00 a	0.25±0.09 a	100.00±0.00 a
遮挡茎部喷施 Spraying with rice stems covered	0.05±0.01 b	58.33±17.53 b	68.33±17.64 b	0.07±0.02 b	81.67±15.87 b
水中加药 Adding insecticide into water	0.09±0.04 b	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	0.14±0.03 b	100.00±0.00 a
叶片施药 Leaves exposed to insecticide	0.06±0.01 b	41.67±13.74 bc	58.33±12.17 b	0.08±0.01 b	63.33±11.39 bc

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data in the table are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

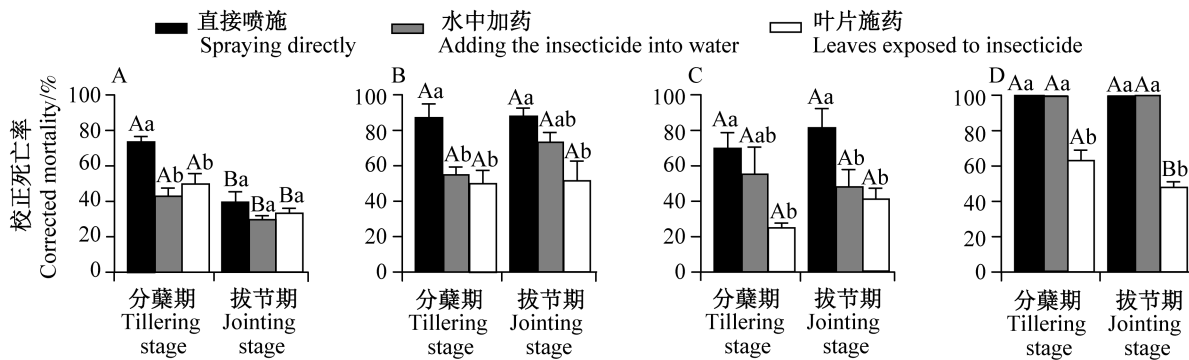
2.5 2个生育期不同施药模式下对褐飞虱防治效果

在分蘖期和拔节期,呋虫胺和吡蚜酮直接喷施处理的校正死亡率>水中加药处理的校正死亡率>叶片施药处理的校正死亡率,且同种药剂在相同施

药模式下2个生育期的防治效果之间无显著差异;在拔节期,烯啶虫胺直接喷施、水中加药和叶片施药3个处理的校正死亡率分别为40.00%、30.00%和33.34%,均显著低于分蘖期的校正死亡率,分别为

73.30%、43.34% 和 50.0%; 在水稻分蘖期和拔节期, 毒死蜱直接喷施和水中加药处理的校正死亡率均为

100.00%, 而叶片施药处理的校正死亡率分别为 63.33% 和 48.33%, 且前者显著高于后者(图 2)。



A~D: 烯啶虫胺、呋虫胺、吡蚜酮和毒死蜱。A~D: Nitenpyram, dinotefuran, pymetrozine and chlorpyrifos.

图 2 2 个生育期不同施药模式下 4 种杀虫剂对褐飞虱的校正死亡率

Fig. 2 Corrected mortalities of *Nilaparvata lugens* by four insecticides at two growth stages of rice plant under various patterns of insecticide application

图中数据为平均数±标准误。不同大写字母表示同杀虫剂同施药模式下 2 个生育期之间经 *t* 测验法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著; 不同小写字母表示同杀虫剂同生育期不同施药模式之间经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data in the figure are mean±SE. Different upper letters indicate significant difference between two growth stages of rice plant under the same pattern of insecticide application for the same insecticide at $P < 0.05$ level by *t* test. Different lowercase letters indicate significant difference among different patterns of insecticide application at the same growth stage for the same insecticide at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.6 毒死蜱对褐飞虱的熏蒸毒力

毒死蜱直接喷施处理的效果最好, 处理 24、48 和 72 h 时褐飞虱校正死亡率分别为 90.83%、97.08% 和 100.00%, 均显著高于同处理时间其他 2 种施药模式下的校正死亡率。毒死蜱熏蒸处理 24 h 时褐飞虱校

正死亡率为 28.34%, 仅显著高于水中加药处理, 而处理 48 h 时这 2 种施药模式下的校正死亡率无显著差异; 在处理 72 h 时, 水中加药处理的校正死亡率又显著高于熏蒸处理, 且两者校正死亡率均在 50.00% 以上(表 4)。

表 4 不同施药模式下毒死蜱对褐飞虱的毒力

Table 4 Toxicity of chlorpyrifos against *Nilaparvata lugens* under various patterns of insecticide application

