

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2023.05.001

# 对靶施药技术装备在植物病虫草害防控中的应用及展望

刘理民, 何雄奎, 刘亚佳, 曾爱军, 宋坚利

中国农业大学 理学院, 北京 100193

**摘要:** 近年来, 绿色农药及靶向农药等新农药被广泛应用到作物保护中, 但国内植保从业者对对靶施药技术的了解并不深入. 本文将对靶施药技术类比于靶向农药和机器人控制技术, 并将其分为实现过程和载体来进行描述, 具体从 4 个部分展开介绍. 第一, 用于感知信息的传感器和技术, 类似于机器人的“感知”功能, 可以看作是人体的“眼睛”; 第二, 对靶施药技术的计算和决策模型, 类似于机器人的“决策”功能, 可以看作是人体的“大脑”; 第三, 对靶施药技术的施药量控制方法, 类似于机器人的“控制”功能, 可以看作是人体的“手”; 第四, 几种典型的对靶施药机. 本文亦指出了对靶施药技术装备的未来发展方向, 即向着本土化、智能化、傻瓜化和农艺农机相结合的方向发展.

**关键词:** 靶向农药; 对靶施药; 感知设备;

施药决策; 施药控制; 施药装备

中图分类号: S432

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2023)05-0001-16

## Target Pesticide Application Technology Equipment and Future Developments in the Control of Plant Pests, Diseases and Weeds

LIU Limin, HE Xiongkui, LIU Yajia,  
ZENG Aijun, SONG Jianli

College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China

**Abstract:** In recent years, new pesticides such as green pesticides and targeted pesticides have

收稿日期: 2023-09-06

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-28); 中国农业大学“2115 人才培养发展支持计划”项目; 三亚中国农业大学研究引导资金项目(SYND-2021-06).

作者简介: 刘理民, 博士研究生, 主要从事智能植保技术及设备研究.

通信作者: 何雄奎, 教授.

been widely used in crop protection, but domestic plant protection practitioners do not have a deep understanding of the target pesticide application technology. Target application technology is analogous in this paper to targeted pesticide and robot control technology, and it is separated into the realization process and carrier. This paper is divided into four parts to describe the target application technology. First, sensors and technologies for sensing information, similar to the sensing function of robots, can be thought as human ‘eyes’. Second, the calculation and decision model of target application technology, similar to the decision-making function of the robot, can be thought as the human ‘brain’. Third, spray volume control technique of target application technology, which resembles as the control function of robot, can be compared to a human ‘hand’. Fourth, we introduce a few typical target application machines. Finally, the future development direction of target application technology and equipment is pointed out, which is towards localization, intelligence, impenetrability and the combination of agronomy and sprayers.

**Key words:** targeted pesticide; target pesticide application; sensing equipment; application decision; application control; application equipment

靶向农药(Targeted Pesticide)是指通过准确识别、瞄准特定作用物乃至分子靶标以安全高效地防治特定病虫害的农药活性化合物或农药制剂<sup>[1-2]</sup>。药剂的靶向作用与对靶传递使得其防治对象更专一,同时由于靶向农药毒理学的可预知性,靶向农药较一般的广谱农药安全性更高,且能减少农药的使用量并减轻对环境的污染<sup>[3-4]</sup>。

随着我国“农药化肥双减”政策的提出,农药施用过程中不仅需要高效可靠的农药制剂,还应提高农药施用技术<sup>[5]</sup>,即根据防治对象的发生发展规律、环境因素、药剂的种类和剂型来选用器械和农药施用方法,将药剂施用到具体的地方,以达到经济、有效、安全控制病虫害的目的<sup>[6]</sup>。由此,植保领域的研究学者提出了类似靶向农药的对靶施药技术(Target Pesticide Application)。对靶施药技术不同于靶向农药,属于施药器械与施药技术的范畴,指的是植保机械的喷雾部件喷出药液时对准喷雾靶标作物或病虫害等防治对象来进行喷雾<sup>[7-8]</sup>。对靶施药采用普通喷雾机械即可实现,目前地面喷杆喷雾机与人力背负手持式喷雾器等都能采用对靶施药技术,其主要特征是农药雾滴沉积效率高<sup>[9-12]</sup>。

对靶施药是有目的地针对感兴趣目标冠层进行施药的具体过程<sup>[13-15]</sup>。人工对靶施药需要人的“眼睛”“大脑”和“手”实现对喷头的精准控制,而机械对靶施药同样需要“眼睛”“大脑”和“手”,即感知设备、决策模型和控制方法,具体为通过光电等传感器探测植株冠层获取特征信息,中央处理器(Central Processing Unit, CPU)依据获取到的特性信息制定喷雾决策,通过微控制器(Microcontroller Unit, MCU)及可控设备控制喷雾参数来执行喷雾决策,以达到最佳冠层沉积量并减少农药飘失<sup>[7-8, 16-20]</sup>。

对靶农药和对靶施药技术结合,更利于农药发挥作用。本文依据对靶施药技术的特点,类比了对靶施药技术和机器人控制技术,同时对对靶施药的感知、决策、控制及集成设备4个方面展开了介绍,具体内容包括:到目前为止可获取植株冠层信息的感知设备及可感知到的植株冠层参数;主要的施药剂量计算表达模型和对靶施药技术的施药决策模型;调节喷施药剂量的主要控制方法;经典对靶喷雾技术集成的喷雾设备;总结并对施药雾技术和装备进行展望。

## 1 对靶施药技术的感知技术与设备

传感器是对靶施药技术的“眼睛”,可感知目标冠层特征信息,为施药决策模型提供数据支

撑<sup>[20-22]</sup>. 不同类别的传感器均可用来感知冠层特征信息, 主要包括靶标有无、外貌轮廓、叶面积指数及病虫害信息等<sup>[22-24]</sup>.

用于检测冠层特征参数的各种传感器的原理、可检测到的冠层信息及其优缺点见表1, Rosell等<sup>[25]</sup>的研究中亦进行了详细比较, 认为虽然超声波传感器成本低且精度较高, 但激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)不仅精度高而且可用来探测目标冠层高精度三维模型, 是最具潜力的传感器.

