

多旋翼植保无人机喷施新烟碱类杀虫剂 对蜜蜂的飘移风险

闫晓静 石鑫 刘晓慧 杜亚辉 杨代斌 袁会珠*

(中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193)

摘要:为明确植保无人机喷施新烟碱类杀虫剂对非靶标生物蜜蜂的飘移风险,在田间试验场景下,比较分析多旋翼植保无人机和背负式电动喷雾器喷施新烟碱类杀虫剂时的雾滴飘移量及对蜜蜂的影响。结果表明:应用背负式电动喷雾器和多旋翼植保无人机进行施药作业时,距离施药区下风向5 m处的雾滴飘移率分别为0.50%和23.98%;而多旋翼植保无人机施药时,即使距离施药区下风向17 m处的雾滴飘移率仍高达2.79%,且多旋翼植保无人机施药时的飘移总量显著高于背负式电动喷雾器。喷施新烟碱类杀虫剂时,应用背负式电动喷雾器作业时距离下风向5 m处的蜜蜂在施药后1 d内的死亡数量为75头,分别是距离下风向17 m处和对照组的2.4倍和1.8倍,施药后2~8 d内蜜蜂的死亡数量与对照组无明显差异;应用多旋翼植保无人机作业时距离下风向5 m处的蜜蜂在施药后1 d内的死亡数量为4 721头,分别是距离下风向17 m、29 m处和对照组的3.0倍、6.1倍和112.4倍,施药后2~8 d内蜜蜂的死亡数量明显降低,但距离施药区较近的蜜蜂其死亡数量明显高于对照组,表明多旋翼植保无人机喷施新烟碱类杀虫剂对蜜蜂存在较高的飘移风险。

关键词: 植保无人机; 喷雾飘移; 新烟碱类杀虫剂; 蜜蜂

The spray drift risk of plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) spraying neonicotinoid pesticides to honey bees

Yan Xiaojing Shi Xi Liu Xiaohui Du Yahui Yang Daibin Yuan Huizhu*

(Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to clarify the drift risk of plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) spraying neonicotinoid insecticides to honey bees, the amount of droplet drift of insecticides and the mortality of bees were compared between multi-rotor plant protection UAVs and knapsack electric sprayers. The results showed that the droplet drift rates at 5 m downwind were 0.50% and 23.98%, respectively, when the knapsack electric sprayer and the multi-rotor plant protection UAV were used for pesticide application under a field test scenario. Meanwhile, the droplet drift rate at 17 m was still as high as 2.79%, when the multi-rotor plant protection UAV was applied. The total drift of the multi-rotor plant protection UAV was significantly higher than that of the knapsack electric sprayer during pesticide application. When the neonicotinoid insecticide was applied by plant protection UAV and knapsack sprayer, the number of bee deaths 5 m away from the spray area of the knapsack electric sprayer was 75 in one day after the treatment, which was 2.4 times and 1.8 times that at 17 m and in the control group. The number of bee deaths within 2–8 days after the treatment was not significantly different from that of the control group; the number of bee deaths 5 m away from the spray area of the plant protection UAV was

4 721, which were 3.0 times, 6.1 times and 112.4 times that at 17 m, 29 m and in the control group, respectively. The number of bee deaths within 2–8 days after the treatment was obviously reduced; however, the number of deaths of bee colonies closer to the spray area was still obviously higher than that of the control group. The results indicated that the multi-rotor plant protection UAV had a higher spray drift risk when applying neonicotinoid insecticides.

