doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.001

作物冠层雾滴沉积研究进展与展望

刘雪美[1,2]　刘兴华[1,2]　崔慧媛[1]　苑　进[1,2]

(1.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018;2.山东省农业装备智能化工程实验室,泰安 271018)

摘要:精准施药的目标是实现冠层内雾滴的全覆盖和均匀沉积。然而,作物冠层形态、郁闭度和枝叶力学参数等特征差异大,需综合靶标特征参数、器械施药能力、施药环境条件等作业工况参数,才能实现最少药液用量和最佳雾滴沉积的双重目标,从而提高药液利用率、确保防治效果、降低环境污染。雾滴沉积机理、检测与分析是精准施药参数优化与控制的决策依据,成为数字化、智能化植保作业装备技术发展的研究热点。首先分析了不同施药方式下冠层内雾滴沉积过程及辅助手段对沉积性能的影响机理,归纳了改善作物冠层内雾滴沉积的不同研究视角、方法和层次。然后从沉积性能田间试验研究、沉积机理分析与建模、雾滴沉积检测与评价、施药作业参数优化等方面重点阐述,分析了近年来冠层雾滴沉积中雾滴、枝叶、气流等交互作用研究的共性关键问题,归纳了该领域技术研究的开放性问题。最后总结了精准施药技术中作物冠层雾滴沉积相关研究面临的挑战和机遇,提出了融合多源传感技术和大数据分析及深度学习等人工智能技术,构建作物冠层雾滴运移及沉积数字孪生体,实现冠层雾滴运移沉积过程数字化描述与分析的研究建议。

关键词:精准施药;雾滴沉积;沉积机理;参数优化

中图分类号:S49　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)11-0001-20　　**OSID**:

Research Progress and Trend Analysis of Crop Canopy Droplet Deposition

LIU Xuemei[1,2]　LIU Xinghua[1,2]　CUI Huiyuan[1]　YUAN Jin[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Shandong Agricultural Equipment Intelligent Engineering Laboratory*, *Taian* 271018, *China*)

Abstract: The goal of precise application is to achieve full coverage and uniform deposition of droplets in the canopy. However, the characteristics of crop canopy morphology, canopy closure and mechanical parameters of branches and leaves are different. It is necessary to integrate target characteristic parameters, equipment application ability, spraying environment and operating conditions to achieve the minimum dosage and optimal fogging, which can increase the utilization rate of the chemical solution, ensure the prevention and control effect, and reduce environmental pollution. The droplet deposition mechanism, detection and analysis are the decision-making basis for the optimization and control of precise application parameters, which have become a research hotspot in the development of digital and intelligent crop protection. Firstly, the droplets deposition process in canopy and its influencing factors by different application methods was analyzed. Secondly, the various research perspectives, methods and levels of droplet deposition were introduced from four directions: empirical research on deposition performance, analysis and modeling of deposition mechanism, detection and evaluation of droplet deposition, and operating parameters optimization of pesticide application. The common key issues in recent study of the interaction of droplets, branches and leaves, and airflow in canopy droplet deposition were analyzed, and the open problems in this field research were proposed. Finally, the challenges and opportunities faced by the crop canopy droplet deposition research in precision application were summarized. And it was suggested to integrate multi-source sensing technology, big data analysis and deep learning and other artificial intelligence technologies to build a digital twin of crop canopy droplet transport and deposition, so as to realize the digital description and analysis of canopy droplet transport and deposition process.

Key words: precision spraying; droplets deposition; deposition mechanism; parameter optimization

收稿日期:2021-08-10　修回日期:2021-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52075308)和山东省棉花产业技术体系产业创新团队项目(SDAIT-03-09)

作者简介:刘雪美(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事精准施药技术与智能植保装备研究,E-mail:lxmyjw@126.com

0 引言

我国农作物病虫害多发频发重发,年发生面积近 5 亿公顷次,农产品损失近 4 000 万 t,以虫害为例,2012 年粘虫、2017 年红蜘蛛、2018 年棉铃虫、2019—2020 年草地贪夜蛾暴发成灾。另一方面,植物化学保护仍是当前最主要的病虫害防控方法,对保障农业生产安全与粮食有效供给起至关重要作用。我国从 2015 年 2 月 17 日开始实施“农药零增长”战略,“十三五”重点解决从精准施药 2.0(植保机械化)到精准施药 3.0(植保智慧化)的提升,提前 3 年实现了农药使用量零增长的目标。