施药模式 Pesticide application pattern	校正死亡率 Corrected mortality/%		
	24 h	48 h	72 h
直接喷施 Spraying directly	90.83±3.44 a	97.08±2.92 a	100.00±0.00 a
水中加药 Adding insecticide into water	9.17±3.44 c	41.66±2.71 b	63.34±6.31 b
熏蒸处理 Fumigating treatment	28.34±4.20 b	48.34±4.72 b	50.00±5.69 c

图中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data in the table are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

3 讨论

近些年来, 植保无人机已逐渐成为水稻病虫害防控的主流防控手段之一, 其在提高稻田农药利用率方面发挥着重要作用。全国各地 35 组水稻田间试验数据结果表明, 植保无人机的农药利用范围为 31.3%~72.5%, 高于地面喷雾技术(袁会珠等, 2018b); 陈盛德等(2017)利用雾滴采集卡在水稻开花结实期对比了 2 种单旋翼无人机和背负式电动喷

雾器的雾滴沉积效果, 结果表明航空喷施雾滴更均匀, 且沉积效果显著优于人工喷雾; 本研究结果也表明植保无人机喷施后沉积于水稻上的农药含量显著高于人工背负式喷雾的农药含量。在水稻冠层喷雾农药沉积规律研究方面, 顾中言等(2018)利用手动喷雾器和自制雾滴采集器检测了水稻孕穗期和扬花期喷雾后示踪剂在水稻植株的空间分布, 结果表明在水稻植株中上部沉积的示踪剂分别占 82.58% 和

82.33%, 而水稻基部仅占 1.17% 和 1.59%; 王明(2019)利用诱惑红指示剂法测得多旋翼植保无人机和背负式电动喷雾器施药后破口期水稻基部的农药沉积量占整株农药沉积量的 15.96% 和 17.48%; 本研究结果也表明, 植保无人机喷施和人工背负式喷药后孕穗期水稻基部的农药沉积率极显著低于水稻中上部, 且 2 种作业方式下水稻基部农药沉积率无差异, 这解释了水稻田无人机作业农药利用率高但对褐飞虱防治效果不稳定的原因。

在室内模拟喷施试验中, 非靶标部位的农药沉积对褐飞虱防治效果的影响与杀虫剂自身的吸收传导特性密切相关。在 4 种杀虫剂中, 吡蚜酮在水稻体内的双向输导能力最好, Wyss & Bolsinger(1997)研究表明植株叶片对吡蚜酮的吸收传导才是有效防治刺吸式口器害虫的主要原因; Elbert et al.(2008)研究表明, 虽然呋虫胺和烯啶虫胺叶片或土壤喷施对刺吸式口器害虫均有防治效果, 但是叶面喷施的防治效果优于土壤施药, 且总体上呋虫胺的防治效果优于烯啶虫胺, 与本试验结果一致。毒死蜱通常被认为无内吸和传导性, 但也有一些学者认为凡是农药都能在植株体内运输传导或参与植物蒸腾作用, 而农药的传导只是一个相对概念(姚安庆和杨健, 2012), 如 Ge et al.(2016)研究表明蔬菜根部能从周围环境中吸收毒死蜱并在整株体内分布, 而黄炳球等(2000)研究表明, 水稻植株表面的毒死蜱能够迅速渗透到水稻体内, 其含量相较于体外均匀而稳定。本试验中毒死蜱的水中加药处理与直接喷施处理防治效果相当, 这可能与渗透作用有关。

通过优化药械作业参数、改变施药方式和研发新剂型等措施可以改善水稻基部病虫害农药沉积率不高的现状, 如徐德进等(2019)提出通过大容量喷雾来增加雾滴穿透性和水稻基部的雾滴密度来降低农药损失, 进而提高防治效果; 同时, 通过添加喷雾助剂亦能显著提高雾滴沉积量和有效沉积率(何玲等, 2017)。董玉轩等(2012)试验结果表明, 在喷施相同有效剂量毒死蜱的条件下, 侧向喷雾的防治效果要高于压顶喷雾, 这主要是由于前者可使药液更易达到防治褐飞虱所需的雾滴密度和有效剂量, 从而提高杀虫剂的有效利用率。此外, 展膜油剂型农药已经被用于防治水稻茎基部病虫害(黄崇春等, 2016; 陈淑宁等, 2019), 类似的剂型还有漂浮粒剂(林雨佳和华乃震, 2016)等, 其操作简便, 在水稻田中施用后可快速形成薄膜或崩解释放, 被植株根茎吸收后即可发挥药效。