表1 主要冠层信息探测传感器及其优缺点

传感器	原理	可探测信息	优点	缺点
超声波传感器	依据回波时间和强度确定靶标有无、靶标距离和叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)	靶标有无、外貌轮廓、LAI	①简单可靠, 价格低, 质量优, 鲁棒性能好; ②易执行, 可适用于复杂农业环境	①超声波束角度大; ②分辨率低; ③相邻传感器互相干扰
红外传感器	根据红外线从发射到返回传感器的飞行时间计算距离	靶标有无、外貌轮廓	①价格低, 鲁棒性能好; ②容易执行, 适应性好	①易受自然光干扰; ②分辨率低、精度低
LiDAR	根据测距原理的不同分为飞行时间和相位差2种测试方法, 一是发射和反射间的飞行时间, 二是入射和反射激光束间的相位差	靶标有无、外貌轮廓、LAI	可快速获取冠层3D结构, 利用适当算法可快速准确重构冠层结构, 即树高、轮廓、LAI和叶面积密度(Leaf Area Density, LAD)等	①不适应多尘、多雾和潮湿环境; ②价格昂贵; ③易产生空间位置误差
光学传感器	感知光投影, 使用图像处理技术分析不同光位置所得到投影图像以获取冠层参数	靶标有无、外貌轮廓、LAI	①价格低, 适应性强; ②可测冠层尺寸、轮廓、背阴及向阳面积比例	①须晴天、光线适合、低风速; ②耗时长、难以在线使用; ③需后处理才可得到冠层3D模型
机器视觉	①图像传感器感知物体的反射光后, 利用数字图像传感器将光信号转换为电信号; ②采用数码相机获取2个视野的图像, 并将图像坐标转化为实际坐标进而将两个图像融合成一个3D点云图像	靶标有无、外貌轮廓、LAI	①冠层结构(树高、体积、LAI及LAD)测量精度较超声波高; ②可直观地获取3D图像; ③可获得光谱信息, 同时支持GIS信息的提取	①需提前校准, 精度没有LiDAR高; ②对环境光照要求高, 郁闭果园不适用; ③在线使用时数据存储和处理量大
电子鼻	经选择性的电化学传感器阵列及适当识别方法组成的仪器以识别简单和复杂的气味	病虫害信息	响应时间短、检测速度快	需构建特定的传感器阵列, 每种病虫害的传感器不一样

### 1.1 靶标有无

早期受传感器、MCU、CPU及计算方法等各种技术门槛的限制, 研究人员主要通过超声波传感器、红外传感器及其他感知传感器来检测距离阈值内的靶标有无, 被称为靶标有无探测技术<sup>[13, 20, 22-23]</sup>. 靶标有无探测技术因无视目标冠层及非靶标间的差异, 会造成非靶标区的农药喷施, 但由于其简单可靠, 仍是目前发展最早且最为成熟的冠层信息探测技术<sup>[17, 26-28]</sup>. 如表1所示, 除电子鼻外的所有传感器都可用于靶标有无的探测, 如邹建军等<sup>[29]</sup>及刘金龙等<sup>[30]</sup>利用红外传感器, 姜红花等<sup>[20]</sup>及许林云等<sup>[13]</sup>利用超声波传感器, 窦汉杰等<sup>[31]</sup>利用LiDAR, 毛文华等<sup>[32]</sup>及姜红花等<sup>[33]</sup>利用机器视觉识别到目标冠层或杂草的有无, 指导智能喷雾机的农药喷施.

### 1.2 外貌轮廓

探测目标冠层的外貌轮廓(体积)须使用传感器获取果树冠层的长、宽、高等信息, 如图1

所示,利用超声波传感器获取传感器与果树间的距离(宽),已知传感器安装的间距(高),同时获取喷雾机一段时间内的行驶距离(宽)<sup>[8, 34-35]</sup>,随后对果树冠层的宽进行滤波处理,便可得到图 1 右侧的离散化体积(长方体)<sup>[23]</sup>.可探测靶标有无的传感器均具有探测果树外貌轮廓的功能,如翟长远等<sup>[36]</sup>利用超声波传感器得到了目标冠层的体积且探测精度达到 90% 以上;刘理民等<sup>[23]</sup>利用激光传感器和超声波传感器融合成的传感器阵列获得了相对误差小于 4.2% 的冠层体积;李龙龙等<sup>[37]</sup>利用 LiDAR 探测到了高精度的分层果树体积.

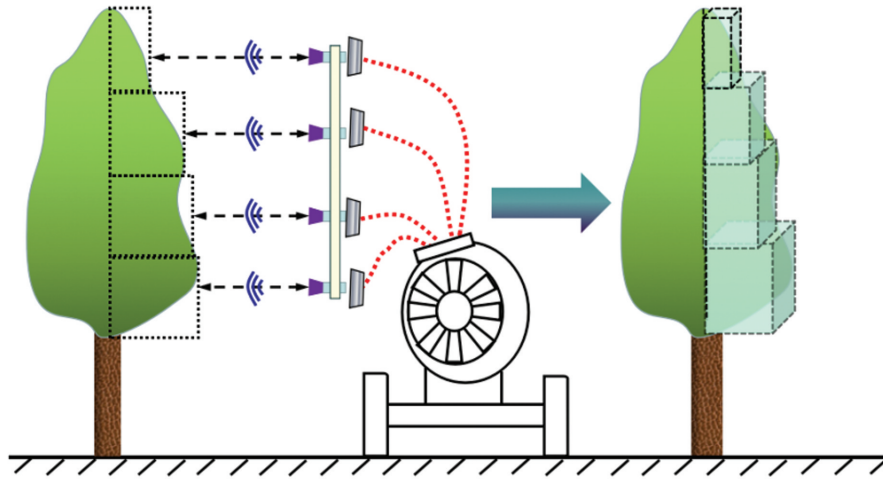


图 1 果树冠层外貌轮廓探测示意图

### 1.3 叶面积指数

叶面积指数(LAI)的获取方法分为直接法和间接法,其中直接法需破坏植株原有枝叶结构,且费时费力、费用高<sup>[38-40]</sup>.间接法主要基于冠层叶片对光和声波等物理参数的反射强度进行模型构建,由此研究人员已构建了基于 LiDAR、超声波、电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机等传感器和 LAI 之间的关系<sup>[39, 41-42]</sup>.谷趁趁等<sup>[35, 43]</sup>利用 LiDAR 估算果树冠层的叶面积指数,其中对稠密冠层的探测模型的  $R^2$  值达 0.972 7,可用于稠密冠层叶面积的在线计算;Sanz 等<sup>[41, 44]</sup>在 2013 年和 2018 年利用 LiDAR 估算 LAI,并创造性地将果树冠层投影面积和孔隙率相结合得到了更具普适性的 LAI 构建模型.

### 1.4 病虫害信息

病虫害信息获取同样分为直接法和间接法,其中直接法检测流程复杂,耗时长且费用高,难以实现实时在线检测<sup>[8, 45]</sup>.间接法主要是基于冠层外部形态变化和病虫害挥发性有机化合物变化来进行检测的方法,其中图像处理技术多用于外部形态变化监测,且得到了一定研究成果<sup>[24]</sup>.如图 2 所示,图像处理技术利用数码相机和识别算法来获取并处理植株图像,以确定该植株是否存在病虫害<sup>[46]</sup>.图像处理技术用于病虫害信息获取的主要流程是:先利用数码相机获取原始图像;并对图像进行处理,通过灰度变换、过滤和调整大小等图像预处理技术获得预期图像;再使用分割算法对图像进行分割;最后,将分割完成的图像输入分类器中进行图像分类,进而得到病虫害图像识别结果<sup>[24, 47-48]</sup>.目前,图像处理技术检测精度越来越高,成果斐然,但仍存在实时检测中数据集体积小、检测速度相对慢的局限性,此外该技术还易受到外部干扰,如在照明不均匀、密集遮挡、设备抖动模糊的情况下,将该技术直接应用于智能移动喷雾设备会比较困难<sup>[46, 49-50]</sup>.



