

田间农药雾滴精准采样技术与发展趋势

王国宾^{1,2}, 李 焜³, John Andaloro³, 陈盛德⁴, 韩小强⁵,

王 娟⁶, 单常峰^{1,2}, 兰玉彬^{1,2,4*}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东省农业航空智能装备工程技术研究中心, 淄博 255049; 3. FMC Corporation, Stine Research Center, 1090 Elkton Road, Newark, DE 19711, USA; 4. 华南农业大学电子工程学院(人工智能学院), 广州 510642; 5. 石河子大学农学院, 石河子 832002; 6. 海南大学机电工程学院, 海口 570228)

摘 要: 采用植保机械喷施化学农药仍是病虫害防治最为有效的手段。喷施过程中, 农药雾滴精准的采集并测定沉积、流失飘移量, 对于优化植保机械的作业参数、提高农药利用率具有重要意义。该研究综述分析了室内与田间采样过程中不同类型采样器的优缺点, 并分析采样效率、采样器的布置及采样条件等因素对雾滴沉积、流失飘移采样结果的影响。针对当前的采样方法, 该研究提出了未来在农药雾滴采样方面的 5 点要求与展望, 包括提高采样的准确性、提高采样方法和采样设备的标准化、增加对农药有效成分雾滴运动规律的研究、研发新型的采样传感器以提高采样效率、建立植保无人机喷施雾滴沉积、飘移模型。综上, 通过更为标准化和精准的采样, 获取可比较、准确度高的农药雾滴沉积与流失飘移数据, 可为中国农药使用量“零增长”提供科学技术指导。

关键词: 植保机械; 农药; 喷雾; 雾滴沉积; 雾滴流失; 雾滴飘移; 采样方法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.11.001

中图分类号: S224.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-11-0001-12

王国宾, 李焜, John Andaloro, 等. 田间农药雾滴精准采样技术与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 1-12.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.11.001 <http://www.tcsae.org>

Wang Guobin, Li Xuan, John Andaloro, et al. Current status and prospects of precise sampling of pesticide droplets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(11): 1-12. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.11.001 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

据统计, 中国农田全年病虫害的累积发生面积近 $3 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 严重威胁着粮食安全和农产品有效供应^[1]。病虫害的防治中, 化学农药的喷施作为当前最为有效的手段仍发挥着不可替代的作用。精准高效的化学农药喷施有助于减少农药使用量、提高农药利用率、降低对环境的污染^[2]。“十三五”期间随着农业农村部关于《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的深入开展, 中国农药减量增效显著。据农业农村部报告, 2019 年中国农药利用率为 39.8%, 比 2017 年提高 1.0%, 比 2015 年提高 3.2%。植保机械与施药技术的发展以及逐步完善的农药雾滴精准采样技术在中国农药利用率增长及农药使用量降低中起着重要作用^[3]。

农药药液的喷施首先经过不同类型的喷头雾化, 产

生粒径大小不同的雾滴, 随后雾滴与靶标叶片发生撞击、碎裂、反弹、沉积或流失等行为, 部分雾滴有效的持留在靶标上并接触到病虫害进而发挥防治作用, 而在这个过程中影响雾滴持留的因素包括: 植保机械参数、施药参数、环境气象参数、杂草等非靶标生物因素和靶标叶片表面结构因素等。沉积在靶标上的农药雾滴还会持续的蒸发或者转运至植物体内, 具有内吸作用的药剂则会在植物体内分布, 起到杀灭害虫及病菌的作用, 没有内吸作用的药剂则依靠病虫害与药剂雾滴的接触发挥防治效果。农药雾滴的非靶标沉积包括流失与飘移, 流失是指农药雾滴从靶标上脱落并进入土壤, 这部分药剂会随着浇灌或者降雨, 通过地表径流进入农田水体中, 被认为是农田水体污染的重要来源。飘移则是指在喷雾过程中雾滴受环境风的影响, 从靶标区域运动至非靶标区域的过程^[4], 尽管与流失相比, 农药雾滴飘移量相对较低, 但飘移更易受到偶然性环境因素风速和风向的影响, 同样具有较大的危害性。

农药的沉积、流失与飘移是农药进入环境的重要途径, 因此在全球受到了政府管理部门、研究机构与学者的广泛关注。在沉积与流失方面, 欧洲食品安全局 EFSA (European Food Safety Authority) 设立了农药在作物冠层截留沉积评估项目 (Collection and evaluation of relevant information on crop interception)^[5], 项目中的研究学者对不同植保机械和施药技术喷施下雾滴在作物靶标的沉积

收稿日期: 2020-11-08 修订日期: 2021-02-13

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(鲁政办字[2018]27号); 淄博市重点研发计划生态无人农场研究院项目(2019ZBXC200); 国家自然科学基金项目(31901411)

作者简介: 王国宾, 博士, 讲师, 研究方向为精准农业航空施药技术。

Email: guobinwang@sdut.edu.cn.

中国农业工程学会高级会员: 王国宾(E041500068M)。

※通信作者: 兰玉彬, 法国欧洲科学、艺术与人文学院院士, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为精准农业航空应用技术。Email: ylan@sdut.edu.cn.

中国农业工程学会高级会员: 兰玉彬(E041200725S)。

以及流失量 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 进行了测定。丹麦 Peter 等^[6]对大田和果树上的农药喷雾质量平衡体系进行了综述, 喷雾质量平衡体系包含雾滴在冠层上的沉积量、土壤上的流失量以及雾滴的飘移量。自 2015 年以来中国农业科学院植物保护研究所团队持续开展全国农药利用率测定, 并在 2020 年 11 月 1 日牵头实施标准《农药有效利用率田间测定方法 第 1 部分 大田作物茎叶喷雾的农药沉积利用率测定方法诱惑红指示剂方法》^[7], 该标准规定了示踪剂要求、雾滴采集卡布放、田间取样、沉积量测定、数据分析及计算等内容, 为中国大田作物农药利用率测定提供了标准依据。“十三五”期间, 中国开展实施的国家重点研发计划“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”专项中“化学农药对靶高效传递与沉积机制及调控”、“地面与航空高工效施药技术及智能化装备”子项目, 研究了包括植保设备研发与优化、影响因子对农药向靶作物与防治对象分散传递、沉积流失与飘移规律等内容, 该项目的实施对于提高中国农药雾滴沉积、减少农药使用量具有重要意义。尽管近年来中国植保机械, 尤其是植保无人飞机发展迅速, 促进了植保施药技术包括喷施后的雾滴沉积、飘移运动规律研究不断深入^[8-12], 带动了我国农药利用率水平的提升, 但与欧美等发达国家相比, 我国的施药技术水平仍相对落后^[2,8]。

随着 1962 年 Carson《寂静的春天》一书的出版, 全球对农药飘移的关注迅速增加。Felsot 等^[13]对美国、欧洲、澳大利亚、拉丁美洲等地区的飘移试验数据以及政府监管政策进行了详细汇总后提出了喷施技术选择、缓冲区设置、飘移控制剂使用、防风林设置等多种抗飘移方法。国际上, 为保证飘移测定的一致性以及规范性, 设立了植保机械喷雾飘移测试 ISO 标准 (International Standard Organization Standard)^[14]。在美国, 喷雾飘移的评估由喷雾飘移工作组 (Spray Drift Task Force, SDTF) 执行, 主要评估美国环保署 (US Environmental Protection Agency) 在农药注册登记 (Pesticide Registration, PR) 时产生的飘移危害, 其中国际著名 AGDISP 雾滴飘移模型即由该团队研发^[15]。澳大利亚的农药和兽医管理局 (Pesticides and Veterinary Medicine Authority, PMWA) 和加拿大的农药管理局 (Pesticide Management Regulatory Agency, PMWA) 也分别建设了关于农药喷雾沉积和飘移的综合数据库, 以提高监管决策质量^[13,16]。近年来伴随着喷杆喷雾机以及植保无人飞机的快速发展, 中国植保设备喷施雾滴沉积、飘移受到更多的关注^[17-20]。2005 年中国颁布了《植物保护机械喷雾飘移的田间测量方法》国家标准^[21], 2012 年颁布了《喷雾飘移的风洞实验室测量方法》民用航空行业标准^[22], 2018 年颁布了《植保无人飞机 质量评价技术规范》行业标准^[23], 这些标准的颁布和实施对于中国喷雾沉积、飘移测定的标准化具有重要作用。