本研究的田间试验仅测定比较了水稻孕穗期植保无人机和背负式油动喷雾器作业下农药沉积率及其对褐飞虱的防治效果, 而水稻生育期、药械作业参数、杀虫剂作用机制等因素的影响还需深入了解; 其次, 本研究重点探讨了水稻冠层喷雾过程中非靶标部位药剂沉积对褐飞虱防治效果的影响, 今后还应针对钻蛀性害虫二化螟 *Chilo suppressalis*、常发于茎秆基部的纹枯病等其他重要病虫害进行深入研究, 为优化水稻病虫害综合防控技术和提高农药利用率提供科学依据。

致谢: 中国水稻研究所曹赵云副研究员、浙江省杭州市萧山区植保站王国荣站长和浙江省农业科学院徐红星研究员对本文提供的协助与指导, 特此致谢!

参 考 文 献 (References)

- Cao ZY, Mou RX, Ying XH, Lin XY, Chen MX. 2010. Determination of 80 pesticide residues in vegetables and fruits by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Instrumental Analysis*, 29(10): 1030-1035 (in Chinese) [曹赵云, 牟仁祥, 应兴华, 林晓燕, 陈铭学. 2010. 液相色谱-串联质谱法测定蔬菜、水果中 80 种农药残留. *分析测试学报*, 29(10): 1030-1035]
- Chen SD, Lan YB, Li JY, Zhou ZY, Liu AM, Xu XJ. 2017. Comparison of the pesticide effects of aerial and artificial spray applications for rice. *Journal of South China Agricultural University*, 38(4): 103-109 (in Chinese) [陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 周志艳, 刘爱民, 徐小杰. 2017. 航空喷施与人工喷施方式对水稻施药效果比较. *华南农业大学学报*, 38(4): 103-109]
- Chen SN, Yan XJ, Yang DB, Cui L, Han P, Xu J, Yuan HZ. 2019. Field efficacy of azoxystrobin + thifluzamide 4% spreading oil against rice sheath blight. *Pesticide Science and Administration*, 40(4): 43-48 (in Chinese) [陈淑宁, 闫晓静, 杨代斌, 崔丽, 韩鹏, 徐军, 袁会珠. 2019. 4% 噻菌酯·噻呋酰胺展膜油剂防治水稻纹枯病田间药效初探. *农药科学与管理*, 40(4): 43-48]
- Cheng JA. 2015. Rice planthoppers in the past half century in China.// Heong KL, Cheng JA, Escalada MM. *Rice planthoppers*. Dordrecht: Springer, pp. 1-32
- Dong YX, Gu ZY, Xu DJ, Xu GC, Xu XL. 2012. Influence of droplet densities and spray methods on the efficiency of chlorpyrifos against brown planthopper. *Journal of Plant Protection*, 39(1): 75-80 (in Chinese) [董玉轩, 顾中言, 徐德进, 徐广春, 许小龙. 2012. 雾滴密度与喷雾方式对毒死蜱防治褐飞虱效果的影响. *植物保护学报*, 39(1): 75-80]
- Elbert A, Haas M, Springer B, Thielert W, Nauen R. 2008. Applied aspects of neonicotinoid uses in crop protection. *Pest Management Science*, 64(11): 1099-1105
- Ge J, Lu MX, Wang DL, Zhang ZY, Liu XJ, Yu XY. 2016. Dissipation and distribution of chlorpyrifos in selected vegetables through foliage and root uptake. *Chemosphere*, 144: 201-206

