



兰玉彬, 彭 瑾, 金 济. 农药喷雾粒径的研究现状与发展[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 1-9.

农药喷雾粒径的研究现状与发展

兰玉彬, 彭 瑾, 金 济

(国际农业航空施药技术联合实验室/农业航空应用技术国际联合实验室/
广东省农业航空应用工程技术研究中心/华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】农药的不合理使用严重威胁着我国农产品质量和农业生态环境安全。优化农药喷施方式, 提高农药利用率与喷施效果, 实现农业生产的良好发展已成为迫切需要解决的问题。【方法】从农药雾滴粒径的检测方法出发, 介绍了雾滴粒径检测技术的发展、以及雾滴尺寸与农药防治效果的关系; 对农药喷雾最佳粒径的研究进行了分析; 总结了农药喷雾最佳粒径的研究以及所存在的不足, 并对农药喷雾粒径的研究进行了展望。【结果】人工表面得到的最佳粒径与真实的喷雾最佳粒径具有明显的差异性, 人工表面通常倾向于收集大液滴; 细小雾滴大量漂移的发生不存在必然性; 同一靶标不同时期所对应的喷雾最佳粒径是变化的; 小雾滴更容易吸附在靶标表面, 能穿透植物冠层杀死冠层内部的害虫。【结论】不同农药、不同靶标、不同药液浓度甚至害虫的不同时期, 农药的最佳喷雾粒径大不相同。今后应加强农药雾滴最佳粒径的理论研究, 从宏观和微观多角度综合分析, 开发精准可控变粒径喷嘴。

关键词: 农药喷雾; 雾滴粒径; 检测方法; 生物最佳粒径; 精准施药; 农业航空
中图分类号: S2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2016)06-0001-09

Research status and development of pesticide spraying droplet size

LAN Yubin, PENG Jin, JIN Ji

(International Laboratory of Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology/International Laboratory of Agriculture Aviation Applied Technology/Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application of Guangdong Province/College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】Excessive application of pesticide has adverse impact on the quality and safety of agricultural products and ecological environment in China. It has become critical to optimize the pesticide spraying approach and improve the pesticide utilization and spraying effect. 【Method】Droplet size detection technology development and the relationship between droplet size and control effect were introduced based on the investigation on present testing methods of pesticide droplet size. The theory of optimum spraying droplet size was discussed. Method to determine optimum spraying droplet size and current research status were analyzed. Existing problems of optimum pesticide spraying droplet size were summarized. Suggestions were proposed for future research of spraying droplet size in agricultural aviation. 【Result】The optimum droplet size achieved from artificial surface is inconsistent with actual optimum size in real spraying operation. Artificial surfaces tend to collect only large droplets. Massive drift does not inevitably occur to small droplets. The optimum particle size of the spray is changing in different stages of the same target. A large number of experimental data have showed that small droplets were more easily adsorbed on the surface of target to kill pests by penetrating inside the plant canopy. 【Conclusion】The best spraying particle size varies very much for different pesticides, targets or liquid concentrations,

收稿日期: 2016-07-21 优先出版时间: 2016-10-24
优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20161024.1041.028.html>
作者简介: 兰玉彬(1961—), 男, 教授, 博士, E-mail: ylan@scau.edu.cn
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200700)

even in different growth periods of pests. In the future, theoretical study on optimum pesticide droplet size should be strengthened from multi-angle macroscopic and microscopic analysis. In addition, precision controllable nozzles with variable diameter must be developed for agricultural aviation applications.

Key words: pesticide spraying; droplet size; detection; biological optimum size; precision spraying; agricultural aviation

我国化肥、农药过量施用严重,由此引起的环境污染和农产品质量安全问题日趋突出,带来了一系列的环境和社会问题。2015年农业部召开部常务会议审议并原则通过《农药使用量零增长行动方案》,方案中强调,要按照转变农业发展方式、治理农业面源污染、实现农业节本增效的指导思想,知难而进,引导农民科学合理施肥施药,提高化肥、农药利用率,逐步实现化肥、农药使用量零增长。另外,农业部印发的《2015年种植业工作要点》也明确提出:实行农药减量控害节本增效,推进精准用药,实施病虫害统防统治,推进高效大中型药械替代低效小型药械,提高资源利用率,确保农药减量目标的实现。

农药的过量施用主要是由农药利用率偏低造成的,有关调查显示我国农药利用率仅为35%,施用过程中大部分农药由于跑冒滴漏,流失进入地表径流,污染土壤和水环境,据有关调查显示,我国受农药污染的耕地面积高达1 300万~1 600万 hm^2 ^[1]。另外,极低的农药利用率所导致的农药滥用,也大大增加了农药的残留,严重威胁着农产品质量安全与人类的健康。精准施药技术是降低农药残留的有效手段^[2]。而农业航空施药技术是实现精准施药技术很好的载体,它具有作业速度快、效率高、施药均匀等优点^[3]。随着农业航空在植保喷施作业中的推广运用,农药的利用率大幅度提升,但仍存在由于雾滴漂移及药液流失等造成的农药浪费及药害等问题^[4]。无人机喷施作业能够有效地结合超低容量喷雾技术,大幅度提高农药利用率,达到降低农药施用量的目的,这其中喷雾雾滴粒径是关键,它直接关乎航空喷雾的效果及无人机的作业效果^[5]。农药喷施过程中,如果喷雾雾滴的粒径过小,在自然风与空气动力的影响下,可能会发生大量漂移,导致空气污染,并对邻近农作物造成药害,带来巨大的经济损失;如果雾滴粒径过大,农药沉降到农作物表面后容易汇聚流失,污染水土,且粗大的雾滴降低了农药雾滴的覆盖密度与均匀度,将大大降低农药的喷施效果。因此,农药的喷雾粒径是喷雾质量中至关重要的一个因素,也是影响农药喷施效果与效率的一个关键因素。