Key words: plant protection unmanned aerial vehicle (UAV); spray drift; neonicotinoid; honey bee

蜜蜂作为一种极具经济价值和生态价值的传粉昆虫,对农业生产和维护生态系统的生物多样性具有重要而深远的意义(Klein et al., 2007; Ollerton et al., 2011)。近年来,欧美国家的部分地区相继出现蜂群数量减少的现象,尤其是2006年冬蜂群衰竭失调症的暴发引起了社会各界的高度关注(Johnson, 2007)。研究发现农药尤其是新烟碱类农药的大量使用是导致蜂群衰竭失调症的一个重要原因(Whitehorn et al., 2012)。高剂量新烟碱类杀虫剂会造成蜜蜂急性中毒死亡,低剂量新烟碱类杀虫剂虽未造成蜜蜂直接死亡,但会显著影响其生殖、生长发育、觅食和归巢能力,最终导致蜜蜂种群显著减少(Dively & Kamel, 2012; Goulson, 2013)。

鉴于蜜蜂具有重要的生态价值以及新烟碱类杀虫剂对其带来的巨大影响,各国学者都积极开展了施用新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的风险评估。新烟碱类杀虫剂自20世纪90年代投放市场以来,以其对刺吸式口器害虫优异的防效而得到广泛应用。目前已经有11个有效成分被全球120多个国家登记使用,涉及作物多达1 000多种(Jeschke et al., 2011)。我国新烟碱类杀虫剂登记产品共有2 076个,其中原药有174个,制剂有1 902个;其中吡虫啉的登记产品数量最多,占新烟碱类农药登记总数的57%,其次是啉虫脒和噻虫嗪;在登记的新烟碱类农药制剂中通过喷雾方式施药的数量占登记总数的92.8%(朴秀英等, 2015)。蜜蜂通过直接接触药剂喷雾过程中的雾滴,接触喷洒过药剂的土壤、植物,吸入被污染的空气等途径受到新烟碱类药剂的影响。在对全球蜂蜜样品进行残留测定,发现75%的蜂蜜中至少含有新烟碱杀虫剂吡虫啉、噻虫啉、噻虫嗪、啉虫脒和噻虫胺中的1种,45%的样品含有2种或2种以上(Mitchell et al., 2017)。新烟碱类杀虫剂被广泛应用于茎叶喷雾、种子和土壤处理,用作种衣剂时,花蜜中的药剂残留量为1.0~8.6 ng/g,花粉中的药剂残留量为1~51 ng/g;用于土壤处理时药剂残留量会更高,花蜜中的药剂残留量为1~23 ng/g,花粉中的药剂残留量为9~66 ng/g(Goulson, 2013);而茎叶喷雾其残留

量最高,如在南瓜叶面施药后,花粉中可检测出约36~147 ng/g 呋虫胺和61~127 ng/g 噻虫嗪,花蜜中可检测出5~11 ng/g 呋虫胺和6~9 ng/g 噻虫嗪(Dively & Kamel, 2012)。由此可见,通过茎叶喷雾新烟碱类杀虫剂对蜜蜂具有更高的风险。

随着植保作业方式的改变,植保无人机在我国迅速发展,目前全国涉足植保无人机制造和植保服务的企业达200多家,2019年我国植保无人机保有量达到5万架,作业面积达0.3亿hm²次,位居世界第一(袁会珠等, 2018; 兰玉彬等, 2019)。相对于地面施药机械,植保无人机施药时飞行速度快,距离作物冠层高,喷雾雾滴粒径小,且目前缺乏航空植保专用剂型,喷施的剂型多为登记用于地面施药器械的常规剂型,因此植保无人机施药势必带来比地面施药器械更为严重的喷雾飘移风险(王潇楠, 2017; Brown & Giles, 2018; Wang et al., 2018a)。因此,植保无人机在我国的广泛应用,引发了关于植保无人机喷施新烟碱类杀虫剂是否会对蜜蜂带来更大风险的疑问和思考。本研究依据喷雾飘移田间测试国际标准ISO 22866和蜜蜂风险评估方法,比较分析多旋翼植保无人机和背负式电动喷雾器喷施新烟碱类杀虫剂时的雾滴飘移量及对蜜蜂的影响,评估植保无人机施药对蜜蜂的飘移风险,以期应用植保无人机喷施新烟碱类杀虫剂提供参考依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