- Gu ZY, Xu DJ, Xu GC. 2020. Effects of dose and distribution of pesticide droplets on pests control efficiency and its relationship with pesticide losses. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 22(2): 193–204 (in Chinese) [顾中言, 徐德进, 徐广春. 2020. 论农药雾滴的剂量及分布对害虫防治效果的影响及其与农药损失的关系. *农药学报*, 22(2): 193–204]
- Gu ZY, Xu GC, Xu DJ. 2018. Analysis of pesticide efficiency of insecticides against brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 20(6): 704–714 (in Chinese) [顾中言, 徐广春, 徐德进. 2018. 杀虫剂防治水稻褐飞虱的有效利用率分析. *农药学报*, 20(6): 704–714]
- He L, Wang GB, Hu T, Meng YH, Yan XJ, Yuan HZ. 2017. Influences of spray adjuvants and spray volume on the droplet deposition distribution with unmanned aerial vehicle (UAV) spraying on rice. *Journal of Plant Protection*, 44(6): 1046–1052 (in Chinese) [何玲, 王国宾, 胡韬, 蒙艳华, 闫晓静, 袁会珠. 2017. 喷雾助剂及施液量对植保无人机喷雾雾滴在水稻冠层沉积分布的影响. *植物保护学报*, 44(6): 1046–1052]
- He XK. 2019. Research and development of crop protection machinery and chemical application technology in China. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 21(Z1): 921–930 (in Chinese) [何雄奎. 2019. 中国植保机械与施药技术研究进展. *农药学报*, 21(Z1): 921–930]
- He XK. 2020. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China. *Smart Agriculture*, 2(1): 133–146 (in Chinese) [何雄奎. 2020. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议. *智慧农业*, 2(1): 133–146]
- Huang BQ, Li YB, Pan K, Liu XQ. 2000. Study on penetration effects of chlorpyrifos in rice. *Agrochemicals*, 39(11): 23–25 (in Chinese) [黄炳球, 李拥兵, 潘科, 刘新清. 2020. 毒死蜱在水稻上的渗透消减研究. *农药*, 39(11): 23–25]
- Huang CC, Wang YC, Yang DB, Yuan HZ. 2016. Preparation of dinotefuran 4% spreading oil and the control efficacy against rice planthopper in paddy field. *Pesticide Science and Administration*, 37(5): 30–34 (in Chinese) [黄崇春, 王迎春, 杨代斌, 袁会珠. 2016. 呋虫胺4%展膜油剂的配制及田间防效研究. *农药科学与管理*, 37(5): 30–34]
- Lan YB, Chen SD, Deng JZ, Zhou ZY, Ouyang F. 2019. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China. *Journal of South China Agricultural University*, 40(5): 217–225 (in Chinese) [兰玉彬, 陈盛德, 邓继忠, 周志艳, 欧阳帆. 2019. 中国植保无人机发展形势及问题分析. *华南农业大学学报*, 40(5): 217–225]
- Lin YJ, Hua NZ. 2016. New pesticide formulation: floating granules. *World Pesticides*, 38(6): 17–24 (in Chinese) [林雨佳, 华乃震. 2016. 省时、省工的农药新剂型——漂浮粒剂. *世界农药*, 38(6): 17–24]
- Ma JL, Chen Y. 2020. Crop protection with unmanned aerial vehicle (UAV) in rice field. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 36(27): 135–141 (in Chinese) [马金龙, 陈吟. 2020. 直播稻田无人机全程防治病虫害草害初探. *中国农学通报*, 36(27): 135–141]
- Tang ZX, Li T, Yong QA, Zhang YF, Li ZF, Chi YK, Zhao W. 2020. Control effects of plant protection UAV on rice diseases and insect pests. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 48(10): 123–125 (in Chinese) [唐中兴, 李婷, 雍其安, 张远芳, 李志芬, 迟元凯, 赵伟. 2020. 植保无人机对水稻病虫害的防治效果. *安徽农业科学*, 48(10): 123–125]
- Wan PJ, Yuan SY, He JC, Wei Q, Lai FX, Wang WX, Fu Q. 2020. Application status and problems of plant protection unmanned aircraft in paddy field. *China Rice*, 26(5): 74–79 (in Chinese) [万品俊, 袁三跃, 何佳春, 魏琪, 赖凤香, 王渭霞, 傅强. 2020. 稻田植保无人机应用现状及问题分析. *中国稻米*, 26(5): 74–79]
- Wang M. 2019. Determination and evaluation model of pesticide deposition rate for utilization by folia spray in rice fields. Master thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [王明. 2019. 水稻田喷雾技术的农药沉积利用率测定与评估模型建立. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Wu KM. 2018. Development direction of crop pest control science and technology in China. *Journal of Agriculture*, 8(1): 35–38 (in Chinese) [吴孔明. 2018. 中国农作物病虫害防控科技的发展方向. *农学学报*, 8(1): 35–38]
- Wyss P, Bolsinger M. 1997. Translocation of pymetrozine in plants. *Pesticide Science*, 50(3): 195–202
- Xia HR. 2018. Preliminary study on the control of pests and diseases in rice fields by different plant protection devices. *Agricultural Development & Equipments*, (2): 123–127 (in Chinese) [夏海荣. 2018. 不同植保机械对水稻田病虫害防治效果试验初报. *农业开发与装备*, (2): 123–127]
- Xu DJ, Gu ZY, Xu GC, Xu XL. 2014. Influence of spray method on the deposit and distribution of spray droplets in rice field. *Scientia Agricultura Sinica*, 47(1): 69–79 (in Chinese) [徐德进, 顾中言, 徐广春, 许小龙. 2014. 喷雾方式对农药雾滴在水稻群体内沉积分布的影响. *中国农业科学*, 47(1): 69–79]
- Xu DJ, Gu ZY, Xu GC, Xu XL, Fan P. 2011. Effects of solution surface tension and spray methods on deposition of droplets on rice plants. *Chinese Journal of Rice Science*, 25(2): 213–218 (in Chinese) [徐德进, 顾中言, 徐广春, 许小龙, 范鹏. 2011. 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. *中国水稻科学*, 25(2): 213–218]
- Xu DJ, Xu GC, Xu XL, Xu L, Gu ZY, Qiu BJ. 2019. Influence of spray nozzle and spray volume on pesticide deposition and control effect in rice. *Journal of Plant Protection*, 46(2): 409–416 (in Chinese) [徐德进, 徐广春, 许小龙, 徐鹿, 顾中言, 邱白晶. 2019. 喷头和施药液量对水稻植株上农药沉积和药剂防治效果的影响. *植物保护学报*, 46(2): 409–416]
- Xue XY, Qin WC, Sun Z, Zhang SC, Zhou LX, Wu P. 2013. Effects of N-3 UAV spraying methods on the efficiency of insecticides against planthoppers and *Cnaphalocrocis medinalis*. *Journal of Plant Protection*, 40(3): 273–278 (in Chinese) [薛新宇, 秦维彩, 孙竹, 张宋超, 周立新, 吴萍. 2013. N-3型无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响. *植物保护学报*, 40(3): 273–278]
- Xun D, Zhang J, He KJ, Yang HN, Liu Y, Cao J, Zhou Q. 2015. Con-