尽管目前制定的 ISO 标准或国家标准中对农药雾滴沉积、流失与飘移的采样具有一定的参考, 但标准中对采样器和采样影响因素包括环境条件、采样场地、示踪

剂选择、采样后的运输与保存等方面要求不详细, 这导致在不同研究中采用不同的采样方法获取的试验结果难以进行比较。因此, 本文对不同的农药雾滴采样器类型、采样效率、采样器的布置方法、采样要求及采样结果分析等进行综述分析, 为植保机械田间喷施农药沉积、流失与飘移雾滴精准采样提供参考。

1 农药雾滴采样器类型

采样器按照处理分析方法分为图像分析类、化学分析类、传感器类 (表 1), 常见的雾滴采样器参见图 1。图像分析类采样器是指通过图像处理分析的方法获取雾滴沉积特性, 此类采样器材质主要是纸质。化学分析类采样器是指与示踪剂相结合使用, 采用洗脱、定量测定的方式进行分析雾滴沉积量等参数的一类采样器, 其材质包括纸质、塑料以及金属。传感器类采样器是通过传感器技术对沉积或飘移的雾滴进行快速检测, 并根据喷药前后的信号变化建立信号与雾滴沉积量之间的关系方程。

表 1 常用雾滴采样器分类
Table 1 Droplets samplers classification

| 类型 Types | 材质/采样原理 Materials/Sampling principle | 文献 References |
|---------------------------|---|------------------|
| 图像分析 Image analysis | 水敏纸 | [24-27] |
| | 油敏纸 | [28] |
| | 卡洛米特纸卡 | [9,29] |
| | 铜版纸、相纸 | [30-31] |
| 化学分析 Chemical analysis | 色谱纸 | [32] |
| | 滤纸 | [10,33-34] |
| | 麦拉卡/聚酯薄膜卡片 | [27] |
| | 塑料卡 | [35] |
| | α -纤维素卡 | [36] |
| | 塑料培养皿 | [37] |
| | 聚四氟乙烯线 | [14] |
| | 聚乙烯线 | [38] |
| | 尼龙线 | [39] |
| | 吸管 | [27] |
| | PVC 管 | [40] |
| | 特氟龙球 | [41] |
| 传感器 Sensors | 玻璃培养皿 | [20,42] |
| | 载玻片 | [43] |
| | 金属盘、不锈钢圆盘 | [44] |
| | 金属杆、不锈钢圆棒、金属筒 | [44] |
| | 激光雷达传感器 | [45-46] |
| | 热红外成像仪 | [47-48] |
| | 实时粒子检测器 | [49-50] |
| | 激光成像技术 | [51] |
| 电阻应变式传感器 | [52-53] | |
| 电容式传感器 | [54-55] | |
| 卫星影像 | [56] | |

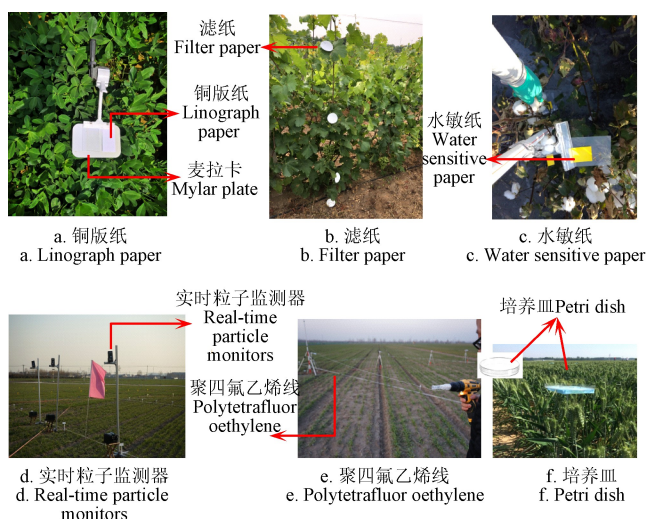


图 1 常见的农药雾滴采样器

Fig.1 Commonly samplers for pesticide droplets sampling

采样器按照采样方向可以分为水平采样类、垂直采样类。水平采样器指采样器布置方向与地面水平，采集地面或水体表面的雾滴沉积、飘移情况。此类采样器主要采集受重力影响自然沉降的雾滴；垂直采样器则指采样器放置在距离地面一定高度的位置，且采样器垂直于地面，用于采集处理区域下风向一定距离内的气流传输雾滴的分布特性，用以评价吸入雾滴的风险和大田边界植物结构污染的风险。此类雾滴往往受到气流运动影响，在采样器周围环绕沉积，而非撞击沉积，因此水平采样器和垂直采样器采样效率差异较大。

对采集沉积、飘移雾滴的采样器有以下的基本要求^[57]：

- 1) 在相对较低的空气速度下具有较高的雾滴收集效率；
- 2) 不易饱和、具有一定的承载性且能承载足量的雾滴沉积；
- 3) 具有较好的采样效率，回收率高且稳定，样品不会与采样器发生反应并能进行定量分析；
- 4) 具有可测定的取样体积或面积，用于计算单位面积的沉积量或者飘移量，以与其他研究者进行对比分析；
- 5) 易于在田间条件下处理；
- 6) 价格便宜，安全性高。

1.1 图像分析类采样器

图像分析类采样器有不同类型且各有特点，适用于不同喷施环境下采样（表 2），通过图像分析类采样器采样后，可以通过人工计数或者扫描后经过专门的软件处理来分析纸卡上的数据，包括雾滴粒径（ μm ）、雾滴分布密度（雾滴数/ cm^2 ）、雾滴覆盖度（%）、沉积量（ $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ）等^[24]。

表 2 图像分析类采样器

Table 2 Types of image analysis samplers

| 采样器类型 Type of samplers | 特点 Characteristics | 注意事项 Notes | 文献 References |
|--|-----------------------|--|------------------|
| 水敏纸 Water sensitive paper | 以水为溶剂，雾滴遇水敏纸变蓝色斑点 | 易变色；覆盖度>17%后误差增加；雾滴粒径需要通过扩散系数进行转化 | [25,58] |
| 卡洛米特纸卡、铜版纸、相纸 Kromekote card, Linograph paper | 需要在药箱中添加显色的示踪剂配合使用 | 需要添加染色剂；覆盖度>17%分析误差增加；雾滴粒径需要通过扩散系数进行转化 | [25,58] |
| 油敏纸 Oil sensitive paper | 以油为溶剂的雾滴遇油敏纸变灰色 | 仅在以油为溶剂的情况下使用 | [28] |

此类采样器表面平坦，可以模拟采集水平地面或水体表面的雾滴沉积飘移情况。图像分析类采样器中最为常用的为水敏纸，水敏纸是一类可以不用添加示踪剂就可以直接对雾滴显色的一类纸卡，其表面涂有一层溴酚蓝指示剂，雾滴在接触到纸卡上的溴酚蓝后会变为蓝色，pH 值范围在 2.8~6.4，通过蓝色的斑点即可以获取雾滴沉积相关信息。但是，水敏纸有一定的局限性，包括不易保存、价格较贵且容易变色^[25]。卡洛米特纸卡、铜版纸是一类白色的生活中常用的纸卡，优点是价格便宜、容易保存，但是此类纸卡需要在药液中添加一些具有能够显色的示踪剂才能使用（表 3）。图像分析类采样器还需要注意以下 3 点：图像处理软件的选择、扫描数据的准确性、存在的局限性。

1) 图像处理软件的选择：对雾滴沉积参数进行图像处理分析的软件包括 Gotas、StainMaster（www.stainmaster.com.ar）、ImageTool、StainAnalysis、AgroScan、DropletScan、Spray Image I and II、Swath Kit Version 3.0^[59]等，研究学者对比以上 7 种软件发现 Spray Image II 软件在雾滴覆盖度、雾滴粒径谱方面具有最高的测量精度^[26]，但是处理复杂度较大，耗时较长。国内的研究学者在纸卡雾滴信息处理方面也进行了相关的研究。祁力钧等^[60]采用图像采集系统分析雾滴，并对粘连雾滴提出用改进的分离粘连雾滴算法进行了分离处理，与采用激光粒度仪测定结果对比，发现其测量误差在 6% 以内。刘思瑶等^[61]对雾滴图像分析所采用的机器视觉算法进行优化改进，测定结果与激光粒度仪对比分析各参数相对误差平均为 9.64%。目前，国际上最常用的还是美国农业部的免费软件 DepositScan，下载地址为 <http://www.ars.usda.gov/mwa/wooster/atru/depositscan>，其测定准确度较高。