2019 年我国农药利用率已达 39.8%,然而仍有超过 60% 的农药造成了浪费,精准施药仍有较大减药增效空间和环保潜力,农药利用率每提高 1%(相当于减药 1.3 万 t/a),可挽回 75 万 t 粮食损失。随着世界各国对气候安全和环境安全重要性认识的不断提高,我国“绿水青山”和“农药负增长”等环保战略亦逐步升级,植保作业面临保障产量和环境安全双重压力,精准施药技术亟待进一步提高,以期实现精准施药 4.0(植保绿色化/生态化),即“更少药量,更均匀覆盖,更佳防效”。

作物冠层内雾滴的沉积是植保喷雾作业的基础,是决定施药质量的关键环节,也是当前精准施药技术研究热点问题之一。农业农村部《全国草地贪夜蛾防控方案》指出:“玉米等作物高秆期,全株喷雾;幼虫盛发期,重点喷植株中下部。”同时,冠层内雾滴沉积均匀性与防治效果具有显著一致性[1]。因此,雾滴的全株覆盖和均匀沉积是确保防治效果的先决条件,能显著提高防治效果,最大限度地减少施药量和施药次数,提高农药利用率。

冠层雾滴沉积过程,是指具有一定初速度和粒径谱分布的惯性雾滴群到达冠层表面后,在多种作用力综合作用下雾滴群在枝叶孔隙内穿透、撞击、反弹,最终部分雾滴铺展在枝叶表面的复杂行为。为明晰作物冠层雾滴沉积过程与规律,国内外学者从面向不同作物及机具的实例试验、雾滴沉积仿真分析、沉积预测与检测等方面,开展了大量有益研究。

为明晰作物冠层雾滴沉积研究进展与存在的问题,本文在阐述多因素影响下冠层内雾滴沉积过程的基础上,从沉积性能研究、沉积机理分析与建模、雾滴沉积检测与评价和施药作业参数优化等方面,对冠层雾滴沉积研究历程和成果进行梳理,重点分析雾滴、气流、枝叶的动态耦合机理,归纳该领域的开放性问题,并对雾滴沉积研究发展趋势和新技术应用进行展望和探讨。

1 冠层内雾滴沉积衰减现象及改善机理分析

合理密植、提高产量的现代农艺要求下,密植作物芽期、苗期等生长前期的稀疏枝叶尚不稠密,但生长中后期易于形成高郁闭度冠层。虽然此时植保施药的药液地面流失率减少,但植株中下层或冠层内部沉积衰减,整体沉积均匀性差,药液有效利用率不高。其原因在于:雾滴群首先被浓密的表层叶片截获,未被截获的雾滴继续向内穿透,但未被截获的雾滴量递减,在植株内层沉积率远低于植株表层沉积率,出现“雾滴沉积衰减”现象。研究表明[2]:高郁闭度冠层比中低密度冠层沉积均匀率低约 40%。

影响作物冠层内雾滴均匀沉积的因素众多。植保喷雾所面对的农作物种类繁多、靶标特征各异,其冠层形态、生长时期、郁闭度和枝叶力学参数等均会影响雾滴的冠层沉积分布。同时,器械施药能力、施药环境条件等因素亦会影响雾滴的冠层沉积行为。因此,作物冠层雾滴沉积是多因素综合作用下,具有耦合性、非线性、不确定性的复杂动态过程。

为了提高雾滴在冠层内穿透分布的均匀性、提高雾滴在叶片正反面的附着沉积等目标,植保喷雾作业依据不同作业场景,采用强制气流、静电喷雾[3]、吊杆喷雾、仿形喷雾、机械扰动[4]等各种辅助手段。辅助手段的运用,可有效改善冠层内雾滴沉积均匀性,有利于精准施药,其改善作用主要体现为两方面:

(1)优化雾滴输运通道,增加雾滴在冠层内部的穿透能力和分配比例。具体措施为:对作物枝叶施加风力或机械载荷,引起枝叶变形,增大冠层孔隙率,扩展输运通道,或直接选择作物高孔隙率分布的喷雾角,实现雾滴在冠层内高孔隙率路径下运移。

(2)增强雾滴变轨运移能力,改善冠层内部枝叶和叶片背面的沉积比例。具体措施为:通过对雾滴施加额外约束力,例如气流曳力增加雾滴在迂曲枝叶孔隙内的运移距离,或静电喷雾增加雾滴枝叶与雾滴间电场引力以改变雾滴运动轨迹,使雾滴能够在冠层内部处和叶片背面沉积,提高沉积均匀性。各类辅助措施改善冠层雾滴穿透沉积的作用机制如图 1 所示。