供试蜜蜂和蜜源植物:意大利蜜蜂 *Apis mellifera ligustica* 由河南省新乡市蜜蜂合作社提供,每个蜂箱有4个巢脾,共计约10 000头蜜蜂;孔雀草 *Tagetes patula* 和醉蝶花 *Cleome spinosa* 购于河南省郑州市花卉市场。

药剂及试剂:22%噻虫·高氯氟(thiamethoxam·lambda-cyhalothrin)微囊悬浮剂,先正达南通作物保护有限公司;荧光剂 Helio SC500,先正达(中国)投资有限公司;其余试剂均为国产分析纯。

仪器:大疆 MG-1P RTK 电动多旋翼植保无人

机,携带4个喷头,喷头型号为XR11001VS,深圳市大疆创新科技有限公司;Agrolex Sprayer Jacto HD400背负式电动喷雾器,携带2个圆锥雾喷头,喷头型号为JHC8002,新加坡利农私人有限公司;Kestrel 5000气象仪,北京金仕特仪器仪表有限公司;Flex Station3全波长扫描多功能读数仪,美谷分子仪器有限公司;长4 m×宽30 m×高2.5 m防虫网棚,长沙市望城区星辰筛网建材商行。

1.2 方法

1.2.1 试验小区及施药方法设计

设置蜜蜂半田间试验场景。根据河南省当地9月的盛行风向,在施药飘移区的不同距离处分别设置1个4 m×30 m的花卉种植区,每个花卉种植区内又分为4 m×4 m的3个小区,小区之间相隔距离为8 m,花卉种植株距12 cm,行距30 cm。每个小区中种植醉蝶花13行×1株=13株,橙色孔雀草6行×32株=192株,黄色孔雀草7行×32株=224株,每个花卉种植区共种植1 287株。植保无人机施药飘移区共设置3个花卉种植区,分别在距离施药区域边界的5、17和29 m处(图1-a);背负式电动喷雾器施药飘移区共设置2个花卉种植区,分别在距离施药区域边界的5 m和17 m处(图1-b);在远离施药区400 m的区域设置2个同样的花卉种植区作为空白对照。首先将22%噻虫·高氯氟微囊悬浮剂按照推荐用量150 mL/hm²配制进行喷施,其中按照体积比0.1%添加荧光剂Helio SC500。施药前垂直于航向在花卉

种植区中间布放3排直径为9 cm的滤纸,每排3张,每张滤纸间距为1 m,滤纸距离施药区边界的距离分别为5、6、7、17、18、19、29、30和31 m。然后分别在植保无人机处理区和手动喷雾器处理区施药,施药结束后等待5 min,待滤纸上的雾滴全部晾干后,按顺序装入自封袋内,避光保存。

植保无人机施药小区大小为40 m×60 m,施药前1 d利用遥控器规划模式记录施药区域,施药液量为15 L/hm²,作业时飞行高度为4.5 m,喷幅为4 m,采用全自主作业模式,全程共包含10个喷幅;施药前装满10 L药箱,校准喷头流量,流量为1.44 L/min;风向与航线的夹角在90°±30°之间,待风向达到要求并稳定后,一键起飞无人机进行施药,喷雾结束后使用深色离心管收集喷雾母液。地面喷雾器对照小区大小为4 m×60 m,用背负式电动喷雾器进行喷雾处理,作业高度为1.2 m,施药液量为225 L/hm²,流量为0.83 L/min,喷幅为3 m,喷雾结束后使用深色离心管收集喷雾母液。

试验期间利用手持气象站记录每次施药时的风速、风向和相对温湿度,气象仪放置高度与实际雾滴释放高度保持同一水平,数据存贮间隔时间为2 s。每次喷雾期间,环境风向和喷雾航线的夹角呈90°±30°,多旋翼植保无人机施药时风速为1.0~2.2 m/s,温度为28.0℃,相对湿度为54%~59%;背负式电动喷雾其施药时风速为0.5~1.5 m/s,温度为29.8℃,相对湿度为55%~57%。