图 2 利用图像处理技术诊断植株所患病害

当植物受到病虫害攻击时,会实时释放特定的挥发性有机物来对抗攻击者,电子鼻可模仿人类嗅觉系统,通过检测挥发性气体的分布来诊断植物病虫害种类及其严重程度<sup>[24]</sup>.电子鼻由气体传感器阵列、信号调节电路和模式识别算法等组成.当传感器阵列检测到挥发性气体时,传感材料会发生电化学反应,可将挥发性有机化合物信息转化为电子信号<sup>[51]</sup>;再经信号调节电路的去噪、放大和模数(Analog to Digital, AD)转换等对信号进行调制;最后,模式识别算法对气体进行分类,并识别出病虫害种类(图 3).Soh 等<sup>[51]</sup>和 Erdem 等<sup>[52]</sup>开发了一种基于电容式微机械超声换能器阵列电子鼻系统,可选择性检测挥发物,使用 k-NN 算法进行分类,结果表明在不同环境下准确率达 98% 以上.实验室条件下,电子鼻被证明是一种很有潜力的技术,可在发病早期快速检测植物病虫害,操作简单、无损且可批量采样<sup>[53]</sup>,而实际应用时面对诸多挑战,如温度、湿度、不可控且不断变化会影响传感器的精度和寿命<sup>[46]</sup>.此外,大田气体成分复杂,植物释放的挥发性有机化合物浓度相对较低,背景噪声很容易掩盖真实的挥发性有机化合物变化.因此,电子鼻技术需要进一步研究和改进,特别是在大田环境下实时应用时.

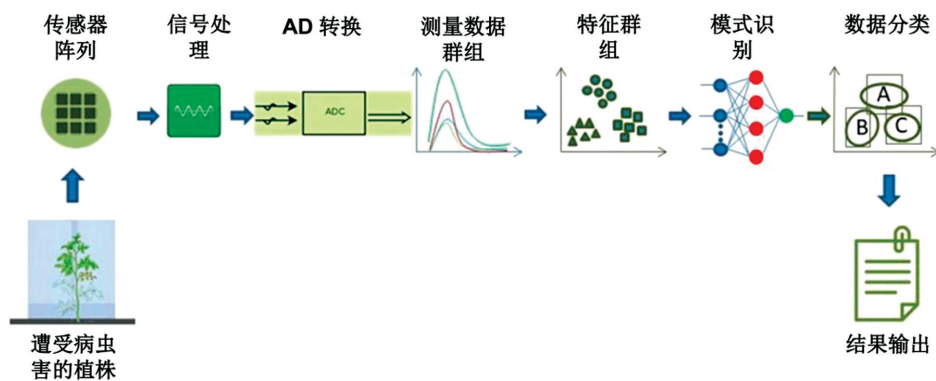


图 3 电子鼻检测原理

## 2 对靶施药技术施药计算和决策模型

### 2.1 施药计算模型

#### 2.1.1 GA 施药计算模型

基于农作物所占面积(Ground Area, GA, 本文指的是  $1 \text{ hm}^2$ , 即  $10\,000 \text{ m}^2$ )的施药计算模型不考虑不同作物参数的差异,仅根据不同作物的种植面积并依据农药标签上的建议施药量进行喷施作业,其依据固定的施药液量进行喷施,无视作物间差异,导致不同作物冠层内叶片单

位面积上的施药量不均,该模型可在大田和果园进行使用<sup>[34]</sup>.目前果园多采用宽行密植<sup>[54]</sup>,该模型应用在果园中会造成极大的农药浪费和喷施不足等问题<sup>[34]</sup>.

### 2.1.2 CH 施药计算模型

不同时间或不同地块的同种大田作物株高不一,根据植株冠层高度(Canopy Height, CH)制定合适的喷洒量是较为合理的<sup>[55]</sup>.为此,早在 1995 年德国便制定了每公顷同种作物每 1 m 高的 CH 剂量计算方法(kg 或 L)<sup>[56]</sup>,且自 1997 年以来,德国农药生产商在农药标签上使用了该种剂量表达方式<sup>[57]</sup>.该模型在果园中的研究更为详细,有研究表明,CH 模型只有在 LAD、冠层直径和行距( $r$ )等参数保持不变的情况下才成立<sup>[58]</sup>,梨果和核果园的树木大小和行距存在很大差异,不存在完全标准的果园,所以这不是剂量表达或剂量调整的最佳施药计算模型,此结论得到多位研究者田间试验的功效效果验证<sup>[59-61]</sup>.

### 2.1.3 TRV 施药计算模型

树行体积(Tree Row Volume, TRV)模型由美国的 Byers 等<sup>[62]</sup>于 1971 年首次提出,它指作物树行的立方体积,见公式(1),同时指出喷施药液量与 TRV 之间比例为 0.093 L/m<sup>3</sup>,1987 年该比例得到 Byers 本人试验证实<sup>[63]</sup>.

$$\text{TRV} = \frac{W \times h \times GA}{r} \quad (1)$$

式中,TRV 表示树行的体积,单位为 m<sup>3</sup>;GA 为 10 000 m<sup>2</sup>/ha;  $h$  为树行果树平均高度,单位为 m;  $r$  为果树行距,单位为 m.

同时,Herrera-Aguirre 等<sup>[64]</sup>于 1980 年提出了施用乙烯利的苹果树喷施比例为 0.116 L/m<sup>3</sup>.Manktelow 等<sup>[65]</sup>于 1997 年建议在大尺度树(TRV > 23 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)中的喷施比例应高于 0.093 L/m<sup>3</sup>.Rüegg 等<sup>[60]</sup>指出核果的 TRV 与 LAI 显示出良好的线性相关性,其中在 TRV < 17 000 m<sup>3</sup>/ha 时  $R^2 = 0.95$ ,TRV > 17 000 m<sup>3</sup>/ha 时  $R^2 = 0.79$ .Santiago 等<sup>[66]</sup>在多个水果和葡萄园中同样报道了两者间良好的线性相关性( $R^2 = 0.68$ ).因此,TRV 可估算 LAI.故此 TRV 模型被提出用于剂量表达<sup>[59]</sup>和注册试验的推荐量<sup>[67]</sup>,目前已被瑞士当局接受用于剂量表达.最近,TRV 模型已被接受用于功效试验,当冠层宽度是影响施药效果的重要参数时推荐使用该模型<sup>[68]</sup>.

### 2.1.4 LWA 施药计算模型

叶墙面积(Leaf Wall Area, LWA)模型是 TRV 模型的一个特例,其假设冠层宽度对最终的喷施效果无显著性影响<sup>[66]</sup>.该模型由 Koch 和 Weisser 在 1995 年提出,建议药液量和虚拟平面(叶墙)定义的治疗区相关<sup>[69]</sup>,如图 4 所示,计算如公式(2):

$$\text{LWA} = \frac{2 \times h \times GA}{r} \quad (2)$$

其中 LWA 是叶墙面积,单位为 m<sup>2</sup>/ha;  $h$  是植株冠层高度,单位为 m;  $r$  是行距,单位为 m.