传统喷雾中,如手持式喷雾器、普通喷杆喷雾机、果园或温室固定式喷雾系统是典型的无辅助手段的传统喷雾机具,在早期植保喷雾中应用广泛。雾滴生成主要源于压力或离心力作用,使之产生一定的初速度,惯性雾滴群在重力和空气粘滞阻力影响下运移穿行于枝叶构成的孔隙内,进而撞击并铺展于枝叶表面,其运移沉积过程主要受雾滴粒径、雾

	优化雾滴输运通道		增强雾滴在冠层内的变轨运移能力
	增大孔隙率	寻找高孔隙率路径运移	
传统手段	N	N	N
强制气流	Y	N	Y
静电喷雾	N	N	Y
吊杆喷雾	N	Y	N
仿形喷雾	N	Y	N
机械扰动	Y	N	N

图 1　冠层雾滴穿透沉积的影响途径框图

Fig. 1　Block diagram of impact path for droplets penetration and deposition inside plant canopy

滴初速度、冠层形态、叶密度等参数的综合影响。惯性雾滴变轨能力较弱，难以穿透枝叶迂曲孔隙。因此，传统喷雾模式面对冠层枝叶稀疏或苗期等低郁闭度作物，尚可达到较好的雾滴沉积均匀性与植保防效，但生长中后期枝叶繁多、冠层郁闭的作物（如棉花、玉米、果树等），冠层内部和叶片背面难以取得理想的雾滴沉积均匀性。

强制气流作为辅助喷雾技术，无论无人机的下洗气流，还是地面机械的风送气流，当气流胁迫雾滴群到达冠层后，气流可改变冠层孔隙率，增加雾滴穿透力，有益于全株覆盖和均匀沉积，是实现超低量施药、提高农药有效利用率的最佳施药方式之一。强制气流能够在两方面改善冠层内沉积：通过较大的风速对作物冠层枝叶施加风力载荷，迫使柔性枝叶弯曲变形，可以拓宽冠层孔隙，打开雾滴进入冠层内部的配送通道；同时可以借助气流曳力，胁迫雾滴在枝叶孔隙内变轨运动，提高穿透能力。多旋翼植保无人机[5]（图 2a）、风幕式喷杆喷雾机[6]（图 2b）等是开展气流辅助喷雾的实用化机具。

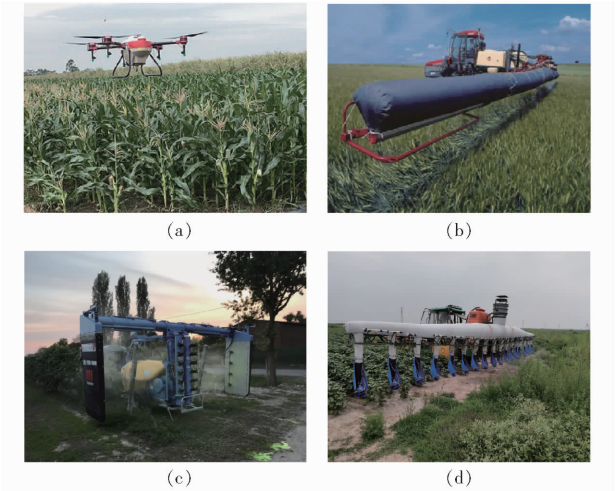


图 2　多种辅助措施下的喷雾施药

Fig. 2　Pesticide spraying with various assistant methods

静电喷雾借助电晕、感应和接触荷电方式使雾滴带有电荷，使得荷电雾滴群与冠层枝叶间建立感应静电场，增强雾滴变轨运移能力[7]。荷电雾滴群在惯性力作用下在枝叶孔隙内运移过程中，穿透冠层表面的枝叶进入冠层内部后，荷电雾滴在电场力作用下，对于叶片正面能够稳定吸附，对于叶片背面能够实现环绕吸附，克服雾滴不易在叶片背面沉积难题，从而降低了地面流失率，增加了叶片沉积率。常规施药中，在阔叶叶片背面不容易沉积，因此静电喷雾在阔叶类作物的病虫害防治中具有显著优势（图 2c）。

吊杆喷雾的吊杆结构深入稠密枝叶内部，避开冠层上部郁闭层的遮挡，在植株群体内部沿高孔隙率路径喷雾施药，有利于雾滴在郁闭冠层内部的均匀附着沉积[8]（图 2d）。面向果园各类果树的仿形喷雾，其技术思路与吊杆喷雾有相似之处，通过仿形结构，实现雾滴沿多角度高孔隙率路径向果树冠层内部送药。机械扰动[4]方式通过拨杆或罩盖等机构拨开冠层郁闭枝叶，扩展雾滴运移通路，有利于雾滴深入冠层内部沉积。