2) 扫描数据的准确性：美国农业部航空署 Zhu 等^[25]分析 DepositScan 软件的准确性，表明雾滴粒径 23.9 μm 为水敏纸上雾滴分析的最低阈值；另外需要注意的是，此类纸卡上的斑点粒径跟实际的雾滴粒径有很大差异，这主要受到雾滴在不同纸卡上的铺展系数（Spread Factors, SF）的影响。为获取真实的粒径数据需要通过图像分析获取斑点直径后，根据不同纸卡的铺展系数对数据进行校正^[27-28,59]。目前美国农业部农业航空署在采用 DropletScan 软件进行图像处理获取纸卡上的斑点直径并进行校正时，常用的校正公式为 $Y=0.5507X-0.00009X^2$ （式中 Y 为实际雾滴粒径（ μm ）；X 为水敏纸或者卡洛米特纸卡上的斑点粒径（ μm ））。可以看出，实际雾滴直径与斑点直径之间的关系并非线性。已有研究表明，环境条件、农药制剂中表面活性剂的含量及性质、雾滴粒径都对扩散系数产生影响^[58]，这就要求在使用纸卡测定雾滴粒径时，需对具体影响因素进行详细描述。

3) 局限性：采用图像分析类采样器时，当雾滴覆盖度较高（>17%）时，雾滴之间的叠加则会导致测定的雾滴粒径、覆盖度、沉积量等结果出现较大的偏差^[26]；因此需要获取精准沉积量数据时，多采用化学分析类采样器进行采样分析。

1.2 化学分析类采样器

化学分析类采样器是指通过化学分析手段采集测定雾滴沉积量的一类采样器。采用此类采样器时,在试验前首先需在药箱中添加示踪剂或者药剂,并在不同采集点布置采样器,喷雾试验完成后,通过定量的纯溶液(蒸馏水或有机溶剂)洗脱后用仪器定量测定,分析雾滴沉积流失飘移分布情况。常用的此类采样器既有平面型,例如麦拉卡、 α -纤维素、色谱纸(包含 Whatman 色谱纸)、培养皿、载玻片,也有立体型,例如吸管、尼龙线、聚苯乙烯线、聚四氟乙烯球(塑料球)、不锈钢圆盘或者不锈钢圆棒等(表1)。采样的结果以单位面积的沉积量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)来表示。此类采样器的优点是采样效率高^[43]、检测限较低、易于操作且容易洗脱提取^[62],但是在使用此类采样器应当注意:采样器和示踪剂的选择与使用、药剂的挥发性等。

1) 采样器的选择:在化学分析类采样器中,最常用的为 α -纤维素片、色谱纸、玻璃培养皿和玻璃载玻片。 α -纤维素片可以保护沉积的农药不受到光解和挥发

的影响^[32],具有良好的吸收性,避免雾滴的反弹^[16,63]。Whatman 色谱纸也是由纤维素制成,具有聚合度和结晶度高的特点^[64],但在研究中需注意使用的类型与等级,在部分研究中也常采用滤纸来代替 Whatman 色谱纸^[65]。使用色谱纸进行采样时,可以将色谱纸放置在地面上来测定流失量,也可以将色谱纸放置在作物冠层上测定冠层沉积量分布。意大利学者在葡萄园中采用 Whatman 色谱纸(50 cm×10 cm)对毒死蜱和甲霜灵2种不同农药进行飘移测定,结果发现果园的树墙较好的阻挡了雾滴的飘移,降低了雾滴飘移距离^[66]。比利时学者在柑橘园采用纤维素条(Cellulose strips)放置在培养皿中进行克菌丹和甲苯氟磺胺药剂的流失、飘移测定^[36]。

2) 示踪剂的选择与使用:采样过程中如果直接进行农药有效成分测定往往操作步骤复杂、需要专门的仪器设备和高纯度的原药有效成分,技术难度和成本高。采用示踪剂来代替农药,分析雾滴的沉积分布^[67],可以有效解决以上问题,常用的示踪剂包括染色类示踪剂、荧光类示踪剂、金属盐类示踪剂(表3)。

表3 示踪剂类型及特点
Table 3 Types and characteristics of tracers

| 示踪剂 Tracers | 分类 Type | 特点 Characteristics | 使用注意事项 Note for use | 文献 References |
|-----------------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|---------------|
| 染色 Visible dyes | 诱惑红、柠檬黄等 | 较好的稳定性、低毒性、高回收率以及低光解性 | 示踪剂检测下限较高,对于低容量喷洒的沉积检测以及飘移检测分析并不是很合适。 | [62,67-68] |
| 荧光 Fluorescent compounds | Rhodamine (罗丹明 B、罗丹明 WT)、天来宝、贝索红(BASO Red 546)、Brilliant Sulfaflavine、Fluorescein、Uvitex OB | 检测下限较低 | 稳定性较差、有一定毒性、见光易分解等。 | [69-70] |
| 金属盐 Metal salts | 铜离子、锌离子和锰离子盐类 | 相互之间不会产生干扰,可以有效的避免处理之间的污染。 | 采用特定的仪器设备进行测定 | [71] |

早在1976年荷兰学者就曾用4种荧光示踪剂 Fluorescein L.T.S.、Sel Fluorescent 3S、Uranin A、Urani 进行试验测定,采用聚乙烯条带和聚醚条带(Polyethene and Polyether strips)作为采样器采集,试验证明荧光示踪剂可以用于沉积分布检测,且4种示踪剂中 Sel Fluorescent 3S 最优,所选的采样器中聚醚条带最优^[68]。意大利学者对比了5种荧光示踪剂(BASO Red 546、Brilliant Sulfaflavine、Fluorescein、Uvitex OB、Rhodamine B)和7种染色示踪剂(Amaranth、Reactive Black 5、Patent Blue Violet、Tartrazine、Lissamine Green B、Erythrosin B、Ponceau 4R),试验结果表明染色示踪剂柠檬黄(Tartrazine)具有最佳的回收率和稳定性,因此被推荐为田间采样的良好示踪剂^[72-74]。中国学者对染色剂诱惑红作为沉积示踪剂的研究发现,诱惑红具有较高的稳定性、低毒性、高回收率以及低光解性,同时诱惑红的色彩更为突出,有利于从视觉上直观分析雾滴的沉积,因此同样适合于示踪剂检测沉积^[62,67]。然而染色示踪剂采用比色法测定时,检测下限较高,对于超低容量喷洒的沉积检测以及飘移量检测并不合适^[68]。

与染色示踪剂相比,荧光示踪剂的检测下限要低十倍,更适用于超低容量喷洒的沉积和飘移量检测^[67,69]。然而荧光示踪剂却有易光解的缺点,因此在取样后应当遮

光保存。袁雪等^[69]对若丹明 WT 和荧光素钠作为示踪剂时的回收率进行测定,发现若丹明 WT 在典型阴天或者遮盖率较高的环境下回收率较高,2 h 内在不同采样载体上的回收率大于60%,适合作为沉积示踪剂。Barber 等^[75]采用荧光示踪剂 Tinopal CBS-X 对流失到土壤中的沉积量进行分析,并对比采用采样器和直接从土壤中采样的差异,试验结果表明从土壤中取样的数据波动性更大。采用示踪剂进行沉积量测定时,还应注意以下问题:① 应优化荧光计或光度计对示踪物激发和发射的波长,以最大限度区分示踪物和来自于采样器、稀释液背景;② 为了最大限度地提高示踪物的回收率,要用稀释液浸泡采样器以使示踪物充分溶解;③ 应采用不同的荧光计或光度计分析相同的标准采样器,并比较其结果^[14]。

与染色示踪剂或荧光示踪剂不同的是,属于金属盐类示踪剂的金属螯合物,其特点是相互之间不产生干扰,可以有效的避免处理之间的污染,例如西班牙学者采用金属螯合物(Cupric Quelat、Zinnesse Quelat、Manganese Quelat)作为示踪剂对温室内不同喷雾设备喷施雾滴沉积进行测定,并采用滤纸片(Paper-filter strips)进行沉积采集,使用原子吸收光谱仪(Atomic absorption spectrometer)进行沉积量测定^[71]。