Walklate 等<sup>[70]</sup>使用 LWA 模型在葡萄园中证明了 LWA 调整的沉积物几乎独立于 LAI ( $R^2 = 0.05$ ),且与每单位 GA 模型的固定剂量沉积物 ( $R^2 = 0.80$ )相比差异性不明显,与 GA 模型的农药剂量相比,降低 8%~58%的药剂使用量(平均 29%).Rüegg 等<sup>[59]</sup>证明了 LWA 模型与 LAI 相关性弱.当宽度不可忽略且叶量是目标沉积的决定因素时,LWA 过于简化无法表

达冠层结构<sup>[64]</sup>. 在欧洲, LWA 模型被用作常用施药计算模型, 并被 EPPO 用作梨果、葡萄和高秆蔬菜中功效评价的表达模型<sup>[58, 67]</sup>. LWA 模型已被用于欧盟预注册试验中的区域评估, 德国在 2020 年 1 月前强制执行该协议, 而且奥地利、德国和比利时已注册农药的计算模型都采用了 LWA 模型<sup>[66]</sup>.

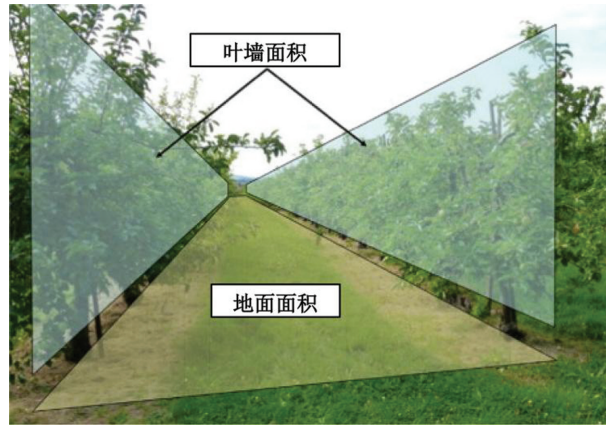


图 4 地面面积与叶墙面积

#### 2.1.5 LAI 施药计算模型

理想情况下, 施药量应与施用当天的 LAI 或 LAD 相关, 尽管采用施药计算模型不同, 但 LAI 是所有情况下都必须考虑的最重要的因素<sup>[57]</sup>. 直接测定三维作物的 LAI 耗时且费力<sup>[42]</sup>, LiDAR 则可快速估算 LAI. 以前, LiDAR 仅在小规模实验上可用<sup>[71-72]</sup>. 在西班牙, 基于 LiDAR 估算 LAI 已在果园和葡萄园中进行<sup>[73-74]</sup>. Sanz 等<sup>[44]</sup>2018 年对 17 个梨园、14 个苹果园和 26 个葡萄园不同生长阶段的果树使用 LiDAR 进行一系列测量, 为开发一种简单、快速且准确的非 LiDAR 系统来估计 LAI 提供了基础, 发现高度变量不能很好地解释 LAI, 因此不能单独使用 CH 施药计算模型, 而应该结合 CH、最大宽度和孔隙率之间的比率来估计 LAI. 随着在线快速估算 LAI 的发展, 将来 LAI 施药计算模型将被大范围使用.

#### 2.1.6 生长阶段施药计算模型

众多研究人员发现, 在落叶作物中, 生长阶段也与 LAI 或 LAD 密切相关<sup>[73, 75-76]</sup>. 2020 年, 在西班牙的果园中测定了整个生长周期中的 LAI, BBCH 53-61 阶段(开花前到开花)的 LAI 为 1.2~1.7, BBCH 75-83 阶段 LAI 为 1.7~3.1. 在西班牙的加泰罗尼亚, BBCH 55-57 阶段(花开放期间)的 LAI 为 0.4~0.6, 而在 BBCH 75-83 阶段 LAI 为 1.0~1.8; 同样在加泰罗尼亚的乔木果园中, BBCH 71-75 阶段(果实从 10 mm 到半成品) LAI 为 2.3~2.9, BBCH 76-89 阶段(从果实约 60% 到成熟果实) LAI 为 2.6~4.0, 以上为考虑冠层尺寸和调整生长阶段的 LAI 估计提供了数据支撑<sup>[66]</sup>.

## 2.2 施药决策模型

### 2.2.1 常规对靶决策模型

常规对靶决策模型在感知到距离阈值内靶标有无后决定是否施药, 并将上述命令进行数字化描述, 通过传输介质将编码完成的信息传输给下位机(一般是 MCU), MCU 依据作者设置好的协议将编码完成的信息进行解码, 从而输出微电信号控制继电器(或 MOS 管等)进而控制电磁阀通断, 以实现无靶标的地方不喷雾、有靶标的地方喷雾<sup>[20, 22]</sup>. 这种仅针对靶标有无进行喷

雾决策的模型适合于幼龄果树或空隙较大的果树,并不太适合宽行密植的现代化果园<sup>[34]</sup>.该模型是根据喷雾机两侧的传感器探测获取信息,但由于传感器数量有限,需要根据冠层高度和喷雾机状态来调整传感器和喷头的位置,同时因传感器及其他因素的影响存在喷雾延时,需要将传感器安装在喷头前,并设置合适的延时时间<sup>[13]</sup>.

20 世纪 70 年代,美国和前苏联等国就已开始研究精准对靶用药.美国于 1981 年试制了对靶喷雾机,采用光电传感探测技术根据目标物有无实现喷雾控制,与连续喷雾相比,可以节省药液 24%~51%<sup>[5, 77]</sup>.在中国,中国农业大学、江苏大学于 1997 年成功研制采用超声波与红外线探测技术的对靶喷雾试验台.中国农业大学药械与施药技术研究中心(Centre for Chemicals Application Technology, CCAT)于 2003 年成功研制出我国第一台基于红外探测技术的果园自动对靶风送静电喷雾机,在果树上的有效沉积率达 45.38%~53.46%,节省农药 50%~75%,试验结果表明其在保证防治效果的前提下可大量减少农药使用量<sup>[29]</sup>.姜红花等<sup>[20]</sup>研制了基于物联网的履带式对靶喷雾风送喷雾机,相比于常规风送喷雾机至少节省 30%的农药,可在节省农药的前提下保证病虫害的防治效果,该技术主要应用在果园中.

### 2.2.2 多态对靶决策模型

相比于常规对靶决策模型,多态对靶决策的施药液量可依据靶标的不同喷施不同的药剂量,不同喷施量间不是连续的,而是离散的,即依据不同的冠层参数控制不同数量喷头的状态,进而实现离散化的变量施药<sup>[78]</sup>.一般而言,多态对靶决策模型主要根据感知到的距离值的大小打开不同数量的喷头,实现距离远不开喷头,较远打开一部分喷头,较近打开大部分喷头,近则全打开<sup>[34]</sup>.Moltó 等<sup>[79]</sup>将该决策模型运用到田间试验,结果显示该模型可以节约 37%的农药,将该模型应用到葡萄园的蚜虫防治中,与普通农药相比,其防治效果无显著差别.刘理民等<sup>[78]</sup>将该决策模型运用到果园中,发现可节省至少 20%的农药量.