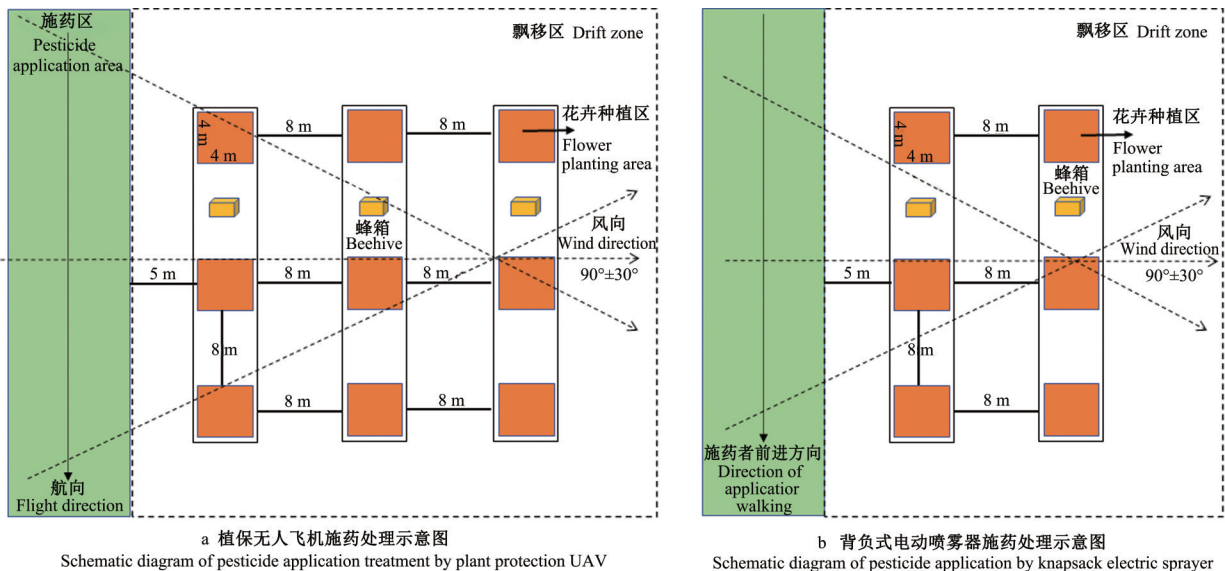


图1 蜜蜂半田间试验设计图
Fig. 1 Design of semi-field test

1.2.2 施药雾滴飘移沉积量及飘移率的测定

将1.2.1中收集的样品带回实验室后进行处理,

在装有滤纸的自封袋中加入10 mL异丙醇并振荡洗涤30 min至荧光剂完全洗脱后,应用全波长扫描多

功能读数仪测定样品洗脱液的荧光值,仪器参数设置为:激发波长 350 nm,吸收波长 420 nm。根据 ISO 22866 标准,计算单位面积的药液雾滴沉积量 β_d

和雾滴飘移率 λ 。
$$\beta_d = \frac{(\rho_{sa} - \rho_b) \times F_c \times V_d}{\rho_{sp} \times A_c}$$
式中 ρ_{sa} 为

洗脱液的荧光仪示数; ρ_b 为空白采样器的荧光仪示数; F_c 为荧光仪示数与荧光剂浓度的关系系数; V_d 为加入洗脱液的体积; ρ_{sp} 为喷雾液中荧光剂浓度; A_c 为雾滴收集器面积。 $\lambda = \beta_d / (\beta_d / 100) \times 100\%$,式中 β_v 为施药液量, $\beta_v = Q / (10w \cdot s)$,其中 Q 为喷雾流量, w 为喷嘴幅; s 为飞行速度。

1.2.3 施药后蜜蜂死亡率的测定

施药结束后 30 min 内在花卉种植区架设好防虫网,每个小区架设 1 个规格为长 4 m×宽 30 m×高 2.5 m 的防虫网棚,然后放置 1 箱蜜蜂于防虫网棚内,让蜜蜂能在小区内自由飞舞采蜜。植保无人机施药飘移区共搭建 3 个防虫网棚,背负式手动喷雾器施药飘移区域共搭建 2 个防虫网棚,在远离施药区 400 m 的空白对照区共搭建 2 个防虫网棚。施药后 1、2、4、6、8 和 16 d 分别记录不同网棚内蜜蜂的死亡数量并计算死亡率(施药当天设为 0 d)。