3) 药剂的挥发性:农药的有效成分种类较多,且具

有不同于示踪剂的挥发特性, 这对于沉积飘移量具有显著影响^[76], 因此针对易挥发的农药成分设计专用的采样器才能获取真实的农药沉积飘移量。

理论上认为, 挥发性越强的农药, 飘移率会越高^[16]。此类农药在使用采样器采集时应当避免有效成分在采样过程中发生挥发。合成羊毛线 (Synthetic wool yarn) 具有合适的吸附效率 (40%~70%)^[77], 而被用于倍硫磷和氯菊酯飘移沉积测定^[78-79], 但是羊毛线不适用于易挥发的药剂^[77]。为避免药剂挥发对测定结果的影响, 研究者在测定农药阿特拉津 (蒸气压 3.85×10^{-5} Pa) 和甲草胺 (蒸气压 2.1×10^{-3} Pa) 飘移试验中, 采用培养皿放置玻璃纤维并添加有机溶剂 (乙酸乙酯) 的方法对药剂进行采集^[80], 还有研究将水填充在培养皿中, 以避免农药有效成分的挥发而低估沉积飘移量^[81], 培养皿中填充的溶剂的类型需要根据农药在该溶剂中的溶解特性进行选择。Druart 等^[82]对霜脲氰 (蒸气压 1.5×10^{-4} Pa)、灭菌丹 (蒸气压 2.1×10^{-4} Pa) 和戊唑醇 (蒸气压 1.3×10^{-6} Pa) 的飘移情况试验时, 第一次试验发现飘移量遵循戊唑醇>灭菌丹>霜脲氰的顺序, 而第二试验发现飘移量的顺序变为了灭菌丹>戊唑醇>霜脲氰, 其他研究中也出现了类似结论^[83]。研究者分析可能一方面是由于气候参数的变化以及采样过程中的误差掩盖了不同药剂蒸气压的影响, 另一方面低蒸气压的农药从采样器上挥发量更高, 也会导致试验结果出现偏差。另外, 采用化学分析类采样器与真实叶片上采集的沉积飘移量有一定的区别, 实际喷洒中需要考虑作物叶片的结构对雾滴在叶片上沉积、流失和飘移的影响^[9]。

1.3 传感器类采样器

不同传感器的检测精度受到喷液量、雾滴粒径等喷雾参数的影响, 因此在传感器测定沉积试验中, 采用传感器方法常与传统的图像扫描分析类采样器或者化学分析类采样器配合使用, 以提高测定的准确性。西班牙学者采用 LIDAR 传感器在果园中测定风送式喷雾机的雾滴飘移量, 并与被动采样器进行对比, 显示在采用粗雾滴且大容量喷雾时, 两者有较好的相关性 ($R > 0.9$), 同时指出不同的施药参数以及气象参数下这一数值会发生变化^[45-46]。王志种等^[51]采用激光成像技术, 结合计算机图像处理对风洞内雾滴飘移量进行了快速批处理, 并与传统的化学分析法相对比, 发现激光成像技术准确度高达 96%, 为风洞内试验提供新的测试技术。美国学者^[49-50]采用实时粒子检测器 (Real-time Particle Monitors, Dylos) 对果园喷雾机雾滴飘移量进行检测, 发现实时粒子检测器也可以有效的检测雾滴飘移量。

采用电容式传感器研究药液沉积量对导体电阻率的影响, 建立雾滴沉积量与输出电压之间的关系也是一种常用的快速检测方式^[52-53], 但是在测定过程中部分学者发现在低容量喷施时, 此方法测定相对误差较高 10~50%^[56]。吴亚全等^[53]设计一款基于驻波率原理的叉指型雾滴采集极板结构, 极板间通过雾滴能够实现电磁耦合, 以用于快速的雾滴沉积量检测。采用红外热像仪测定喷

药前后的作物冠层温度情况, 并根据温度变化率来分析雾滴在作物冠层的沉积效果, 也已经被证明可以用于快速实时分析雾滴沉积及飘移效果^[47-48, 80]。

对于大型航空喷施, 采用遥感光谱采集分析喷药一周后的植被指数, 并建立单相光谱特征、时间变化特征与沉积量之间的关系, 可以用于大尺度农田的航空药液喷洒效果检测^[56]。采用光谱快速分析的方法中, Wen 等^[84]研发基于荧光示踪剂和光谱分析的新型喷雾沉积模式测量系统, 并将测定结果与水敏纸进行对比, 相关系数为 0.89, 为植保无人飞机喷施沉积测定提供了新型的检测方法。

Kumar 等^[85]用改进的表面增强拉曼散射法检测农药表面上的福美双农药沉积情况, 检测精度能达到 10^{-9} g/cm²。采用酶联免疫吸附法 (Enzyme-Linked Immuno Sorbent Assay, ELISA) 将酶标抗原或抗体与待测样本相结合, 也可以有效定量测定农药有效成分的含量, 以上 2 类方法多用于农药在作物上的残留检测, 在田间沉积飘移检测中应用较少^[86]。类似的传感器方法还有电化学适配体传感器法、基于改性乙酰胆碱酯酶的生物传感器等^[87]。

与传统的分析方法, 传感器类采样方法采集速度更快, 可以直接分析空中雾滴或沉积在传感器上的雾滴, 但是也存在测定精度低、价格昂贵、获取数据量大、处理时间长、测定指标单一等问题, 尤其是当田间喷洒采用低容量或者超低容量时, 传感器检测的方法会由于检测精度不足而导致测定结果误差较大 (表 4)。

表 4 常用的传感器采样器分类

| Table 4 Classification of the commonly sensor samplers | | |
|--|---|------------------|
| 传感器类型 Type of sensors | 原理 Theory | 文献 References |
| 激光雷达 Light detection and ranging, LIDAR | 通过向目标发射探测信号 (激光束), 然后将接收到的从目标反射回来的信号 (目标回波) 与发射信号进行比较, 作适当处理后, 就可获得目标 (雾滴沉积) 的有关信息。 | [45-46] |
| 热红外成像仪 Infrared thermal imaging technology | 利用红外探测器、光学成像物镜和光机扫描系统接收被测目标的红外辐射能量分布图, 根据能量辐射图, 分析雾滴沉积分布情况。 | [47-48, 74] |
| 实时粒子检测器 Real-time particle monitors | 采用光散射原理以半导体激光为测量光源, 对空气中粉尘 (雾滴微粒) 进行高灵敏非接触测量。 | [49-50] |
| 激光成像技术 Laser imaging technology | 利用光的丁达尔现象使空气中的水滴、颗粒等成像原理, 实现雾滴检测。 | [51] |
| 电容式传感器 Capacitance sensor | 基于变介电常数电容器原理设计雾滴沉积传感器及检测系统, 实现对雾滴沉积、飘移量的快速获取。 | [52-55] |
| 遥感卫星 Remote sensing satellite | 施药后光谱特征与沉积关系, 大尺度检测。 | [55] |

1.4 其他类采样器

除以上的采样器外, 部分试验中直接采用生物对象作为试验靶标进行测定。Brain 等^[44]在田间试验中使用黄瓜和莴苣作为试验靶标, 测定了除草剂莠去津的飘移情况及飘移危害, 喷雾试验完成 21 d 后, 对生物材料的生长点、鲜重质量以及根长进行了测定评估。在另一份研究中, Brain 等^[88]对甲基草酮采用生菜和番茄作为试验

靶标进行飘移评估, 在施药后 7、14、21d 的药害毒性和株高进行了测定。Druart^[82]等采用无脊椎动物蜗牛作为为了果园喷洒雾滴沉积飘移的评估生物, 结果发现喷洒的草甘膦药剂会在蜗牛生物体中累积, 其代谢产物会减缓蜗牛的生长。

雾滴飘移测定中, 为采集分析施药时雾滴飘移对旁观者的危害风险, 还有一类采样器能够以一定的速率吸取空气, 并吸附空中的雾滴, 这一类采样器与传统的水敏纸、滤纸等被动取样的方式不同, 被称作主动采样器 (Active collectors), 例如吸入式采样器和旋转棒一类的活动式收集器 (Suction samplers and rotor rods)。Cooper 等^[77]采用电动旋转采样器与被动采样器羊毛线进行了田间飘移采样效率对比, 发现 2 种采样器采样效率有所差异, 但可以很好的互补。Nsibande 等^[89]采用聚氨酯泡沫塞作为采样装置, 采用空气吸入泵以不少于 220 L/min 的流量吸取空气中含有柠檬黄的雾滴, 分析喷雾过程中的飘移情况。Schleier III^[79]采用相同材料采集空中氯菊酯和二溴磷超低容量制剂的飘移情况, 并与已有的模型 AgDrift 和 AGDISP 结果对比, 发现现有模型过高的评估飘移量结果。