### 2.2.3 连续对靶决策模型

连续对靶决策模型可连续调节药剂量以匹配植株冠层特征,主要通过管道压力<sup>[80]</sup>、农药浓度<sup>[81-82]</sup>及脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)电磁阀等<sup>[83-86]</sup>方法来调控喷头最终的药剂量,能实现较大范围内的药剂量调节,进而改变常规施药过程中部分冠层沉积量过量而部分冠层防治不达标的问题<sup>[87-88]</sup>.相关证据表明,根据冠层特征调控喷头喷量,以达到单位冠层液量沉积总量一致,可取得良好的喷施效果,且相比于常规施药 71%的过量施药,根据冠层特征调控喷头喷量仅有 16%的过量施药情况,该决策模型改变了常规喷雾喷施过量的问题<sup>[89]</sup>.连续对靶决策模型主要应用于果树等高大的 3D 作物,可便捷计算不同冠层的农药喷施量.在各种果园病虫害的防治效果中,经  $t$  检验验证该模型与传统风送喷雾机无明显差别<sup>[89]</sup>.

## 3 对靶施药技术的药剂量控制方法

依据对靶决策模型,药剂量控制方法同样被分为开关喷头<sup>[12, 90-92]</sup>、多态变量喷头<sup>[78, 93]</sup>和连续变量控制<sup>[83-86]</sup>3 种主要的控制方法.

### 3.1 开关喷头

开关喷头最为简单,依据感知到目标冠层的有无,通过 MCU 控制电磁阀通断,在靶标区施药,在非靶标区不施药<sup>[20, 22]</sup>.单个可控喷头主要由单个喷头、单个电磁阀、单个继电器和控制器组成,技术简单,性能可靠,是使用范围最广的变量喷头.图 5 所示为一种简单的开关喷头,通过 MCU 控制继电器的通断电使得电磁线圈产生电磁力,进而控制阀芯在阀体内上下运

动,最终控制药液在喷头处喷出与否.

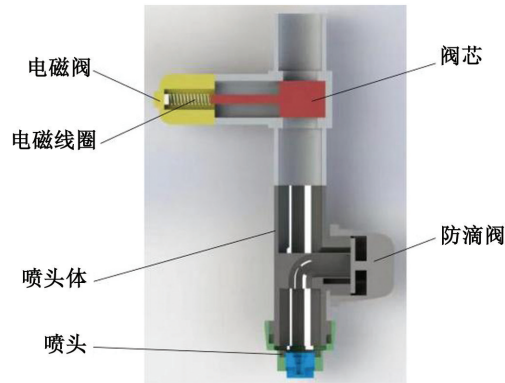


图5 开关喷头的构成要素

### 3.2 多态变量喷头

部分研究人员将多态变量喷头称为组合变量喷头<sup>[93]</sup>或离散变量喷头<sup>[34]</sup>.相比于开关喷头,多态变量喷头具有变量喷雾的优势,即可依据冠层的参数进行变量喷施,但相比于连续变量喷头,不能依据冠层特征参数连续变量喷雾<sup>[78]</sup>.多态变量喷头其实由多个开关喷头或多个类型喷头组成,所以兼有开关喷头和多态变量喷头的优点,不仅可实现变量喷雾,且技术简单,性能可靠<sup>[78, 93]</sup>.

### 3.3 连续变量喷头

连续变量喷头是指通过一系列的技术方法使得最终喷施的农药剂量和目标冠层特征值相匹配,该过程主要为:①PWM,通过调节脉冲占空比频繁开闭电磁阀的时间来调节农药剂量<sup>[94]</sup>;②压力调节,通过改变喷雾压力间接改变喷雾量,该方法调节非线性、难度大、范围小且造成雾滴谱变化,进而造成雾滴沉积不均匀<sup>[88]</sup>;③浓度调节,主要是通过外部的泵及管道将一定量的高浓度农药注入到喷头前,依据冠层特征喷施出不同浓度的药液以调节农药剂量<sup>[82]</sup>.

## 4 对靶施药技术的典型施药机具

### 4.1 典型的对靶喷雾机

中国农业大学药械与施药技术研究中心(CCAT)长期致力于精准施药技术的研究与对应施药机具的开发.如图6所示,CCAT于2003年研制了国内首台基于红外探测的果园静电自动对靶喷雾机,首先将红外探测器发射的红外光进行编码,控制器识别特定编码后的红外光避免了自然界中红外线的干扰,该机在识别到目标靶物后,MCU控制继电器打开电磁阀,喷头处的高压感应环将喷施出的药液感应上静电,同时气流胁迫带电雾滴定向运输至目标冠层,由于风送及静电的作用,相比于普通风送喷雾机,该机的有效附着率可达45.38%~53.46%,可节省50%~75%的农药使用量<sup>[29, 95-96]</sup>.该机型应用于现代化的果园(主要是苹果),其在上述喷雾效果的前提下,对红蜘蛛等聚集在背面及树膛内部的害虫防治效果可达95%以上,对各种隐藏在此处的细菌也有90%以上的防治效果.同时,该技术可应用到大田中,但由于大田作物种植密集,目前尚未被应用到大田中.



图 6 国内首台基于红外探测的果园静电自动对靶喷雾机

#### 4.2 典型的多态对靶喷雾机

相对于一个位置只控制单个喷头通断的普通对靶喷雾,多态对靶喷雾可在一个位置控制多个喷头<sup>[92]</sup>,也可以是控制多个喷头的多种模式<sup>[27, 78]</sup>,可实现变量或其他的目的.如图 7 所示,基于外界自然风风速变化的多态对靶喷雾机,可根据外界风速大小选择普通喷头或防飘喷头,进而减少农药使用过程中的农药飘失.该喷雾机也主要应用在果树等 3D 立体作物中,在农药使用方面,相比于传统的果园喷雾器省药量达 30%以上,农药飘移量减少 20%左右,农药沉积量提高 10%左右,病虫害防治效果提高 5%左右;而与没有防飘的普通型多态对靶喷雾机比较,其省药量达 30%以上,无农药飘移量,农药沉积量没有提高,病虫害防治效果相当<sup>[78]</sup>.