农药雾化后可形成不同粒径大小的液滴,有关研究表明,对于某种特定的生物体或生物体的不同

部位,只有一定粒度的雾滴能被捕获并产生有效的药效。20世纪50年代Hadaway和Barlow^[6]曾在风洞试验中发现,采蝇成虫捕获20~60 μm 雾滴的能力比植物枝条和叶片强得多,在一定的风速下甚至能使雾滴只击中虫体而不沉积到枝条上。随后的大量试验也证实了生物体的特定部位对雾滴有明显的选择捕获能力^[7-9]。至70年代Himel和UK将其总结为一个新理论——生物最佳粒径理论(简称BODS理论),该理论认为不同的生物靶标捕获的雾滴粒径范围不同,只有在最佳粒径范围内,靶标捕获的雾滴数量最多,防治效果也最佳。运用该理论,可根据有害生物的特征设计一定的雾滴粒度和喷洒技术,达到大幅度减少农药用量的效果。本文从农药雾滴粒径的检测方法出发,介绍了国内外雾滴粒径检测技术的发展以及雾滴尺寸与农药防治效果的关系,并对农药喷雾最佳粒径的研究进行了探讨。

1 农药雾滴尺寸的测定

1.1 雾滴粒径的表示方法

农药使用过程中,液滴经过喷雾器械雾化部件的作用而分散。从喷头喷出的农药雾滴并非均匀一致,而是有大有小,呈一定的正态分布^[10]。雾滴粒径(雾滴直径, μm)的表示方法有4种:体积中值粒径、数量中值粒径、质量中值粒径和沙脱平均粒径,常用体积中值粒径和数量中值粒径表示雾滴粒径。

体积中值粒径(Volume median diameter, VMD):在一次喷雾中,将全部雾滴的体积从小到大顺序累加,当累加值等于全部雾滴体积的50%时,所对应的雾滴粒径为体积中值粒径,简称体积中径(图1)。体积中径能表达绝大部分药液的粒径范围及其适用性,因此喷雾中大多用体积中径来表达雾滴群的大小,并作为选用喷头的依据。

数量中值粒径(Number median diameter, NMD):在一次喷雾中,将全部雾滴从小到大顺序累加,当累加的雾滴数目为雾滴总数的50%时,所对应的雾滴粒径为数量中值粒径,简称数量中径(图1)。如果雾滴群中细小雾滴数量较多,将使雾滴中径变小,但数量较多的细小雾滴总量在总施药液量中只占非常小的比例,因此数量中径不能正确地反映大

部分药液的粒径范围及其适用性。

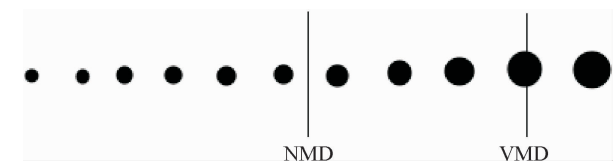


图1 雾滴的数量中值粒径(NMD)和体积中值粒径(VMD)示意图^[10]

Fig.1 The diagram of NMD and VMD of droplets

1.2 雾滴粒径的测定方法

对于雾滴尺寸测定方法的研究,20世纪40年代初,有研究者开始利用斑点法来直接测量雾滴的大小和分布情况,此方法是利用喷出的雾滴沉积在同一吸收表面上产生的斑点,对这些斑点进行测量,再通过雾滴斑点与雾滴真实尺寸之间的转换关系来推算出雾滴的直径^[11]。Tate^[12]考虑到雾滴微小而极易蒸发提出了利用沉浸技术来收集雾滴,由于水滴与低密度的油液具有不相溶性,水滴落入油液中会被油液包围从而避免蒸发,由于水滴表面具有张力,因此可以利用显微镜来进行雾滴大小的测量,工作量非常大,且准确性较差。Hoffmann^[13]设计了一种改进后的直接测量雾滴大小和分布的方法,称为摄影法,这种方法是通过雾滴进行摄影,然后在专业显微镜下进行人工判别解读,从而得到雾滴的大小及分布情况,其优点是具有很高的分辨率,但过程复杂、试验周期长同时需要专业人员参与,劳动量极大,很少使用。

随着电子技术的发展,机器视觉在雾滴尺寸测量中有了应用,从而使得雾滴粒径的测量方法有了很大的改进。Evans研制了一套用于表征荧光微粒喷洒沉积的机器视觉系统,采用图像处理算法求出沉积特性并测量被沉积覆盖目标的面积,发现用图像分析测得的被覆盖面积的百分数和用荧光计测得的物质沉积量之间有高度相关性^[14]。Jiang等^[15]研制了一种计算机视觉系统,该系统以自动化方式将样本装在合适的位置,对准照相机聚焦,获取图像并分析这些图像,在获取某一图像后,可以用常规的图像处理与分析算法提取与喷洒覆盖面、示踪剂强度、液滴形状和液滴尺寸分布有关的特性参数。Sudheera等^[16]利用CCD摄像机和图像处理技术对灌溉喷头水滴直径进行了测量。Moor等^[17]通过对水敏纸进行图像分析来评估果园喷雾机的雾滴分布,测量了雾滴的粒径、覆盖率、分布均匀性以及雾滴密度等。Salysni等^[18]在柑橘树试验田中利用油敏纸和水敏纸作为靶标,使用图像处理系统来分析估测喷雾器喷雾效果。Robert^[19]以水敏纸为采集样本,将人工观察与图像处理测量得到的雾滴覆盖率相比较

发现,当雾滴的覆盖率大于40%时,图像处理系统不是很有效;覆盖率在20%~40%时,相比于人工观察,图像处理系统会减少雾滴数。Sánchez-Hermosilla等^[20]利用自适应阈值的方法对水敏纸图像进行二值分割,通过CCD软件对雾滴的实际大小进行测量,然后再经过线性回归分析和描述统计学处理,可以降低操作者的主观因素、减少分割误差。利用图像处理的方法测定雾滴粒径,同时分析雾滴群的相关特性参数,方法简单、方便、快捷,但存在误差较大等问题,如用水敏纸进行雾滴粒径测量时不能解决雾滴重叠的问题。