2 雾滴与采样器的交互与采样效率

2.1 雾滴与采样器的交互

农药雾滴在采样过程中会与采样器发生粘附、反弹或破碎等, 这些行为会影响采样器的采样效率, 导致雾滴通过采样器采集的沉积量与作物叶片上的沉积量有所不同 (图 2)。农药雾滴在采样器上发生的不同行为与雾滴在撞击过程中所损失的动能有关, 如果损失较少的能量, 则雾滴发生反弹现象; 如果损失能量较高, 则雾滴将粘附到采样器表面上^[90]。如果雾滴在采样器表面撞击后发生反弹且具有较高的动能, 则会进一步破碎, 并在表面张力作用下再次收缩为更小的雾滴^[91-92]。农药雾滴与采样器的相互作用取决于采样器本身参数 (粗糙度、安装方向和可润湿性)、雾滴的特性 (表面张力和粘度)、雾滴参数 (雾滴大小和形状) 等^[91-93]。



图 2 雾滴在采样面上的形态及运动轨迹变化情况 (包括粘附、反弹和破碎)^[57]

Fig.2 Interaction between the sampler surface and droplets (including adhesion, bouncing and shattering)^[57]

2.2 采样器的采样效率

采集效率是指单位面积采样器采集的沉积量与空气中样品量的比值。采样效率受到多种因素的影响, 包括采样器本身 (材质、形状、大小)、雾滴特征 (雾滴粒径、雾滴速度)、气象参数 (环境温湿度、风速、大气稳定度) 等^[94]。采样效率理论值低于 100%, 且与雾滴在

采样器表面的碰撞参数有关, 雾滴在采样器上的碰撞参数如下^[57]:

$$p = \frac{\rho v d^2}{\mu D}$$

式中 p 是碰撞参数; ρ 是液滴密度, kg/m^3 ; v 是未受到扰动的雾滴速度, m/s ; d 为雾滴直径, m ; μ 为空气黏度, $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$, D 是采样器的直径/宽度, m 。当采样器的直径降低或雾滴的速度或雾滴的直径增加时, 采样器的碰撞参数增加, 采样效率增加。

采样效率研究中, May 等^[95]在风洞试验中对圆柱形、球形、条带形以及圆盘采样器上的采样效率进行的对比, 结果表明采样效率随着采样器直径的降低而增加, 随雾滴粒径的增加而增加。Fox 等^[96]对尼龙网空中采样效率进行研究, 当雾滴为 $30\ \mu\text{m}$ 时, 采样效率为 120%, 当雾滴为 $44\ \mu\text{m}$ 时, 采样效率为 140%, 采样效率值偏高。Copper 等^[77]对被动采样器和主动采样器的采样效率分别进行测定, 发现羊毛线 (Synthetic wool yarn) 的采样效率在 40%~100%, 主动采样器 (旋转采样器) 的采样效率在 10%~70%。

当采用化学分析类采样器时, 采样效率不仅与碰撞参数有关, 还与回收率有关。回收率是指通过测定的结果与“真值”之间的接近程度, 通过“从采样器上回收测得的目标物质的响应值”除以“目标物经标准曲线计算的响应值”得来。化学分析类采样器测定回收率主要是考虑到样品经过处理后会折损, 部分示踪剂、药剂会发生分解等问题。美国环保局对沉积采样的回收率要求在 70%~120%^[97], 如果回收率满足此要求, 则对所获得的沉积量不必校正^[36]。在采样回收率的研究中, Brain 等^[44]使用不锈钢圆盘和不锈钢杆采集测定阿特拉津, 2 种采样器的回收率分别为 $(111\pm 7.4)\%$ (9 组样品) 和 $(109\pm 3.7)\%$ (31 组样品)。Zhao 等^[42]采用试管刷和塑料培养皿测得吡虫啉的回收率分别为 72.5%~78.5% 和 96.8~98.5%。Qin 等^[98]采得 RhB 和 BSF 作为荧光示踪剂, 回收率分别达到了 93.5%~98.2% 和 95.5%~99.4%。回收率的测定广泛应用于农药的残留分析中, 但是在农药雾滴的沉积、飘移分析中却易被遗漏^[99-100]。采样器和采样环境对采样效率、样品回收率有显著影响, 因此在试验中应当对采样效率、样品回收率进行测定, 这有利于各研究之间的一致性和数据的可靠性。

3 采样器的布置及采样方法要求

3.1 采样器的布置

植保机械喷施研究中, 采样器的布置影响雾滴沉积、飘移采样结果。当以优化不同喷洒设备作业参数、分析溶液性质等为目的时, 需将采样器布置在冠层的正上方, 且距离冠层顶端有一定距离, 以避免具有较大波动性的作物冠层掩盖试验处理的影响^[27,101-102]。在分析冠层参数对沉积的影响试验中, 可以将采样器布置在冠层的不同位置或者直接布置在冠层叶片上, 以获取雾滴在冠层内的穿透性和分布情况^[9,10,103]。对雾滴沉积、飘移引起显著

影响的冠层参数包括冠层形状、冠层尺寸、叶片密度和种植布置或构造。

3.2 采样气象要求

气象参数包括环境温湿度、风速、风向、大气稳定度等，此类因素对雾滴沉积飘移具有极显著影响，因此在沉积飘移测定试验中，对气象参数的测定与表征十分必要。ISO 田间飘移测定标准方法^[14]对雾滴飘移测定时的气象条件进行限定，要求环境风速大于 1 m/s（在作物冠层上方 1 m 且离地至少 2 m 处测量），平均风向应与喷洒设备作业方向成 $90^{\circ} \pm 30^{\circ}$ ，气温在 5~35 °C。采样时风向发生改变会导致每个取样位置采集的飘移量发生较大变化^[104]。为此，飘移采样时应尽量保证风向恒定。另外，不仅温湿度、风速风向对雾滴沉积飘移具有显著影响，大气稳定度也具有显著影响，尤其对于航空施药^[105]。

3.3 采样场地要求

采样场地对雾滴沉积飘移测定结果也有显著影响，沉积试验中应尽量选择作物冠层长势均匀的田块，并需要对冠层参数（作物高度、种植密度、叶面积指数等）进行详细描述。飘移试验中，飘移取样应确定下风向区域，应具有最少的障碍遮挡物，避免影响测量区域内的气流变化。已发表的论文仅有少部分对飘移试验研究中周围障碍物进行详细表述^[32,43,102]。试验场地的描述中除冠层参数、位置信息外，有些难以注意的因素也会对试验结果产生影响，例如 Brain 等^[44,106]研究中表述试验场地的坡度（15°）对试验结果也产生了一定的影响。

3.4 采样的运输与保存

含有示踪剂或者农药有效成分的采样器在运输到实验室进行分析之前需进行遮光或者低温保存、尽量缩短样品处理时间、避免样品污染等。在样品采集和处理过程中要有已知近似量的对照处理来对比，分析示踪剂或者样品的分解率及回收率，以此提高分析结果的准确性^[44,83,89]。

4 结论与展望

本文对农药雾滴精准采样技术进行综述研究，分析农药雾滴采样器类型、雾滴与采样器的互作以及采样器的布置等因素对采样效率和采样精准性的影响，得到以下的结论：

1) 农药雾滴采样器按照处理分析方法可以分为图像分析类、化学分析类、传感器类，不同类型采样器各有优点与局限性。

2) 不同类型的采样器获取沉积飘移数据类型、注意事项、使用场景等具有差异，在农药雾滴采样时，应当根据试验需求选择合适的采样器。

3) 除采样器使用的注意事项外，采样器布置、采样气象条件、采样场地、采样器的运输与保存等因素都会影响采样准确性，在农药雾滴采样时应当注意。

尽管过去研究学者在农药雾滴精准采样方法和雾滴沉积、流失和飘移测定方面开展了大量的研究，逐步形成了较为完善的农药雾滴标准化采样方法与流程，但仍存在以下的问题亟需完善：

1) 采样的准确性需要进一步提高。不同的环境参数和操作方法对采样效率和回收率有显著影响，因此为提高数据的可靠性，测定采样效率和回收率应当成为沉积、飘移检测中最为基础的要求。采集数据前要对植保机械做好检验，避免由于植保机械调试问题导致测定结果的误差。其他因素包括采样环境参数、试验场地、采样器的运输和保存都应当按照标准或被广泛接受的试验方法执行，避免对采样结果产生显著影响。

2) 采样方法与采样设备需进一步标准化、便捷化、高效化。当前雾滴沉积飘移采样器种类繁多，这导致不同试验采样结果难以对比，因此需要针对相似的采样情况设计使用规范一致的采样器和采样流程，便于更好地保证采样数据的一致性，建立更为准确的沉积飘移模型。另外，目前采样分析方法多数为田间采集后在实验室中处理，此类采样处理方法容易导致采样器污染，如何在田间通过快速图像扫描或其他高效、便捷、准确的方式获取雾滴沉积飘移量也是未来的重要研究方向。