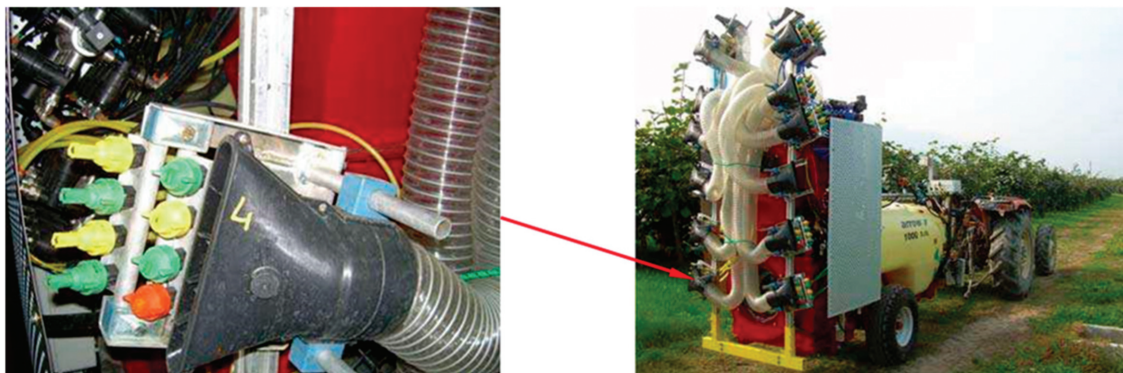


图 7 基于自然风变化的多态对靶喷雾机

#### 4.3 精准变量喷雾机

图 8 所示是中国农业大学药械与施药技术研究中心(CCAT)研制的国内首台自动仿形变量喷雾机.通过 LiADR 激光传感器实时获取树冠立体空间特征信息,集成三维冠层变量喷雾决策、上位机软件处理、下位机自动控制、变量仿形喷雾等技术,根据冠层分割模型及变量决策算法实时调节风机风量和喷头流量,突破了果树不同部位冠层结构与风量和喷雾量难以匹配的

难题,提高了农药有效利用率,降低了喷雾作业过程中农药雾滴飘移与流失,可实现减少施药量 45.7%、雾滴空中飘移 42.7%、地面流失 67.4%<sup>[37, 97]</sup>. 该喷雾同样适用于 3D 立体作物,其农药适量少于上述 2 种机型,同时农药飘失量明显减少;而其在上述喷雾效果的前提下,可对红蜘蛛等聚集在背面及树膛内部的害虫防治效果可达 85% 以上,对各种隐藏在此处的病菌也有 80% 以上的防治效果.



图 8 国内首台自动仿形变量喷雾机

## 5 总结及展望

本文就对靶施药技术的全过程及设备进行了介绍,并通过机器人技术的类比来深化对该技术的理解;同时,本文还从感知—决策—控制 3 个方面对对靶施药技术进行了详细阐述,包括当前主流的冠层感知技术及设备、对靶施药技术的施药计算模型和施药决策模型,以及对靶施药技术的药剂量控制方法,以方便读者更好地了解对靶喷雾技术的实现流程.此外,还介绍了 3 种典型的对靶喷雾机.然而,我国的对靶喷雾技术仍存在一些问题亟待解决.

1) 农机农业相结合.我国部分果园虽然进行了现代化种植改造,但大部分果园依然是传统种植模式,而目前主流的对靶喷雾机却是以现代化果园为范本开发研制.随着近几年国际形势的变化,近期不会新增果园种植面积,只能就目前的传统果园进行现代化改造或研制适合我国传统果园的对靶风送喷雾机.

2) 推广相适应的“傻瓜式”喷雾技术.随着对靶喷雾技术的进一步发展,相关理论研究越来越

越深入,应推广一体化的对靶喷雾设备,还需开发相应的药剂量决策支持系统和手机 APP,实现仅输入果树类型、地点、日期、树冠高度及宽度就可给出当前施药果园所需的合适药剂量,以减少农药的使用、浪费和污染。

3)适合我国的施药计算和决策模型.欧美国家开发的施药决策模型仍为主流,尤其是计算药剂量和喷雾决策模型,在欧洲不同地区,如南欧、北欧和地中海沿岸的其他欧洲国家的上述模型都有一定的差异,这是因为种植模式、各地水土及环境的差异导致同一模型中的参数也不相同,而我国的种植模式、水土和环境与欧洲差异较大,应开发适合我国的施药计算和决策模型。

4)对靶延时与风雾场相结合.由于对靶喷雾控制系统存在响应时间,喷雾机喷施出药液和风需要一定的时间才能到达植株冠层表面,故需要深入研究对靶响应时间的大小和开启风雾场时其达到冠层的时间和变化,进而确定最佳的对靶喷雾延时时间,确保不漏喷且冠层沉积最佳。

5)智慧植保作业.随着我国农业从业人口逐渐减少且老龄化日益严重,全过程自动化的智慧植保作业研制显得尤为重要,智慧植保作业应包括自动驾驶、自动加药、自动喷施、自动补充能源、自动报警、可检测果园作物生长状态和病虫害,并随时上传相关数据。

#### 参考文献:

- [1] 钱旭红.我国绿色化学农药的基础研究进展—先导结构和作用靶标[C]//植物保护科技创新与发展—中国植物保护学会2008年学术年会论文集.重庆,2008:23-24.
- [2] 彭霞.农药靶标乙酰胆碱酯酶的分离纯化及性质研究[D].成都:四川大学,2007.
- [3] 吴士雄.我国的农药市场与靶标防治[J].农药,2000,39(1):7-10.
- [4] 崔丰莉,李鑫,马志卿,等.动物源农药斑蝥素对部分非靶标生物的安全性评价[J].环境昆虫学报,2009,31(2):143-149.
- [5] 何雄奎.中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J].智慧农业(中英文),2020,2(1):133-146.
- [6] 何雄奎.植保精准施药技术装备[J].农业工程技术,2017,37(30):22-26.
- [7] 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.
- [8] 张波,翟长远,李瀚哲,等.精准施药技术与装备发展现状分析[J].农机化研究,2016,38(4):1-5,28.
- [9] 南玉龙,张慧春,徐幼林,等.农林仿形对靶喷雾及其控制技术研究进展[J].世界林业研究,2018,31(4):54-58.
- [10] 闫成功,徐丽明,袁全春,等.基于双目视觉的葡萄园变量喷雾控制系统设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(11):13-22.
- [11] 齐亚聪,杨会民,陈毅飞,等.变量喷雾靶标探测技术研究现状与展望[J].中国农机化学报,2022,43(6):83-89,149.
- [12] 张志宏.山地果园对靶变量施药喷雾机关键技术研究[D].广州:华南农业大学,2019.
- [13] 许林云,张昊天,张海锋,等.果园喷雾机自动对靶喷雾控制系统研制与试验[J].农业工程学报,2014,30(22):1-9.
- [14] 王震涛,牛浩,唐玉荣,等.果园喷雾机械及技术的研究现状[J].塔里木大学学报,2019,31(3):83-91.
- [15] 江世界,马恒涛,杨圣慧,等.果园喷雾机器人靶标探测与追踪系统[J].农业工程学报,2021,37(9):31-39.
- [16] XU Y L, WANG X D, ZHAI Y T, et al. Precise Variable Spraying System Based on Improved Genetic Proportional-Integral-Derivative Control Algorithm [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(14): 3255-3266.
- [17] FAROOQUE A A, HUSSAIN N, SCHUMANN A W, et al. Field Evaluation of a Deep Learning-Based Smart