国内在雾滴粒径测定及喷雾质量分析方面的研究工作起步较晚,但发展速度很快,这些技术最初主要应用于内燃机和流体机械的研究。段树林^[21]设计了以脉冲激光为光源测定喷雾粒度分布的显微摄影装置,并用该装置成功地测得了伞喷嘴嘴的燃油喷雾粒度场的时间特性和空间特性。郑加强^[22]通过油盘法采集雾滴,对计算机视觉测量雾滴尺寸进行了探索,建立了一种基于计算机视觉的雾滴尺寸测量方法,结果表明,基于计算机视觉的雾滴尺寸测量系统得到的雾滴尺寸信息与用PMS的激光图像化方法测量得到的结果非常接近,得到小于150 μm的雾滴总体积百分比相近,同时该系统测量获得的体积中径与喷雾系统公司提供的雾滴尺寸非常接近。商庆清等^[23]提出了利用雾滴影像反求确定雾滴直径的测定方法,通过显微镜、照相机或CCD镜头拍摄雾滴图像,利用计算机软件AutoCAD对图像进行标注,找出雾滴影像直径与雾滴实际直径之间的对应关系,再利用接口程序处理图形交换文件.dxf,生成雾滴直径数据文件,最后应用Excel进行统计分析,得出雾滴体积中径分布曲线。刘毓等^[24]通过对雾滴图像的可变二值化、边缘提取、对象标号等图像处理,可以对雾滴的面积率和雾滴的长轴进行自动计算和测量,但是不能解决部分雾滴的重叠问题。

为了更精准的测量雾滴尺寸与分布规律,人们发明了许多基于光学的测量系统。基于光学的测量系统能够更加精准、实时地测量雾滴粒径,获取雾滴群的相关特性参数,如雾滴的运动速度、粒径分布范围及各粒径所占比例等,甚至可以分析雾滴的动态过程。激光粒度仪(图2)就是其中代表,分散在液体中的颗粒受到激光的照射时会产生衍射现象,该衍射光通过富氏透镜后,在焦平面上形成“靶芯”状的衍射光环,光环的半径与颗粒的大小有关、光环的光强度与颗粒的多少有关,通过放置在焦平面上的环型光电接受器阵列,就可以接受到激光对不同粒径颗粒的衍射信号或光散射信号。这种仪器测量精度较高,由于采用激光技术对雾滴进行非接触式测

量,测量误差低,当雾滴直径为 1 μm 时,误差不大于 4%,测量值几乎无需修正;测量过程简单、快速,对空气中雾滴的测量时间不超过几秒,测量的结果经计算机处理后可以迅速打印出来;测量范围广,可以

测量固体、悬浮液、乳状液等多种微小粒子尺寸,测量雾滴直径范围可达 0.5 ~ 3 500 μm。目前,国外研究的激光粒度仪还可以测量雾滴的速度^[25]。

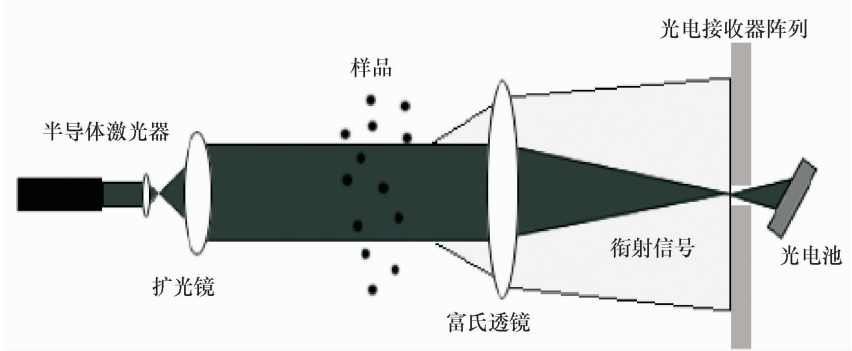


图2 激光粒度仪工作原理^[26]

Fig. 2 The operation principle of laser particle sizer

1.3 雾滴粒径大小的控制方法

在农药喷洒过程中,药液经过喷雾器械雾化部件的作用而分散,形成细小的雾滴颗粒。成雾过程中,喷嘴是农药雾化的核心部件,目前喷嘴类型主要有压力式喷嘴和离心喷嘴。压力式喷嘴主要是通过液泵产生的压力使药液通过喷嘴时在压力作用下破碎成细小液滴,其成雾粒径主要受喷嘴压力及孔径的影响;离心式喷嘴主要是通过电机带动喷嘴高速旋转,通过离心力将药液分散成细小雾滴颗粒,成雾粒径主要受电机电压的影响。离心喷嘴产生的雾滴粒径更小且更容易控制。携带压力式喷嘴的无人机目前还无法通过远程控制调节泵压来改变喷雾粒径。

2 农药喷雾最佳粒径

2.1 雾滴尺寸与农药防治效果

喷雾效果的好坏,与雾滴粒径的大小、雾滴的漂移及雾滴的沉降速度等因素有密切关系,雾滴粒径是农药喷雾技术中较易控制的重要参数,对喷雾效果起着决定性作用^[26-27]。选用适宜的雾滴粒径是用最少药量取得最好药效并减少环境污染的技术关键。雾滴粒径与雾滴覆盖密度、喷液量有密切关系,如图3所示,1个400 μm的粗大雾滴,变为200 μm的中等雾滴后,就变为了8个雾滴;雾滴粒径缩小到100 μm的细小雾滴后,就变64个雾滴。雾滴数量与雾滴粒径的变化关系为: $n = 6V / (\pi r^3)$,式中, n 为雾滴数量, r 为雾滴粒径, V 为药液量。可见,随着雾滴粒径的缩小,雾滴数目呈几何速度增加,随着雾滴数量的增加,农药击中靶标的概率显著增加,覆盖也更加均匀。