3) 农药有效成分的雾滴运动规律需要进一步研究。国内外沉积飘移的研究多采用清水中添加示踪剂的方法，然而由于农药有效成分理化性质的特殊性，尤其是部分有效成分具有较高的挥发性以及农药溶剂中所含有大量的表面活性剂，都会对植保机械的喷施雾化、沉积飘移产生显著影响，因此未来研究应增加对含有农药有效成分的雾滴运动规律测定，以更精准的分析农药雾滴沉积飘移分布。

4) 研发新型的采样传感器以提高采样效率。随着传感器技术的发展，采用新型传感器进行快速采样成为未来发展趋势。当前传感器测定沉积飘移量还具有价格高、准确度低、数据分析复杂等问题，但是随着技术的发展，未来融合多传感器技术如激光雷达、热红外成像、实时粒子检测及光谱成像等，对雾滴沉积飘移数据进行实时分析将成为研究重点。

5) 建立植保无人机喷施雾滴沉积、飘移预测模型。中国植保无人飞机的快速发展以及其具有的低空低容量喷洒特征对农药雾滴精准采样技术及农药雾滴沉积、飘移预测模型提出了新的要求。未来通过结合计算流体力学、风洞及田间试验等方法，探究环境因素、喷雾参数、蒸发情况和冠层穿透对雾滴沉积的影响，并建立用于预测雾滴飘移的分布模型、制定喷洒作业方案，对于协助管理监督并指导科学应用植保无人机十分必要。

[参 考 文 献]

- [1] 全国农技推广中心, 2020 年我国农作物重大病虫害发生将重于 2019 年[J]. 农药, 2020, 59(1): 5.
National Agricultural Technology Extension Center: The occurrence of major crop diseases and pests in 2020 will be serious than in 2019[J]. Agrochemicals, 2020, 59(1): 5. (in Chinese with English abstract)
- [2] 袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 14-20.
Yuan Huizhu, Yang Daibin, Yan XiaoJing, et al. Pesticide

- efficiency and the way to optimize the spray application[J]. *Plant Protection*, 2011, 37(5): 14-20. (in Chinese with English abstract)
- [3] Ebert T A, Taylor R A, Downer R A, et al. Deposit structure and efficacy of pesticide application. 1: interactions between deposit size, toxicant concentration and deposit number[J]. *Pesticide Science*, 1999, 55(8): 783-792.
- [4] Stephenson G R, Ferris I G, Holland P T, et al. Glossary of terms relating to pesticides (IUPAC recommendations 2006)[J]. *Pure Appl. Chem.* 2006, 78(11): 2075-2154.
- [5] Olesen M H, Jensen P K. Collection and evaluation of relevant information on crop interception[J]. *EFSA Supporting Publications*, 2013, 10(6): 438.
- [6] Peter K J, Merete H O. Spray mass balance in pesticide application: A review[J]. *Crop Protection*, 2014, 61: 23-31.
- [7] 中华人民共和国农业农村部. 农药有效利用率田间测定方法 第1部分 大田作物茎叶喷雾的农药沉积利用率测定方法诱惑红指示剂方法: NY/T 3630.1-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [8] 袁会珠, 郭永旺, 薛新宇, 等. 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[J]. *农业工程技术*, 2018, 38(9): 46-50.
Yuan Huizhu, Guo Yongwang, Xue Xinyu, et al. The promotion and application of crop protection drones to improve the utilization rate of pesticides in China[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2018, 38(9): 46-50. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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.
- [10] Wang G, Lan Y, Yuan H, et al. Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers[J]. *Applied Science-Basel*. 2019, 9(2): 218.
- [11] Lan Y B, Chen S D. Current status and trends of plant protection UAV and its spraying technology in China[J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2018, 1(1): 1-9.
- [12] Zhou Q Q, Xue X Y, Qin W C, et al. Analysis of pesticide use efficiency of a UAV sprayer at different growth stages of rice[J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2020, 3(1): 38-42.
- [13] Felsot A S, Unsworth J B, Linders J B, et al. Agrochemical spray drift; assessment and mitigation: A review[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2010, 46(1): 1-23.
- [14] International Organization for Standardization. ISO 22866 Equipment for Crop Protection-Methods for Field Measurement of Spray Drift[S]. Geneva: ISO copyright office, 2005.
- [15] Teske M E, Thistle H W, Schou W C, et al. A review of computer models for pesticide deposition prediction[J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(3): 789-801.
- [16] Hewitt A J, Johnson D R, Fish J D, et al. Development of the Spray drift task force database for aerial applications[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, 21: 648-658.
- [17] Zhu H, Jiang Y, Li H, et al. Effects of application parameters on spray characteristics of multi-rotor UAV[J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2019, 2(1): 18-25.
- [18] Chen Y, Qi H, Li G, et al. Weed control effect of unmanned aerial vehicle (UAV) application in wheat field[J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2019, 2(2): 25-31.
- [19] Li X, Andaloro J, Lang E, et al. Best management practices for unmanned aerial vehicles (UAVs) application of insecticide products on rice[C]//2019 ASABE annual international meeting, Session of precision aerial spray applications: UAV/drones and manned aircraft, July 8th, 2019, Boston, Massachusetts. Paper No. 1901493.
- [20] Wang S L, Song J L, He X K, et al. Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(4): 22-31.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 植物保护机械 喷雾飘移的田间测量方法: GB/T 24681-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [22] 中国民用航空局. 中华人民共和国民用航空行业标准: 喷雾飘移的风洞实验室测量方法: MH/T 1051-2012[S]. 北京: 中国民用航空局, 2012.
- [23] 中华人民共和国农业农村部. 植保无人飞机 质量评价技术规范: NY/T 3213-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [24] Fox R D, Derksen R C, Cooper J A, et al. Visual and image system measurement of spray deposits using water-sensitive Paper[J]. *Applied Engineering in Agriculture*. 2003, 19(5): 549-552.
- [25] Zhu H P, 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.
- [26] Cunha M, Carvalho C, Marcal A R S. Assessing the ability of image processing software to analyse spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(1): 11-23.
- [27] Fritz B K, Hoffmann W C, Martin D E, et al. Aerial application methods for increasing spray deposition on wheat heads[J]. *Applied Engineering in Agriculture*. 2007, 22(3): 357-264.
- [28] Salyani M, Fox R D. Evaluation of spray quality by oil and water-sensitive papers[J]. *Transactions of ASAE*, 1999, 42(1): 37-43.
- [29] Yang D, Zhang L, Yan X, et al. Effects of droplet distribution on insecticide toxicity to asian corn borers (*Ostrinia furnacalis*) and spiders (*Xysticus ephippiatus*)[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 124-133.
- [30] 王娟, 兰玉彬, 姚伟祥, 等. 单旋翼无人机作业高度对核