- Variable-Rate Sprayer for Targeted Application of Agrochemicals [J]. *Smart Agricultural Technology*, 2023, 3: 100073.
- [18] ROMÁN C, LLORENS J, URIBETXE BARRIA A, et al. Spatially Variable Pesticide Application in Vineyards: Part II, Field Comparison of Uniform and Map-Based Variable Dose Treatments [J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 195: 42-53.
- [19] GIL E, ESCOLÀ A, ROSELL J R, et al. Variable Rate Application of Plant Protection Products in Vineyard Using Ultrasonic Sensors [J]. *Crop Protection*, 2007, 26(8): 1287-1297.
- [20] 姜红花, 白鹏, 刘理民, 等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(S1): 189-195.
- [21] 韩冷, 何雄奎, 王昌陵, 等. 智慧果园构建关键技术装备及展望 [J]. *智慧农业(中英文)*, 2022, 4(3): 1-11.
- [22] 刘理民. 基于果树冠层探测的变量喷雾技术研究及试验 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [23] 刘理民, 王金宇, 毛文华, 等. 基于传感器融合阵列的果树冠层信息采集方法 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(S1): 347-353, 359.
- [24] WEI Z M, XUE X Y, SALCEDO R, et al. Key Technologies for an Orchard Variable-Rate Sprayer: Current Status and Future Prospects [J]. *Agronomy*, 2022, 13(1): 59.
- [25] ROSELL J R, SANZ R. A Review of Methods and Applications of the Geometric Characterization of Tree Crops in Agricultural Activities [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 81: 124-141.
- [26] BAO X L, NIU Y X, LI Y S, et al. Design and Kinematic Analysis of Cable-Driven Target Spray Robot for Citrus Orchards [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(18): 9379.
- [27] BALSARI P, DORUCHOWSKI G, MARUCCO P, et al. A System for Adjusting the Spray Application to the Target Characteristics [J]. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2008.
- [28] DORUCHOWSKI G, JAEKEN P, HOLOWNICKI R. Target Detection as a Tool of Selective Spray Application on Trees and Weeds in Orchards [C]//Proc SPIE 3543, Precision Agriculture and Biological Quality, 1999, 3543: 290-301.
- [29] 邹建军, 曾爱军, 何雄奎, 等. 果园自动对靶喷雾机红外探测控制系统的研制 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(1): 129-132.
- [30] 刘金龙, 郑泽锋, 丁为民, 等. 对靶喷雾红外探测器的设计与探测距离测试 [J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(7): 368-370.
- [31] 窦汉杰, 翟长远, 王秀, 等. 基于 LiDAR 的果园对靶变量喷药控制系统设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(3): 11-21.
- [32] 毛文华, 曹晶晶, 姜红花, 等. 基于多特征的田间杂草识别方法 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 206-209.
- [33] 姜红花, 王鹏飞, 张昭, 等. 基于卷积网络和哈希码的玉米田间杂草快速识别方法 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 30-38.
- [34] 周良富, 薛新宇, 周立新, 等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(23): 80-92.
- [35] 谷趁趁, 翟长远, 陈立平, 等. 基于激光雷达的树形靶标冠层叶面积探测模型研究 [J]. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 278-286.
- [36] 翟长远, 赵春江, 王秀, 等. 树型喷洒靶标外形轮廓探测方法 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 173-177.
- [37] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 70-76.
- [38] 阎广建, 胡容海, 罗京辉, 等. 叶面积指数间接测量方法 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 958-978.
- [39] YAN G J, HU R H, LUO J H, et al. Review of Indirect Optical Measurements of Leaf Area Index: Recent Advances, Challenges, and Perspectives [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 390-411.
- [40] CUI L, JIAO Z T, ZHAO K G, et al. Retrieval of Vertical Foliage Profile and Leaf Area Index Using Trans-

- mitted Energy Information Derived from ICESat GLAS Data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2457.
- [41] SANZ R, ROSELL J R, LLORENS J, et al. Relationship between Tree Row LIDAR-Volume and Leaf Area Density for Fruit Orchards and Vineyards Obtained with a LIDAR 3D Dynamic Measurement System [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171-172: 153-162.
- [42] JONCKHEERE I, FLECK S, NACKAERTS K, et al. Review of Methods for in Situ Leaf Area Index Determination [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1-2): 19-35.
- [43] 谷趁趁. 苹果园风送喷药靶标特征探测与风力损失模型研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [44] SANZ R, LLORENS J, ESCOL? A, et al. LIDAR and Non-LIDAR-Based Canopy Parameters to Estimate the Leaf Area in Fruit Trees and Vineyard [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 260-261: 229-239.
- [45] 翟肇裕, 曹益飞, 徐焕良, 等. 农作物病虫害识别关键技术研究综述 [J]. *农业机械学报*, 2021, 52(7): 1-18.
- [46] LIU J, WANG X W. Plant Diseases and Pests Detection Based on Deep Learning: a Review [J]. *Plant Methods*, 2021, 17(1): 22.
- [47] SINGH V, MISRA A K. Detection of Plant Leaf Diseases Using Image Segmentation and Soft Computing Techniques [J]. *Information Processing in Agriculture*, 2017, 4(1): 41-49.
- [48] HUANG H S, DENG J Z, LAN Y B, et al. Detection of Helminthosporium Leaf Blotch Disease Based on UAV Imagery [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(3): 558.
- [49] 王卫星, 刘泽乾, 高鹏, 等. 基于改进 YOLO v4 的荔枝病虫害检测模型 [J]. *农业机械学报*, 2023, 54(5): 227-235.
- [50] CHEN J D, CHEN J X, ZHANG D F, et al. A Cognitive Vision Method for the Detection of Plant Disease Images [J]. *Machine Vision and Applications*, 2021, 32(1): 31.
- [51] SOH A C, RADZI N F M, YUSOF U K M, et al. Development of Electronic Nose for Classification of Aromatic Herbs Using Artificial Intelligent Techniques [J]. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2018, 13(10): 3043-3057.
- [52] ERDEM S, FATIH E, NASIE C, et al. Electronic Nose System Based on a Functionalized Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (CMUT) Array for Selective Detection of Plant Volatiles [J]. *Sensors and Actuators: B Chemical*, 2021, 341: 130001.
- [53] OATES M J, ABU-KHALAF N, MOLINA-CABRERA C, et al. Detection of Lethal Bronzing Disease in Cabbage Palms (Sabal Palmetto) Using a Low-Cost Electronic Nose [J]. *Biosensors*, 2020, 10(11): 188.
- [54] 刘理民, 何雄奎, 刘亚佳. 多功能果园作业平台安全性研究进展 [J]. *农业工程*, 2020, 10(12): 7-13.
- [55] BBA, 1988. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 1988 Pflanzenschutzmittel-Verzeichnis, Teil 2 - Gemüsebau - Obstbau - Zierpflanzenbau. BBA Braunschweig, 1988.
- [56] STRELOKE M. The Establishment of a Long-Term Toxicity Test on Sediment-Dwelling Organisms in the Registration Procedure of Plant Protection Products [J]. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem*, 1995(315): 85-96.
- [57] GARCERÁ C, DORUCHOWSKI G, CHUECA P. Harmonization of Plant Protection Products Dose Expression and Dose Adjustment for High Growing 3D Crops: a Review [J]. *Crop Protection*, 2021, 140: 105417.
- [58] FRIESSLEBEN R, ROSSLENBROICH H, ELBERT A. Dose Expression in Plant Protection Product Field Testing in High Crops: Need for Harmonization [J]. *Pflanzenschutz Nachrichten Bayer English Edition*, 2006, 60(1): 85-96.
- [59] RÜEGG J, SIEGFRIED W, RAISIGL U, et al. Registration of Plant Protection Products in EPPO Countries: Current Status and Possible Approaches to Harmonization [J]. *EPPO Bulletin*, 2001, 31(2): 143-152.
- [60] RÜEGG J, VIRET O, RAISIGL U. Adaptation of Spray Dosage in Stone-Fruit Orchards on the Basis of Tree Row Volume [J]. *EPPO Bulletin*, 1999, 29(1-2): 103-110.