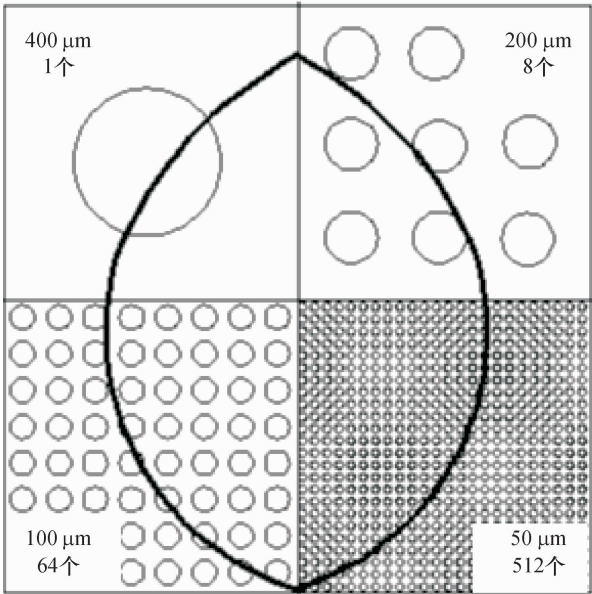


图3 雾滴粒径与雾滴覆盖密度关系^[10]

Fig. 3 The relationship between size and coverage density of droplets

雾滴粒径大,有较大的动能、易沉降、不易发生随风漂移及蒸发散失,但分布不均匀、附着性能差、易发生弹跳和滚落流失(称田内流失),造成药液流失,喷雾效果不佳,同时也会污染环境。雾滴粒径小,可以在作物表面得到很好的沉降和覆盖,细小雾滴对靶标的覆盖密度和覆盖均匀度远优于粗大雾滴,而且附着性能好,不易产生流失现象,农药利用率高,此外,细小雾滴有较好的穿透能力,能随气流深入植株冠层内部,沉积在果树或植株深处靶标正面或大雾滴不易沉积的背面,防治效果好。但太细的雾滴虽然覆盖度大、与靶标接触面大,但受气流影响大,易发生漂移,污染环境,还可能对相邻区域农

作物造成严重药害^[27]。小雾滴可以提高药效的原因主要是:小雾滴提高了雾滴对作物冠层的穿透力;小雾滴可以提供最佳的碰撞几率;增加了叶片上沉降的均匀性;提高了在不易润湿叶片表面的滞留能力;对于在叶组织中传导性较差的药剂,提高了其生物学反应效率。但是要使雾滴靠近目标或沉降在目标物上,还要有一定的质量。所以,一方面喷雾雾滴要尽可能小,使单位容积产生最大数量的雾滴,获得对目标物表面的最大覆盖度及渗透性,防止其被先碰到的障碍物全部吸收掉;另一方面又要使雾滴尽可能地大,使它们具有能够撞击或沉积在靶标上的能力^[27]。最佳粒径就是要在大小雾滴中找到一个合适的平衡点,充分发挥粒径大小所带来的优势。因此,在选择农药喷雾技术中,应选择合适的雾滴粒径(即最佳粒径),在不造成环境污染的前提下,充分发挥细小雾滴的优势,减少漂移,减轻环境污染,提高对靶标的沉积量与覆盖率^[28],使药剂发挥最佳效果,有效防治病虫害。

2.2 喷雾最佳粒径与防治效果

2.2.1 人工表面测得的最佳粒径与真实喷雾最佳粒径存在差异 早期,喷雾的田间评价主要是基于在喷雾区设置大量的人工表面,如水敏纸,事实上在相邻叶片上的害虫死亡率与在人工表面上收集到的喷雾液滴的数量有关,但并不总是相关。人工表面通常倾向于收集较大的液滴(>100 μm),在生物靶标上收集到的喷雾液滴尺寸和数量,与相邻表面收集到的绝不是完全相同的。Hadaway 等^[6]发现,比起模拟的树枝和树叶,粒径小于 60 μm 的油状液滴更容易沉积到采蝇上。Barry 等^[29]使用荧光素进行试验发现,在玻璃板上的雾滴中有 40% 的粒径大于 33 μm,而在冷杉针叶和蚜虫幼虫上收集到的雾滴粒径主要为 15 μm 或者更小。在医学和兽医昆虫学方面,杀虫剂喷雾在大多数情况下主要是针对一些成虫,如蚊子、家蝇和采蝇。使用扫描电子显微镜在成年蚊子上所测得的大豆油滴的粒径主要在 2~16 μm 之间,而在载玻片上所收集到的雾滴有 67% 的粒径大于 16 μm^[30]。这些结果表明通过人工表面得到的最佳粒径与真实的生物最佳喷雾粒径不符。

2.2.2 细小雾滴并不一定会发生大量漂移 小于 90 μm 的雾滴通常被认为容易漂移而造成大气污染及药害, Himel^[30]进行森林喷施的试验结果表明,在云杉蚜虫和冷杉的关键部位上所收集到的喷雾液滴绝大部分粒径在 21~50 μm 之间、最大粒径达 350 μm、体积中径为 144 μm,说明粒径小于 100 μm 的小雾滴并没有大量飘走,而是沉积到了靶区内。UK^[31]在棉花上的试验结果表明,粒径为 20~200 μm 的雾滴在 1.5~3.5 m·s⁻¹ 的风速下的沉积与 Bache 等^[32]的湍流扩散模型相符。因此,普遍认为在作物