1.3 数据分析

试验数据应用 Office 2019 软件进行整理,应用 SPSS 23 软件进行统计分析,采用独立样本 t 检验法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同植保机械施药时的下风向雾滴飘移特性

多旋翼植保无人机与背负式电动喷雾器施药时的雾滴飘移量随飘移距离的增加而逐渐减少,且植保无人机施药时的飘移总量显著高于背负式电动喷雾器(图 2)。应用背负式电动喷雾器施药时,距施药区下风向 5 m 处的雾滴沉积量为 0.002 2 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,雾滴飘移率为 0.50%,表明其农药飘移主要集中在距施药区 5 m 以内的区域;应用多旋翼植保无人机施药时,在距施药区下风向 5 m 处的雾滴沉积量为 0.107 9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,雾滴飘移率为 23.98%,距施药区下风向 17 m 处的雾滴沉积量为 0.012 5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,雾滴飘移率为 2.79%,距施药区下风向 18 m 处的雾滴沉积量为 0.001 6 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,雾滴飘移率为 0.35%,最远可在下风向 31 m 处检测到飘移的雾滴,表明其农药飘移主要集中在距施药区 17 m 以内的区域。

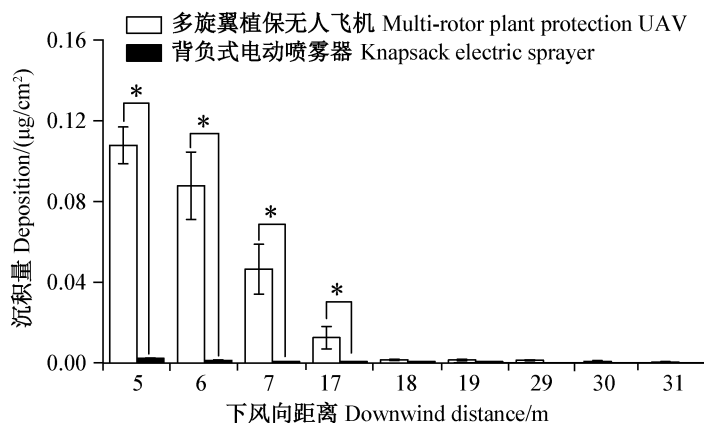


图 2 不同植保机械施药时的下风向雾滴飘移沉积量

Fig. 2 The depositions of droplet drift of different plant protection machines when applying pesticides

图中数据为平均数±标准差。*表示 2 个处理之间经独立样本 t 检验法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SD. * indicates significant difference between the two treatments at $P < 0.05$ level by independent-samples t test.

2.2 不同施药方式对蜜蜂的影响

应用植保无人机和背负式电动喷雾器施药后 1~8 d 内蜜蜂死亡数量在药后 1 d 均达到峰值,药后 2~8 d 蜜蜂死亡数量明显下降,对比不同距离的蜜蜂死亡数量可以发现,距离施药区越近的蜂箱,蜜蜂的死亡数量越大(表 1)。应用背负式电动喷雾器施药后 1 d,距离下风向 5 m 处蜜蜂的死亡数量为 75 头,分别是距离下风向 17 m 处和对照组的 2.4 倍和 1.8 倍,

且药后 2~8 d 蜜蜂的死亡数量明显降低;应用植保无人机施药后 1 d,距离下风向 5 m 处蜜蜂的死亡数量为 4 721 头,分别是距离下风向 17 m、29 m 处和对照组蜜蜂死亡数量的 3.0 倍、6.1 倍和 112.4 倍,药后 2~8 d 蜜蜂的死亡数量明显降低,但距离施药区越近的蜂群,其死亡数量越高,表明应用植保无人机喷施新烟碱类杀虫剂较背负式电动喷雾器施药对蜜蜂有更大的飘移风险。