- [61] RÜEGG J, VIRET O. Determination of the Tree Row Volume in Stone-Fruit Orchards as a Tool for Adapting the Spray Dosage [J]. EPPO Bulletin, 1999, 29(1-2): 95-101.
- [62] BYERS R E, HICKEY K D, HILL C H. Base gallonage per acre[J]. Virginia Fruit, 1971, 60(8): 19-23.
- [63] BYERS R E. Tree-Row-Volume Spraying Rate Calculator for Apples [J]. HortScience, 1987, 22(3): 506-507.
- [64] HERRERA-AGUIRRE E, UNRATH C R. Chemical Thinning Response of ‘Delicious’ Apples to Volume of Applied Water1 [J]. HortScience, 1980, 15(1): 43-44.
- [65] MANKTELOW D W L, PRAAT J P. The Tree-Row-Volume Spraying System and Its Potential Use in New Zealand [J]. Proceedings of the New Zealand Plant Protection Conference, 1997, 50: 119-124.
- [66] SANTIAGO P, CARLA R, RICARDO S, et al. Bases for Pesticide Dose Expression and Adjustment in 3D Crops and Comparison of Decision Support Systems [J]. The Science of the Total Environment, 2021, 806: 150357.
- [67] SIEGFRIED W, VIRET O, HUBER B, et al. Dosage of Plant Protection Products Adapted to Leaf Area Index in Viticulture [J]. Crop Protection, 2007, 26(2): 73-82.
- [68] Dose Expression for Plant Protection Products[J]. EPPO Bulletin, 2005, 35(3): 563-566. DOI: 10.1111/j.1365-2338.2005.00866.x.
- [69] KOCH H, WEISSER P. Aufwandmenge und Initialbelag am Zielobjekt-zwei Kenngrößen für Applikation und Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln [J]. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 1995, 47(11): 273-278.
- [70] WALKLATE P J, CROSS J V, PERGHER G. Support System for Efficient Dosage of Orchard and Vineyard Spraying Products [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(2): 355-362.
- [71] ROSELL POLO J R, SANZ R, LLORENS J, et al. A Tractor-Mounted Scanning LIDAR for the Non-Destructive Measurement of Vegetative Volume and Surface Area of Tree-Row Plantations: a Comparison with Conventional Destructive Measurements [J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(2): 128-134.
- [72] WALKLATE P J, CROSS J V, RICHARDSON G M, et al. IT—Information Technology and the Human Interface [J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(3): 253-267.
- [73] PLANAS S, CAMP F, ESCOLÀ A A, et al. Advances in Pesticide Dose Adjustment in Tree Crops[C]//Precision agriculture’13. Wageningen Academic Publishers, 2013: 533-539.
- [74] SANZ-CORTIELLA R, LLORENS-CALVERAS J, ESCOLÀ A, et al. Innovative LIDAR 3D Dynamic Measurement System to Estimate Fruit-Tree Leaf Area [J]. Sensors, 2011, 11(6): 5769-5791.
- [75] HOLTERMAN H J, VAN DE ZANDE J C, HUIJSMANS J F M, et al. An Empirical Model Based on Phenological Growth Stage for Predicting Pesticide Spray Drift in Pome Fruit Orchards [J]. Biosystems Engineering, 2017, 154: 46-61.
- [76] RINALDI M, LLORENS J, GIL E. Electronic Characterization of the Phenological Stages of Grapevine Using a LIDAR Sensor [C]//Precision Agriculture ’13, Wageningen Academic Publishers, 2013: 603-609.
- [77] 何雄奎. 高效植保机械与精准施药技术进展 [J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 389-397.
- [78] 刘理民, 张晓辉, 石光智, 等. 多态自动对靶风送式喷雾试验台的设计与试验 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 260-263.
- [79] MOLTÓ E, MARTIN B, GUTIERREZ A. Pesticide Loss Reduction by Automatic Adaptation of Spraying on Globular Trees [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(1): 35-41.
- [80] GONZALEZ R, PAWLOWSKI A, RODRIGUEZ C, et al. Design and Implementation of an Automatic Pressure-Control System for a Mobile Sprayer for Greenhouse Applications [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2012, 10(4): 939.
- [81] 代祥, 徐幼林, 陈骏阳, 等. 射流混药器改进提高混药均匀性及动态浓度一致性 [J]. 农业工程学报, 2019,

- 35(8): 65-74.
- [82] 蔡祥, WALGENBACH M, DOERPMUND M, 等. 基于电磁阀的喷嘴直接注入式农药喷洒系统 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 69-72, 200.
- [83] 魏新华, 蒋杉, 孙宏伟, 等. PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器设计与测试 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 87-93, 129.
- [84] 邓巍, 丁为民, 何雄奎. PWM 间歇式变量喷雾的雾化特性 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 74-78.
- [85] 印祥, 王亚林, 杜娟, 等. 基于 PWM 的电控精量喷嘴体设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 18-26.
- [86] 代祥, 肖静, 徐幼林, 等. 动态下电磁阀控对靶喷雾流量特性及控制方法 [J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 476-483.
- [87] 邱白晶, 李坤, 沈成杰, 等. 连续可变量喷雾系统响应特性试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 32-35, 79.
- [88] 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 59-72.
- [89] CHEN Y, ZHU H, OZKAN H E. Development of a Variable-Rate Sprayer with Laser Scanning Sensor to Synchronize Spray Outputs to Tree Structures [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(3): 773-781.
- [90] 刘理民, 何雄奎, 刘伟洪, 等. 果园自主导航兼自动对靶喷雾机器人 [J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 63-74.
- [91] 庄进. 果园仿形变量对靶喷雾机设计与靶标探测方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [92] 杨征鹤. 基于 LiDAR 的温室对靶喷雾机器人设计与试验 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [93] 徐艳蕾, 包佳林, 付大平, 等. 多喷头组合变量喷药系统的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 47-54.
- [94] RAMÓN S, ZHU H P, ERDAL O, et al. Reducing Ground and Airborne Drift Losses in Young Apple Orchards with PWM-Controlled Spray Systems [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 189: 106389.
- [95] 何雄奎, 严苛荣, 储金宇, 等. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 78-80.
- [96] 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.
- [97] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 56-63.

责任编辑 苏荣艳