冠层,粒径大小在生物最佳粒径范围内的雾滴不会被风吹走。由于生物靶标大部分关键部位都受树冠保护,只有一定数量的小液滴游离在空中,有能力穿透植物冠层,到达植物的那些关键及隐藏部位,一旦进入植物冠层,粒径≥40 μm 的液滴就会沉积,这意味着对于生活在受植物冠层保护部位的害虫的生物最佳喷雾粒径一定小于 40 μm,如棉粉虱、稻飞虱等^[33-34]。Latta 等^[35]研究表明,DDT 对蚊子的毒性与喷雾液滴的粒径有关,最佳喷雾粒径为 10 μm 左右。袁会珠等^[36]的研究表明,农药雾滴在吊飞昆虫上的沉积量 1/2 在翅上,吹雾法喷雾(43 μm)药剂在黏虫上的沉积量是常规喷雾法(181 μm)的 1.49 倍,雾滴粒径对沉积量有较大影响。可见,细小雾滴并不一定会发生大量的漂移,而很有可能对防治效果起重要作用。

2.2.3 生物最佳粒径与防治效果 Bryant 等^[37]研究了苏云金芽孢杆菌雾滴粒径以及雾滴密度对舞毒蛾幼虫防治效果的影响,结果表明,相对于喷施体积中径≥150 μm 的雾滴,喷施更低剂量的 50~150 μm 的雾滴,对舞毒蛾具有相同的杀伤效果;致死剂量与雾滴粒径之间具有线性回归关系:LD₅₀ = 1.241 + 0.461 × 雾滴体积中径,随着雾滴中径的减小,LD₅₀也会随之减小,即小雾滴更有利于对舞毒蛾的防治。不同雾滴粒径条件下,剂量对数与死亡率对数之间的关系见图 4。对舞毒蛾 2、3 龄幼虫,雾滴粒径为 100 μm、雾滴密度为 5 和 10 个·cm⁻²时、死亡率大于 90%;对 4 龄幼虫,雾滴粒径为 200 和 300 μm 时,防治效果较粒径 100 μm 的更为显著;当雾滴密度为 1 个·cm⁻²、雾滴粒径为 100 μm 时,对于控制 3、4 龄幼虫是无效的。袁会珠等^[38]的研究也表明,最佳喷雾粒径不仅随害虫种类而变化,也会因病虫害的不同时期而异。

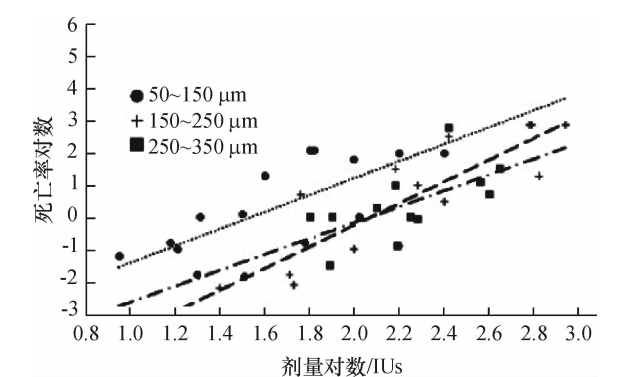


图4 苏云金芽孢杆菌对2龄舞毒蛾致死剂量与雾滴粒径之间的关系^[37]

Fig. 4 Relationships between *Bacillus thuringiensis* doses and mortality of second-instar gypsy moths at three different size classes

叶螨虫卵的影响发现,雾滴粒径(D)与产生50%死亡率的雾滴间距(LS_{50})具有正曲线相关关系: $LS_{50} = 14.48D^b$,式中, b 为常数,其值在0.65~1.44范围内,与药剂浓度具有U型关系。ALM等^[40]喷施联苯菊酯防治二斑叶螨时发现,虫卵的死亡率为80%时,雾滴粒径为120 μm 、雾滴密度为41个 $\cdot\text{cm}^{-2}$ 、施药量为3.7 L $\cdot\text{hm}^{-2}$,或雾滴粒径为200 μm 、雾滴密度为18个 $\cdot\text{cm}^{-2}$ 、施药量则需要7.5 L $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。表明一定雾滴粒径范围内,在施药量相同的情况下,小雾滴相比于大雾滴具有更好的防治效果, Sugiura等^[41]指出雾滴过大或过小都不利于对飞行昆虫的防治,只有当雾滴粒径与雾滴数目达到最优组合才会产生最好的防治效果。过小雾滴可能受昆虫表面的空气气流影响而改变运动轨迹,或受昆虫表面刚毛影响而不能有效地沉积到昆虫体表,进而影响防治效果。

2.2.4 针对特定靶标得到的最佳粒径 不同类型的除草剂在靶标作物上最合适的雾滴粒径不同^[41]。控制森林食叶虫最恰当的是使用体积中径为275 μm 的喷雾^[42]。对云杉蚜虫和云杉卷叶蛾的控制效果最好的是使用体积中径为300 μm 的喷雾^[43]。朱金文等^[44]研究用体积中径为149.5~233.7 μm 的雾滴喷雾,草甘膦在空心莲子草叶片上的沉积量在体积中径为157.3 μm 时最多,认为田间喷雾时采用小雾滴和低施药液量喷雾,可提高沉积量。Douglas^[45]探究了百草枯以及敌草快不同雾滴粒径对除草效果的影响发现,除草剂的最佳雾滴粒径为400~500 μm ,当雾滴粒径>1 000 μm 时,防效则会明显降低。Knoche^[46]指出在一定施药量的情况下,不论在何种雾滴粒径范围之内,防治效果都会随着雾滴粒径的减小而增加。

针对不同的生物靶标,不同类型的农药防治有害生物时的雾滴最佳粒径也不同,针对飞行和爬行状态害虫的杀虫剂最佳粒径分别为10~50和40~100 μm 、杀菌剂和除草剂最佳粒径分别为30~150和100~300 μm ^[10]。目前得到的生物最佳粒径雾滴谱较宽,此外,最佳粒径所针对的生物靶标存在争议,杀虫剂对应的最佳粒径都是就害虫而言的,诚然喷洒杀虫剂的目的是杀死害虫,其直接靶体也就是害虫本身,但在实际中,消灭害虫并不是通过将药液直接喷洒到害虫体上来达到目的,而主要是通过喷洒在作物叶片表面来间接杀死害虫,这样的话,发挥主要作用的是喷洒到间接生物靶体——作物叶片上的雾滴,而非直接喷洒到害虫体上的。