表1 植保无人机和背负式电动喷雾器施药后蜜蜂的死亡数量

Table 1 The number of dead bees after pesticide application by using multi-rotor plant protection UAV and knapsack electric sprayer

施药器械 Equipment	距离 Distance/m	施药后不同时间蜜蜂死亡数量 Number of bee deaths at different time points after pesticide application				
		1 d	2 d	3 d	4 d	8 d
多旋翼植保无人机 Multi-rotor plant protection UAV	5	4 721	137	95	39	31
	17	1 571	170	69	13	6
	29	778	40	72	0	1
背负式电动喷雾器 Knapsack electric sprayer	5	75	13	5	16	1
	17	31	2	2	2	2
空白对照 Blank control	400	42	10	12	4	5

3 讨论

农业航空植保在实现人机分离作业,避免施药人员农药中毒,降低劳动强度,提高植保作业效率,达到减少农药使用量和提高农药利用率的同时也给蜜蜂的生存环境带来了一定威胁。国际经济合作发展组织于1998年颁布了关于农药等有毒化学品对蜜蜂的急性经口、接触毒性试验准则(OECD, 1998a, b)。欧洲和地中海植物保护组织于2003年颁布了植物保护产品环境风险评估指南(EPPO, 2003)。美国国家环保局于2014年6月颁布了农药对蜜蜂的风险评价指南(USEPA, 2014)。欧洲食品安全局颁布了一系列用于评估不同施药方式下农药对蜜蜂风险评估的方法(EFSA, 2013; 2015)。以上蜜蜂风险评估方法主要研究施药区药剂残留量对蜜蜂的危害,而不涉及飘移区药剂残留对蜜蜂的影响。农药施药飘移对生态系统造成的影响较为复杂,影响因素众多,而目前我国对植保无人机施药飘移的研究还处于起步阶段,只是针对风速、高度或助剂(何玲等, 2017; Wang et al., 2018a, b)等少数参数来研究其对药剂飘移量的影响。因此,在进行植保无人机喷雾飘移研究过程中,不仅仅要考虑不同条件下的药剂飘移量还要考虑药剂飘移对非靶标生物的影响。本研究以蜜蜂为指示生物,将不同施药方式下农药对蜜蜂的风险评估方法引入植保无人机施药飘移研究,从而提升了植保无人机施药飘移研究的理论性和应用性。

本研究结果显示,在距离施药区域400 m远的空白对照区,将蜂箱移入网笼1 d后,蜜蜂的死亡数量为42头,明显高于2~8 d内的蜜蜂死亡数量,这可能是由于生存空间的突然压缩,蜜蜂的觅食及归巢行为受阻,导致蜜蜂死亡数量较多,在此后的2~8 d调查时间内,蜜蜂逐渐适应新的环境,其死亡数逐渐降低,且趋于稳定,说明蜂群在此试验中是稳定和健

康的,本试验设计方法可行。多旋翼植保无人机和背负式电动喷雾器施药后距施药区下风向5 m处的雾滴沉积量分别为 $0.1079 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 和 $0.0022 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,蜜蜂的死亡数分别为4 721头和75头,植保无人机施药飘移量及其导致的蜜蜂死亡数量分别是背负式电动喷雾器施药处理的49.0倍和62.9倍。综合施药飘移量和蜜蜂死亡数量可以推断出背负式电动喷雾器的农药飘移主要集中在距施药区下风向5 m以内的区域,而多旋翼植保无人机的农药飘移主要集中在距施药区下风向17 m以内的区域。说明将农药对蜜蜂风险评估方法引入植保无人机施药飘移研究是可行而有效的。

受施药微环境(风速、温度和湿度)和作业参数等多因素影响,农药雾滴的飘移是一个复杂的过程。因此,在进行植保无人机喷雾飘移对蜜蜂的风险研究中,不仅要关注药剂飘移区药剂残留量对蜜蜂的风险,还要统筹考虑喷雾飘移各影响因素对蜜蜂风险水平的贡献值,才能建立起植保无人机施药飘移对蜜蜂风险评估的系统方法。

致谢:中国农业科学院植物保护研究所新乡试验基地李松科为本试验提供了支持与帮助,特此致谢!