- trol efficacies of TH80-1 plant protection UAV spraying method on main diseases and insect pests of rice. *Hunan Agricultural Sciences*, (8): 39-42 (in Chinese) [荀栋, 张兢, 何可佳, 杨浩娜, 刘洋, 曹佳, 周庆. 2015. TH80-1 植保无人机施药对水稻主要病虫害的防治效果研究. *湖南农业科学*, (8): 39-42]
- Yao AQ, Yang J. 2012. Conduction mode of pesticides in plant and pesticide-conduction biology. *China Plant Protection*, 32(10): 14-18 (in Chinese) [姚安庆, 杨健. 2012. 农药在植物体内的传导方式和农药传导生物学. *中国植保导刊*, 32(10): 14-18]
- Yuan HZ, Guo YW, Xue XY, Yan XJ, Chen C, Kong X, Wang M, Zhou Y. 2018a. The promotion and application of UAV to improve the utilization rate of pesticides in China. *Agricultural Engineering Technology*, 38(9): 46-50 (in Chinese) [袁会珠, 郭永旺, 薛新宇, 闫晓静, 陈昶, 孔肖, 王明, 周洋. 2018a. 植保无人飞机的推广应用对于提高我国农药利用率的作用. *农业工程技术*, 38(9): 46-50]
- Yuan HZ, Xue XY, Yan XJ, Qin WC, Kong X, Zhou YY, Wang M, Gao SC. 2018b. Applications and prospects in the unmanned aerial system for low-altitude and low-volume spray in crop protection. *Plant Protection*, 44(5): 152-158 (in Chinese) [袁会珠, 薛新宇, 闫晓静, 秦维彩, 孔肖, 周洋洋, 王明, 高赛超. 2018b. 植保无人飞机低空低容量喷雾技术应用与展望. *植物保护*, 44(5): 152-158]
- Yuan HZ, Yang DB, Yan XJ, Zhang LN. 2011. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application. *Plant Protection*, 37(5): 14-20 (in Chinese) [袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 张琳娜. 2011. 农药有效利用率与喷雾技术优化. *植物保护*, 37(5): 14-20]
- Zhan GX, Kang LF, Duanmu HL. 2020. The testing and analysis on flight prevention effect of rice pests and diseases of Jifei P20 UAV. *Agricultural Equipment & Technology*, 46(1): 18-19 (in Chinese) [詹国祥, 康丽芳, 端木和林. 2020. 极飞 P20 无人机水稻病虫害飞防效果试验与分析. *农业装备技术*, 46(1): 18-19]
- Zhang K, Feng TZ, Xiong C, Zhang Z. 2019. Top design and progress in research and development of synthesis technique for reduction and synergy of chemical fertilizers and pesticides in China. *Journal of Plant Protection*, 46(5): 943-953 (in Chinese) [张凯, 冯推紫, 熊超, 张昭. 2019. 我国化学肥料和农药减施增效综合技术研发顶层布局与实施进展. *植物保护学报*, 46(5): 943-953]

(责任编辑:张俊芳)