2.3 最佳粒径的判别方法

试验中确定农药喷雾的生物最佳粒径主要看农药雾滴在靶标上的沉积量(雾滴数量或质量)和覆盖密度等。某个粒径范围内的雾滴在生物靶标上的沉积量越多,说明该生物靶标对该粒径范围雾滴的吸附性越好,同时也说明该粒径雾滴更不易发生漂移。目前,测定农药喷雾最佳粒径的方法主要有水敏纸法、荧光粒子示踪法以及染色剂法等。

国内用得较多的是水敏纸法。将水敏纸布置在靶区内,用清水或农药对农作物进行喷施,雾滴落在水敏纸上会在纸上显现出深蓝色印痕。喷洒过后等待一定时间,收集水敏纸装入密封袋中。对收集的水敏纸进行扫描,通过软件分析扫描得到的图片就能得到雾滴粒径及各粒径雾滴的数量和雾滴密度。该方法简单易行,容易操作,是较为常用的方法。不过此方法施药前需在特定的位置设置水敏纸,并在施药后收回,比较费时;所测得的生物最佳粒径是基于人工表面得到的,是模拟靶标,并不能代表真正的植物叶面情况,所以这种方法的测定结果与实际叶面沉积情况存在较大误差。

基于自然生物表面的生物最佳粒径测定法——荧光粒子示踪法,是以荧光粒子为基础,已知数量的固态态、不溶、微尺寸的荧光粒子分散悬于一定体积的农药药剂或其他液体中,农药经过喷雾器械雾化成粒径不同的雾滴,每个雾滴的尺寸和它所包含的荧光粒子的数量具有统计相关性,且叶面的沉积量与荧光值存在一定的线性关系,因此通过用荧光分光光度计测量叶面沉积雾滴的荧光值可以确定其沉积量^[30]。该方法灵敏度极高且快速廉价,但是由于荧光物质本身的特殊性,这种方法极易受到环境因素的影响,如温度、光照强度等^[47],而且荧光值会随着时间变化而发生变化,因此试验后需抓紧检测荧光值。

染色剂法类似于荧光粒子示踪法,原理基本相同,不过染色剂法采用的试剂是在植物叶片上洗脱率较高的无毒或低毒染色剂。具体方法是将一定质量的染色剂加入清水或农药中,配成一定浓度的喷洒液,然后用此喷洒液对靶区进行喷洒作业,作业完毕后在靶区内采集叶片样本,对叶片上的沉积液进行洗脱,用可见光分光光度计检测洗脱液的吸光度,根据事先绘制好的标准曲线及测得的吸光度得到其沉积量。此方法主要是用于测定单位面积药液的沉积量,不能得到药液覆盖密度与均匀性,且灵敏度没有荧光粒子示踪法高,测得的误差较大,所以使用较少。

随着数字电子技术和模拟电子技术的发展,有关航空施药雾滴沉积地面实时传感技术的研究也开始出现。Salyani 等^[48]通过研究药液沉积量对导体电阻率的影响,设计了基于可变电阻器原理的药液沉积传感器,并建立了利用自来水做药液时的传感器输出电压与药液沉积量的关系模型。张瑞瑞等^[49]设计了雾滴沉积量检测系统,分析了基于变介电常数电容器原理传感器用于航空施药雾滴沉积量测量的可能性,并参照水敏纸图像处理方法对系统的测量数据进行了分析,结果显示检测系统在雾滴沉积均匀性、有效宽幅等测量方面具有较大的实用性,但在雾滴沉积量方面测量结果的精度不够理想。

3 结论

农业生产离不开农药,农药喷雾效果的好坏直接关系着植保作业效果的好坏及农作物产量与品质的高低。农药喷雾包含多个要素,主要包括喷雾的雾滴粒径、粒径谱范围、雾滴均匀度等^[41]。这些要素都是围绕雾滴粒径展开的,因此,要获得最佳的喷雾质量,首先就是要寻找最佳的喷雾粒径。农药喷雾液滴的最佳粒径,是所有影响喷雾效率的因素中最重要的一个因素。从前人的研究可以看出,试验得到的农药喷雾最佳粒径结果参差不齐各有差异,这些结果受到试验方法、环境、农药制剂以及生物靶标等多方面因素的影响。

通过分析得出以下结论:1)大多数最佳粒径的研究都是采用人工表面来进行的,而人工表面的表面结构同自然生物表面存在很大差异,表面结构的不同将影响其对雾滴的吸附以及雾滴碰触表面后的行为趋向。人工表面往往是刚性的平面,当小雾滴接近它时,容易被流线型的空气打歪,无法沉积,而大雾滴有足够的撞击力能够沉降到人工表面上,因此人工表面更倾向于收集大液滴。2)雾滴在沉积到靶标上之前,会发生一定的蒸发^[50],这与试验时的温度、湿度密切相关,沉积到人工靶标表面的雾滴的尺寸可能并不是真正的最佳粒径的尺寸,而采用在人工表面上测得的雾滴粒径来确定其最佳粒径,得到的数据结果并非真正的结果,但似乎所有的试验都忽略了这个因素。3)特定农药对特定生物靶标的生物最佳粒径不是一个固定的数值。

4 展望

目前,有关农药喷雾最佳粒径方面的研究并不多,大多数最佳喷雾粒径的研究都是基于试验得出

数据。喷雾的最佳粒径受多方面因素影响,对于同一害虫,不同农药、不同靶标、不同药液浓度甚至害虫的不同时期,农药的最佳喷雾粒径都大为不同。综上所述,未来在对农药雾滴最佳粒径的研究和应用上还需从以下几个方面进行提升:

1) 试验与理论研究相结合。有关生物最佳粒径,都是通过试验数据分析而来,缺少理论方面的研究,使得生物最佳粒径缺少理论依据支撑,在这方面,还需要继续探索,关注雾滴在沉积到生物靶标表面之前发生的漂移和吸附等方面的行为,从理论方程上去验证雾滴粒径与漂移的关系,从力学、化学的角度去分析靶标对不同粒径雾滴的吸附作用,去发现生物最佳粒径理论的内在因果。

2) 宏观与微观多角度综合研究。大部分的研究都是从宏观方面去研究雾滴,缺少从微观角度去探索雾滴的运动机理,探索雾滴在接触靶标表面前后的行为状态。农药喷雾效率是涉及多学科的复杂问题,要全面掌握雾滴粒径大小与其运动规律之间的关系,就要运用多学科的知识来研究,从宏观和微观的方面进行多角度综合研究。

3) 利用多传感器融合技术改进试验方法与仪器。要探索雾滴的沉积分布规律及均匀性,从而提高喷雾效率和农药利用率,以往大多数试验步骤都是田间收集、实验室检测,在这个过程中由于许多不可控因素的存在,往往得到的数据误差都较大,如果能在田间直接得到雾滴的实时沉积数据,不仅省时省力,还减小误差。目前,有关田间雾滴沉积传感器的研究相对较少,多数雾滴沉积传感器都只能测单一要素,如测沉积量或分布密度等。利用多传感器融合技术,可以实现同时测量田间雾滴的多个参数,并快速获得田间实时数据。

4) 开发精准可控变粒径喷嘴。为了提高农药利用率、减少资源浪费与环境污染,有关航空施药的变量喷洒是行业内的研究热点,目前变量喷洒关注的主要是喷洒流量的变化,而很少有人注意到流量改变对雾滴粒径的影响。将变量喷洒与变粒径喷洒结合起来,找到它们之间的内在关系,开发精准可控变粒径喷嘴系统,将其与变量喷洒系统结合应用,将是农药减施过程中的一大进步。

参考文献:

- [1] 李丽,李恒,何雄奎,等. 红外靶标自动探测器的研制及试验[J]. 农业工程学报,2012,28(12): 159-163.
- [2] 傅泽田,祁力钧,王俊红. 精准施药技术研究进展与对策[J]. 农业机械学报,2007,38(1): 189-192.

- [3] 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.
- [4] 薛新宇,兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2013,44(5):194-201.
- [5] 张亚莉,兰玉彬,FRITZ B K,等. 美国航空静电喷雾系统的发展历史与中国应用现状[J]. 农业工程学报, 2016,32(10):1-7.
- [6] HADAWAY A B, BARLOW F. Studies on the deposition of oil drops[J]. Ann Appl Biol,1965,55(2):267-274.
- [7] HIMEL C M, MOORE A D. Spray droplet size in the control of pruce budworm, boll weevil, bollworm and cabbage looper[J]. J Econ Ento,1969,62(4):916-918.
- [8] LOFGREN C S, ANTHONY D W, MOUNT G A. Size of aerosol droplets impinging on mosquitoes as determined with a scanning electron microscope[J]. J Econ Ento, 1973,66(5):1085-1088.
- [9] HIMEL C M, UK S. the dose-toxicity of chlorpyrifos and endosulfan insecticides on the house fly by topical, vapor, and spray treatments as estimated by gas chromatography[J]. J Econ Ento,1972,65(4):990-994.
- [10] 袁会珠,徐映明,芮昌辉. 农药应用指南[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2011:71-73.
- [11] DERKSEN R C, JIANG C. Automated detection of fluorescent spray deposits with a computer vision system[J]. Trans ASABE,1995,38(6):1647-1653.
- [12] TATE R W. Immersion sampling of spray droplets[J]. AICHE J,1961,7(4):574-577.
- [13] HOFFMANN W C. Comparison of droplet imaging systems for water-sensitive cards[J]. Aspe Appl Biol, 2004,2(1):463-466.
- [14] 谷口庆治. 数字图像处理:应用篇[M]. 朱虹译. 北京:科学出版社,2002.
- [15] JIANG C, DERKSEN R C. Morphological image-processing for spary deposit analysis[J]. Trans ASABE,1995,38(5):1581-1591.
- [16] SUDHEERA K P, PANDA R K. Digital image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles[J]. Agri Water Mana,2000,45(2):159-167.
- [17] MOOR A D, LANGENAKENS J, VEREECKE E. Image analysis of water sensitive paper as a tool for the evaluation of spray distribution of orchard sprayers[J]. Aspe Appl Biol, 2000,57(1):329-342.
- [18] SALYSNI M, BENSALAM E, WHITNEY J D. Spray deposition and abscission efficacy of cmn-py-razole of valencia orange[J]. Trans ASABE,2002,45(2):265-271.
- [19] ROBERT D F. Visual and image system measurement of spray deposits using water-sensitive paper[J]. Appl Engi Agri,2003,19(5):549-552.
- [20] SÁNCHEZ-HERMOSILLA J, MEDINA R. Adaptive threshold for droplet spot analysis using water-sensitive paper[J]. Appl Engi Agri,2004,20(5):547-551.
- [21] 段树林. 应用激光显微摄影对柴油机喷雾粒度分布的测量研究[J]. 大连铁道学院学报, 1997,18(3):61-64.
- [22] 郑加强. 基于计算机视觉的雾滴尺寸测量技术[J]. 南京林业大学学报,2000,24(6):47-50.
- [23] 商庆清,张沂泉,郑建冬,等. 雾滴直径影像反求测定法研究[J]. 工程图学学报,2006(6):78-81.
- [24] 刘毓,徐永安,孙艳峰. 基于图像处理的雾滴尺寸测量与分析[J]. 农业装备技术,2007,33(2):25-29.
- [25] 王洪涛,祁力钧,王俊. 雾滴尺寸测定方法对比研究与进展分析[DB/OL]. (2008-04-07)[2016-02-01]. [http://www. paper. edu. cn/releasepaper/content/200804-186](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200804-186).
- [26] 陈福良,尚鹤言. 雾滴大小和喷雾效果[J]. 植物保护, 1994,20(3):44.
- [27] 李英,张晓辉,孔庆勇,等. 浅析雾滴尺寸的取决因素及其对喷雾效果的影响[J]. 农业装备技术,2003,29(5):35-36.
- [28] 王玲,兰玉彬,HOFFMANN W C,等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J]. 农业机械学报,2016,47(1):15-22.
- [29] BARRY J W, CIESLA W M, TYSOWSKY J M, et al. Impaction of insecticide particles on western spruce budworm larvae and douglas-fir needles[J]. J Econ Ento, 1977,70(3):387-388.
- [30] HIMEL C M. The fluorescent particle spray droplet tracer method[J]. J Econo Ento,1969,62(4):912-916.
- [31] UK S. Tracing insecticide spray droplets by sizes on natural surfaces:The state of the art and its value[J]. Pest Mana Sci,1977,8(5):501-509.
- [32] BACHE D H, SAYER W J D. Transport of aerial spray:I: A model of aerial dispersion[J]. Agri Mete,1975,15(2):257-271.
- [33] JOHNSTONE H F, WINSCH E, SMITHE L W. The dispersion and deposition of aerosols[J]. Chem Rev, 1949,44(2):353-371.
- [34] GREGORY P H. The microbiology of the atmosphere[J]. New Phyto,1973,72(5):12-42.
- [35] LATTA R, ANDERSON L D, ROGERS E E, et al. The effect of paticle size and velocity of movement of DDT aerosols in a wind tunnel on the mortality of mosquitoes[J]. Wash Acad Sci,1947,37(11):397-407.
- [36] 袁会珠,屠予钦,李运藩,等. 农药雾滴在吊飞昆虫不同部位的沉积分布初探[J]. 植物保护学报,1997,24(4):367-370.
- [37] BRYANT J E, YENDOL W G. Evaluation of the influence