- 椰雾滴沉积分布与飘移影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 109-119.
- Wang Juan, Lan Yubin, Yao Weixiang, et al. Effects of working height of single-rotor unmanned aerial vehicle on drift and droplets deposition distribution of arexa tree[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 109-119. (in Chinese with English abstract)
- [31] Maybank J, Yoshida K, Grover R. Droplet size spectra drift potential and ground deposition pattern of herbicide sprays[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1974, 54: 541-546.
- [32] Capri E, Balderacchi M, Yon D, et al. Deposition and dissipation of chlorpyrifos in surface water following vineyard applications in Northern Italy[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, 24(4): 852-860.
- [33] Foqué D, Braekman P, Pieters J, et al. A vertical spray boom application technique for conical bay laurel (*Laurus nobilis*) plants[J]. Crop Protection. 2012, 41(6): 113-121.
- [34] Mariana R B, Cunha J P A R d, Santana D G d. Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154: 35-45.
- [35] Chen Y, Zhu H, Ozkan H E, et al. Spray drift and off-target loss reductions with a precision air-assisted sprayer[J]. Transactions of the ASABE. 2013, 56(6): 1273-1281.
- [36] Vercruyse F, Steurbaut W, Drieghe S, et al. Off target ground deposits from spraying a semi-dwarf orchard[J]. Crop Protection, 1999, 18(9): 565-570.
- [37] Hiltz B E, Vermeer A W P. Effect of formulation on spray drift: A case study for commercial imidacloprid products[J]. Aspects of Applied Biology, 2012, 114: 445-450.
- [38] Grella M, Gallart M, Marucco P, et al. Ground deposition and airborne spray drift assessment in vineyard and orchard: the influence of environmental variables and sprayer settings[J]. Sustainability, 2017, 9(5): 728.
- [39] Xavier T, Eduard G, Joan R R P, et al, Determination of spray drift and buffer zones in 3D crops using the ISO standard and new LiDAR methodologies[J]. Science of The Total Environment, 2020, 714: 136666.
- [40] Sinha R K, Ranjan R, Khot L R, et al. Drift potential from a solid set canopy delivery system and an axial-fan air-assisted sprayer during applications in grapevines[J]. Biosystems Engineering, 2019, 188: 207-216.
- [41] Wilson C, Strimple P, Wilson S, et al. Nontarget deposition of methiocarb applied to a foliage plant staging area[J]. Bulletin Environmental Contamination Toxicology, 2005, 74(3): 509-517.
- [42] Zhao H, Xie C, Liu F, et al. Effects of sprayers and nozzles on spray drift and terminal residues of imidacloprid on wheat[J]. Crop Protection, 2014, 60: 78-82.
- [43] Carlsen S C K, Spliid N H, Svensmark B. Drift of 10 herbicides after tractor spray application.1. Secondary drift (evaporation)[J]. Chemosphere, 2006, 64(5): 787-794.
- [44] Brain R, Goodwin G, Abi-Akar F, et al. Winds of change, developing a non-target plant bioassay employing field-based pesticide drift exposure: A case study with atrazine[J]. Science of the Total Environment, 2019, 678: 239-252.
- [45] Gil E, Llorens J, Llop J, et al. Use of a terrestrial LIDAR sensor for drift detection in vineyard spraying[J]. Sensors, 2013, 13(1): 516-534.
- [46] Gregorio E, Rosell-Polo J R, Sanz R, et al. LIDAR as an alternative to passive collectors to measure pesticide spray drift[J]. Atmospheric Environment, 2014, 82: 83-93.
- [47] Jiao L, Dong D, Feng H, et al. Monitoring spray drift in aerial spray application based on infrared thermal imaging technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 135-140.
- [48] Lv M, Xiao S, Tang Y, et al. Influence of UAV flight speed on droplet deposition characteristics with the application of infrared thermal imaging[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(3): 10-17.
- [49] Blanco M N, Fenske R A, Kasner E J, et al. Real-time particle monitoring of pesticide drift from an axial fan airblast orchard sprayer. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology[J]. 2019, 29(3): 397-405.
- [50] Blanco M N, Fenske R A, Kasner E J, et al. Real-time monitoring of spray drift from three different orchard sprayers[J]. Chemosphere, 2019, 222: 46-55.
- [51] 王志翀, 何雄奎, 李天, 等. 基于激光成像技术的农药雾滴飘移评价方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 73-79.
- Wang Zhichong, He Xiongkui, Li Tian, et al. Evaluation method of pesticide droplet drift based on laser imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(9): 73-79. (in Chinese with English abstract)
- [52] Salyani M, Serdynski J. Development of a sensor for spray deposition assessment[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(5): 1464-1469.
- [53] 吴亚垒, 祁力钧, 张亚, 等. 基于驻波率原理的农药雾滴沉积量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 64-71.
- Wu Yalei, Qi Lijun, Zhang Ya, et al. Design and experiment of pesticide droplet deposition detection system based on principle of standing wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 64-71. (in Chinese with English abstract)
- [54] Wang P, Yu W, Ou M, et al. Monitoring of the pesticide droplet deposition with a novel capacitance sensor[J]. Sensors, 2019, 19(3): 537.
- [55] Zhang D, Lan Y, Wang X, et al. Assessment of aerial agrichemical spraying effect using moderate-resolution satellite imagery[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(6): 1971-1977.
- [56] 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.
Zhang Ruirui, Chen Liping, Lan Yubin, et al. Development of a deposit sensing system for aerial spraying application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 123-127. (in Chinese with English abstract)
- [57] Munjanja B K, Naudé Y, Forbes P B C. A review of sampling approaches to off-target pesticide deposition[J]. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2020, 25: e00075.
- [58] Lyn M E, Thomson S J. Environmental and spray mixture effects on droplet size represented by water sensitive paper used in spray studies[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(3): 803-807.
- [59] Hoffmann W C, Hewitt A J. Comparison of three imaging system for water-sensitive papers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(6): 961-964.
- [60] 祁力钧, 胡开群, 莽璐, 等. 基于图像处理的雾滴检测技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(S1): 48-50.
Qi Lijun, Hu Kaiqun, Mang Lu, et al. Droplet detection based on image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(S1): 48-50. (in Chinese with English abstract)
- [61] 刘思瑶. 基于机器视觉的喷雾质量检测与评价研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
Lv Siyao. Research on Spray Quality Evaluation Indicators Detection Based on Machine Vision[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [62] Gao S, Wang G, Zhou Y, et al. Water-soluble food dye of Allura Red as a tracer to determine the spray deposition of pesticide on target crops[J]. Pest Management Science, 2019, 75(10): 2592-2597.
- [63] Foqué D, Dekeyser D, Zwervaegher I, et al. Accuracy of a multiple mineral tracer methodology for measuring spray deposition[J]. Aspects of Applied Biology, 2014, 122: 203-212.
- [64] Costa M N, Veigas B, Jacob J M, et al. A low cost, safe, disposable, rapid and self-sustainable paper-based platform for diagnostic testing: Lab-on-paper[J]. Nanotechnology, 2014, 25(9): 094006.
- [65] Miller D R, Stoughton T E, Steinke W E, et al. Atmospheric stability effects on pesticide drift from an irrigated orchard[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(5): 1057-1066.
- [66] Vischetti C, Cardinali A, Monaci E, et al. Measures to reduce pesticide spray drift in a small aquatic ecosystem in vineyard estate[J]. Science of the Total Environment, 2008, 389(2/3): 497-502.
- [67] 邱占奎, 袁会珠, 楼少巍, 等. 水溶性染色剂诱惑红和丽春红-G 作为农药沉积分布的示踪剂研究[J]. 农药, 2007, 46(5): 323-325, 327.
Qiu Zhankui, Yuan Huizhu, Hou Shaowei, et al. The research of water soluble dyes of allura red and ponceau-G as tracers for determining pesticide spray distribution[J]. Agrochemicals, 2007, 46(5): 323-325, 327. (in Chinese with English abstract)
- [68] Speelman L. A fluorescent tracer technique for determination of the liquid distribution of field crop sprayers[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1971, 16(3): 301-306.
- [69] 袁雪, 王俊, 周舟, 等. 喷雾荧光示踪剂回收率影响因素实验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 54-57, 85.
Yuan Xue, Wang Jun, Zhou Zhou, et al. Analysis on the recovery rate of spraying of fluorescent tracers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 54-57, 85. (in Chinese with English abstract)
- [70] 中国民用航空局. 中华人民共和国民用航空行业标准: 飞机喷雾飘移现场测量方法. MH/T 1050-2012 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2012.
- [71] Sánchez-Hermosilla J, Páez F, Rincón V J, et al. Evaluation of a fog cooling system for applying plant-protection products in a greenhouse tomato crop[J]. Crop Protection, 2013, 48: 76-81.
- [72] Pergher G. Recovery rate of the trace dyes used for spray deposit assessment[J]. Transactions of the ASABE, 2001, 44(4): 787-794.
- [73] Sánchez-Hermosilla J, Rincón V J, Páez F, et al. Field evaluation of a self-propelled sprayer and effects of the application rate on spray deposition and losses to the ground in greenhouse tomato crops[J]. Pest Management Science, 2011, 67(8): 942-947.
- [74] 张京, 何雄奎, 宋坚利, 等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 94-96.
Zhang Jing, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 94-96. (in Chinese with English abstract)
- [75] Barber J A S, Parkin C S. Fluorescent tracer technique for measuring the quantity of pesticide deposited to soil following spray applications[J]. Crop Protection, 2003, 22(1): 15-21.
- [76] Briand O, Bertrand F, Seux R, et al. Comparison of different sampling techniques for the evaluation of pesticide spray drift in apple orchards[J]. Science of the Total Environment, 2002, 288(3): 199-213.
- [77] Cooper J F, Smith D N, Dobson H M. An evaluation of two field samplers for monitoring spray drift[J]. Crop Protection, 1996, 15(3): 249-257.
- [78] van der Walt E. Research at PPRI on environmental effects of quelea control operations[C]//Workshop on Research Priorities for Migrant Pests of Agriculture in Southern Africa, 24-26 March 1999, Plant Protection Research Institute, Pretoria, South Africa. Chatham, UK: Natural Resources Institute, 2000: 91-95.
- [79] Schleier J J, Peterson R K D. Deposition and air