参 考 文 献 (References)

- Brown CR, Giles DK. 2018. Measurement of pesticide drift from unmanned aerial vehicle application to a vineyard. *Transactions of the ASABE*, 61(5): 1539–1546
- Dively GP, Kamel A. 2012. Insecticide residues in pollen and nectar of a cucurbit crop and their potential exposure to pollinators. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(18): 4449–4456
- EFSA (European Food Safety Authority). 2013. Guidance on the risk assessment of plant protection products on bees (*Apis mellifera*, *Bombus* spp. and solitary bees). *EFSA Journal*, 11(7): 3295
- EFSA (European Food Safety Authority). 2015. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment for bees for the active substance imidacloprid considering all uses other than seed treat-

- ments and granules. *EFSA Journal*, 13(8): 4211
- EPPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2003. Environmental risk assessment scheme for plant protection products. *EPPPO Bulletin*, 33(1): 131–139
- Goulson D. 2013. An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4): 977–987
- 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]
- Jeschke P, Nauen R, Schindler M, Elbert A. 2011. Overview of the status and global strategy for neonicotinoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(7): 2897–2908
- Johnson R. 2007. Recent honey bee colony declines. Washington: Congressional Research Service Reports for Congress, RL33938
- Klein AM, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tscharntke T. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society, Series B: Biological Sciences*, 274(1608): 303–313
- 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]
- Mitchell EAD, Mulhauser B, Mulot M, Mutabazi A, Glauser G, Aebi A. 2017. A worldwide survey of neonicotinoids in honey. *Science*, 358(6359): 109–111
- OECD (Organization of Economic Cooperation and Development). 1998a. Test no. 213: honeybees, acute oral toxicity test. OECD guidelines for the testing of chemical. Paris, France: OECD Publishing
- OECD (Organization of Economic Cooperation and Development). 1998b. Test no. 214: honeybees, acute contact toxicity test. OECD guidelines for the testing of chemicals. Paris, France: OECD Publishing
- Ollerton J, Winfree R, Tarrant S. 2011. How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120(3): 321–326
- Piao XY, Ji LL, Lin RH, Zong FL, Ye JM. 2015. Analysis on the status of pesticide registration and management of neonicotinoids. *China Plant Protection*, 35(3): 70–74 (in Chinese) [朴秀英, 嵇莉莉, 林荣华, 宗伏霖, 叶纪明. 2015. 新烟碱类杀虫剂登记与管理现状分析. *中国植保导刊*, 35(3): 70–74]
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2014. Guidance for assessing pesticide risks to bees. Washington DC: USEPA
- Wang J, Lan YB, Zhang HH, Zhang YL, Deng JJ. 2018a. Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(6): 5–12
- Wang XN. 2017. Study on spray drift and anti-drift method. Ph. D thesis. Beijing: China Agricultural University (in Chinese) [王潇楠. 2017. 农药雾滴飘移及减飘方法研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学]
- Wang XN, He XK, Song JL, Wang ZC, Wang CL, Wang SL, Wu RC, Meng YH. 2018b. Drift potential of UAV with adjuvants in aerial applications. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(5): 54–58
- Whitehorn PR, O'Connor S, Wackers FL, Goulson D. 2012. Neonicotinoid pesticide reduces bumble bee colony growth and queen production. *Science*, 336(6079): 351–352
- Yuan HZ, Xue XY, Yan XJ, Qin WC, Kong X, Zhou YY, Wang M, Gao SC. 2018. Application 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. 2018. 植保无人机低空低容量喷雾技术应用与展望. *植物保护*, 44(5): 152–158]

(责任编辑:李美娟)