of droplet size and density of *Bacillus thuringiensis* against *Gypsy moth* larvae (Lepidoptera: Lymantriidae) [J]. J Econ Ento,1988,81(1):130-134.

[38] 袁会珠,王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. 植物保护,2015,41(6):9-16.

[39] MUNTALI D C, WYATT I J. Factors affecting the biological efficiency of small pesticide droplets against *Tetranychus urticae* eggs[J]. Pestic Sci,1986,17(2):155-164.

[40] ALM S R, REICHARD D L, HALL F R. Effects of spray drop size and distribution of drops containing bifenthrin on *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) [J]. J Econ Ento,1987,80(2):517-520.

[41] SUGIURA M, HORIBE Y, KAWADA H, et al. Effect of different droplet size on the knockdown efficacy of directly sprayed insecticides [J]. Pest Mana Sci, 2011, 67(9): 1115-1123.

[42] YEOMANS A H, ROGERS E E. Factors influencing deposit of spray droplets[J]. J Econ Ento,1953,46(1):57-60.

[43] DAVIS J M, WATERS W E, ISLER D A, et al. Experimental airplane spraying for spruce budworm control[J]. J Econ Ento,1956,49(3):338-341.

[44] 朱金文,吴慧明,朱国念. 雾滴大小与施药液量对草甘膦在空心莲子草叶片沉积的影响[J]. 农药学报,2004,6(1):63-66.

[45] DOUGLAS G. The influence of size of spray droplets on the herbicidal activity of diquat and paraquat [J]. Weed Res,2006,8(3):205-212.

[46] KNOCH M. Effect of droplet size and carrier volume on performance of foliage-applied herbicides [J]. Crop Prot, 1994,13(3):163-178.

[47] 李鹏,何雄奎,李烜,等. 荧光示踪法评价农药沉积质量中环境因素的影响[C]//北京农药学会. 农药与环境安全国际会议论文集. 北京:北京农药学会,2005.

[48] SALYANI M, SERDYNKI J. Development of a sensor for spray deposition assessment[J]. Trans ASABE,1990,90: 1464-1469.

[49] 张瑞瑞,陈立平,兰玉彬,等. 航空施药中雾滴沉积传感器系统设计与实验[J]. 农业机械学报,2014,45(8): 123-127.

[50] HOFFMANN W C, FRITZ B K, BAGLEY W E, et al. Effects of air speed and liquid temperature on droplet size [J]. J ASTM Int,2011,8(4):59-60.

【责任编辑 周志红】

欢迎订阅 2017 年《华南农业大学学报》

《华南农业大学学报》是华南农业大学主办的综合性农业科学学术刊物。本刊主要报道农业各学科的科研学术论文、研究简报、综述等,涵盖动物科学与兽医学、农学、园艺学、土壤肥料、植物保护、生物学、林业科学、农业工程与食品科学等学科。本刊附英文目次和英文摘要。读者对象主要是农业院校师生、农业科研人员和有关部门的专业干部。

本刊为《中文核心期刊要目总览》综合性农业科学核心期刊,《中国科学引文数据库(CSCD)》、《中国科技论文统计源(中国科技核心期刊)》及《中国学术期刊综合评价数据库》等来源期刊,并排列在中国科学引文数据库被引频次最高的中国科技期刊 500 名以内。为美国《化学文摘》、美国《剑桥科学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》、英国《CABI》、英国《动物学记录》、英国《食品科技文摘》、《中国生物学文摘》、日本科学技术振兴机构数据库及国内农业类文摘期刊等多家国内外著名文摘固定刊源。

双月刊,逢单月上旬出版,A4 幅面。定价 15.00 元/册,全年 90.00 元。自办发行,参加全国非邮发报刊联合征订发行,非邮发代号:6573。国内外公开发行,欢迎订阅!

订阅款邮汇至: 300381 天津市卫津南路李七庄邮局 9801 信箱,全国非邮发报刊联合征订服务部。

《华南农业大学学报》编辑部