- concentrations of permethrin and naled used for adult mosquito management[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 58(1): 105-111.
- [80] Ravier I, Haouisee E, Clément M, et al. Field experiments for the evaluation of pesticide spray - drift on arable crops[J]. Pest Management Science: Formerly Pesticide Science, 2005, 61(8): 728-736.
- [81] Dabrowski J M, Bollen A, Bennett E R, et al. Pesticide interception by emergent aquatic macrophytes: Potential to mitigate spray-drift input in agricultural streams[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 111(4): 340-348.
- [82] Druart C, Millet M, Scheifler R, et al. Snails as indicators of pesticide drift, deposit, transfer and effects in the vineyard[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(20): 4280-4288.
- [83] Carlsen S C K, Spliid N H, Svensmark B. Drift of 10 herbicides after tractor spray application. 2. Primary drift (droplet drift)[J]. Chemosphere, 2006, 64(5): 778-786.
- [84] Wen Y, Zhang R, Chen L, et al. A new spray deposition pattern measurement system based on spectral analysis of a fluorescent tracer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 160: 14-22.
- [85] Kumar S, Goel P, Singh J P. Flexible and robust SERS active substrates for conformal rapid detection of pesticide residues from fruits[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 241: 577-583.
- [86] Dowgiallo A M. Pesticide detection using SERS techniques[J]. Spectroscopy, 2017, 32(6): 37.
- [87] 贾慧樱. 基于微电极农药残留快速检测用生物传感器制备方法研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016.
- Jia Huiying. Study on the Preparation of Biosensors Based on Microelectrodes for Rapid Detection of Pesticide Residues[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [88] Brain R A, Perine J, Cooke C, et al. Evaluating the effects of herbicide drift on nontarget terrestrial plants: A case study with mesotrione[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2017, 36(9): 2465-2475.
- [89] Nsibandé S A. Pesticide Spray Drift Monitoring in the Evaluation of Air Dispersion Models: A South African atrazine Case Study[D]. Tshwane: University of Pretoria, 2015.
- [90] Spillman J J. Spray impaction, retention and adhesion: an introduction to basic characteristics[J]. Pesticide Science, 1984, 15(2): 97-106.
- [91] Cao C, Song Y Y, Zhou Z L, et al. Effect of adhesion force on the height pesticide droplets bounce on impaction with cabbage leaf surfaces[J]. Soft Matter, 2018, 14(39): 8030-8035.
- [92] Zheng L, Cao C, Cao L, et al. Bounce behavior and regulation of pesticide solution droplets on rice leaf surfaces[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(44): 11560-11568.
- [93] de Oliveira R B, Precipito L M B, Gandolfo M A, et al. Effect of droplet size and leaf surface on retention of 2, 4-D formulations[J]. Crop Protection, 2019, 119: 97-101.
- [94] Kirchner L M, Taylor R A J, Downer R A, et al. Calibrating the pesticide capture efficiency of passive dosimeters[J]. Pesticide Science, 1996, 46(1): 61-69.
- [95] May K R, Clifford R. The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs[J]. Annals of Occupational Hygiene, 1967, 10(2): 83-95.
- [96] Fox R D, Derksen R C, Zhu H, et al. Airborne spray collection efficiency of nylon screen[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(2): 147-152.
- [97] US EPA, Environmental chemistry methods guidance. Office of chemical safety and pollution prevention[EB/OL], (2020-11-08) [2012-06-03].
- [98] Qin W, Xue X, Zhou Q, et al. Use of RhB and BSF as fluorescent tracers for determining pesticide spray distribution[J]. Analytical Methods, 2018, 10(33): 4073-4078.
- [99] 孔志强, 董丰收, 刘新刚, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定柑橘及柑橘精油中 4 种农药残留[J]. 分析化学, 2012, 40(3): 474-477.
- Kong Zhiqiang, Dong Fengshou, Liu Xingang, et al. Determination of 4 pesticides residues in citrus and essential oil by ultra performance liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2012, 40(3): 474-477. (in Chinese with English abstract)
- [100] 郭立群, 徐军, 董丰收, 等. 分散固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法同时检测玉米及其土壤中烟嘧磺隆、莠去津及氯氟吡氧乙酸残留[J]. 农药学报, 2012, 14(2): 177-184.
- Guo Liqun, Xu Jun, Dong Fengshou, et al. Simultaneous determination of nicosulfuron, atrazine and fluroxypyr in soil and corn by ultraperformance liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2012, 14(2): 177-184. (in Chinese with English abstract)
- [101] 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)
- [102] 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.
- [103] Foqué D, Nuyttens D. Effects of nozzle type and spray angle on spray deposition in ivy pot plants[J]. Pest Management Science, 2011, 67(2): 199-208.
- [104] Nuyttens D, De Schampheleire M, Steurbaut W, et al. Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, Part 1: Meteorological conditions[J].

- Aspects of Applied Biology, 2006, 77(2): 1-8.
- [105] Thomson S J, Huang Y, Fritz B K. Atmospheric stability intervals influencing the potential for off-target movement of spray in aerial application[J]. International Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 5(1): 1-17.
- [106] Lefrancq M, Imfeld G, Payraudeau S, et al. Kresoxim methyl deposition, drift and runoff in a vineyard catchment[J]. Science of the Total Environment, 2013, 442: 503-508.

Current status and prospects of precise sampling of pesticide droplets

Wang Guobin^{1,2}, Li Xuan³, John Andalaro³, Chen Shengde⁴, Han Xiaoqiang⁵,
Wang Juan⁶, Shan Changfeng^{1,2}, Lan Yubin^{1,2,4*}

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Shandong Provincial Engineering Technology Research Center for Agricultural Aviation Intelligent Equipment, Zibo 255049, China; 3. FMC Corporation, Stine Research Center, 1090 Elkton Road, Newark, DE 19711, USA; 4. College of Electronics Engineering (College of Artificial Intelligence), South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 5. College of Agricultural, Shihezi University, Shihezi 832002, China; 6. Mechanical and Electrical Engineering College, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Plant protection machinery to spray pesticides is one of the most effective pest control methods in agriculture. It is necessary to accurately collect and measure the amount of droplets deposition, loss, and drift in the spraying process of pesticides, thereby optimizing the operating parameters of plant protection equipment, while improving the utilization rate of pesticides. Various samplers are available at present for sampling spray deposition, loss, and drift droplets. The selection of the samplers should meet the following requirements. Firstly, high collection efficiencies of samplers were required for the droplets of different sizes in relatively low wind speeds; Secondly, the samplers were not easy to saturate, with a certain sampling volume or area to sample sufficient droplets. A certain sampling volume or area can be used to calculate the deposition per unit area; Thirdly, the samplers should not react with active ingredients or tracers, particularly with high sampling efficiency, and stable recovery rate, where the resulting data can be quantitatively analyzed; Fourthly, the cheap samplers are easy to handle under field conditions. In this study, four types of samplers classified by the analytical approaches were introduced, including the type of image processing, chemical analysis, sensors, and rest. There were special precautions for each sampler. The selection of image processing software, correction of scanned data, and the limitations should be noticed in the type of image processing samplers. Much attention should be paid to the selection of samplers, dye or fluorescent tracer, and the volatility of pesticide active ingredients in the type of chemical analysis samplers; The type and applied scenarios were critical for each sensor and accuracy of sensors in the type of sensor samplers. In addition, there was some adhesion, rebound, or breakage failure, further detrimental to the sampling efficiency, when the droplets came into contact with the sampler. Especially for the type of chemical analysis samplers, special attention should be paid to sampling efficiency and recovery. Except for the selection of samplers, there was a significant effect on the placement position, transportation, and preservation of samplers, meteorological requirements, and sampling test sites. Five requirements or prospects were proposed for the current sampling in the future, including (a) to inspect plant protection machinery before the test, and determine the sampling efficiency and recovery rate of selected samplers for a high accuracy of sampling, (b) to standardize the sampling or samplers in the development of fast suitable for field sampling; (c) further studies focused on the deposition of droplets containing pesticide active ingredients, (d) to develop new sampling sensors for high sampling efficiency, and (e) to establish a deposition and drift model of plant protection drones. In any way, the standardized and accurate sampling is needed to obtain comparable and highly precise data of pesticide deposition. The finding can make a great contribution to improving the current utilization rate of pesticides, particularly providing potential scientific and technical guidance for the “zero growth” of pesticide usage.

Keywords: plant protection machinery; pesticides; spraying; droplet deposition; run off; drift; sampling methods