上述分析表明，影响雾滴沉积的因素众多，除喷雾流量、雾化压力、雾滴粒径等因素外，在各类辅助措施应用背景下，枝叶力学参数、孔隙率、叶密度、冠层形态、气流速度、荷质比、分禾深/宽度等因素均会影响雾滴在冠层内的运动沉积。因此，改善作物冠层内雾滴沉积的实质是强制气流、雾滴荷电、机械扰动等辅助手段与冠层枝叶交互下，在重力、气流曳力、静电场力等作用下，优化惯性雾滴颗粒在冠层枝叶间形成的雾滴群穿透、分配、运移变轨和叶面附着行为。

2　冠层雾滴沉积研究进展

2.1　沉积性能田间试验研究

针对水稻、小麦、棉花、果树等冠层形态各异的多种作物，国内外学者结合喷杆喷雾机、气流辅助喷雾机、多旋翼无人机、静电喷雾机等多种作业装备[9]，开展了大量作物冠层雾滴沉积的田间试验研究，总结多种工况下最佳喷雾作业参数的选择，为植保装备的精准施药应用提供了重要应用实例和数据支撑。

2.1.1　传统喷雾

传统喷杆喷雾机凭借宽喷幅、高效率等优势，在喷雾植保作业尤其是大田作物中应用广泛。业内学者先后针对小麦、水稻、棉花、燕麦[10]、盆栽作物[11]、大豆[12]、花生[13]等作物，试验研究了喷头类型、雾滴粒径、喷雾量、喷雾角度等参数对作物

冠层雾滴沉积分布的影响,发现所有喷雾工况下各类作物的冠层雾滴沉积整体趋势一致,即沿药液雾滴喷施方向,雾滴沉积量由冠层外部至内部逐层减少,呈现雾滴沉积衰减现象,证实了冠层枝叶对雾滴穿透运移具有显著影响。同时,具体作业参数对冠层内雾滴沉积分布的影响具有差异性:施药量比雾滴粒径对覆盖率的影响更大;倾斜喷雾角比垂直叶面的喷雾角更有利于雾滴向冠层内部穿透运移;空气诱导喷嘴产生的雾滴具有较好的穿透能力,空心锥形喷嘴次之,常规扇形喷嘴的雾滴穿透能力最弱。

2.1.2 强制气流喷雾

辅助气流对雾滴具有二次雾化、加速增能、胁迫运移等功能优势,使气流辅助喷雾技术受到重视,并得到迅速发展。气流辅助喷雾技术与喷雾机相融合,提高了雾滴的穿透能力、防飘移能力,有效改善了雾滴沉积均匀性和防治效果,两者的结合表现为多种形式:风幕式喷杆喷雾机(大田)、风送式喷雾机(果园)、植保无人机等。由于气流辅助喷雾具有的技术优势,学者开展了大量不同机具应用于不同靶标作物的喷雾沉积田间试验研究。

(1)风幕式喷杆喷雾

风幕式喷杆喷雾是气流辅助喷雾技术最早的应用形式,Hardi、John Deere、黄海药械、华盛药械等公司开发了多款机型。众多学者也结合风幕式喷杆喷雾机开展了相关研究。HISLOP 等[14]针对成熟期春小麦、FOQUÉ 等[15]针对盆栽藤类作物分别开展了气流辅助喷雾试验,证实了辅助气流能够提高雾滴的穿透能力、增加叶片背面沉积量,改善沉积均匀性。利用 PDPA 系统捕获的雾滴轨迹也试验证实了辅助气流对雾滴的胁迫和加速作用,发现风幕出风口与药液喷嘴的水平距离越近,雾滴的加速效果越好,穿透能力越强[16-17]。虽然辅助气流具有胁迫雾滴运移、改善沉积均匀性的优势,但风速、风量等参数需要经过合理选择。利用 4 种型号扇形喷头的风幕式喷雾沉积试验表明,风幕对小粒径雾滴的影响更明显,可以提高雾滴的穿透能力和覆盖率;但是,有风幕时农药的地面流失率也比无风幕有所增加。这一研究说明不合理的风送喷雾施药参数可能导致雾滴直接吹向地面,不利于减药增效。

针对作物生长中后期冠层郁闭,不利于雾滴穿透沉积的问题,吊杆结构可以借助机械刚性吊臂将药液送入冠层内部进行雾化喷药,提高冠层内雾滴沉积均匀性。FOQUÉ 等[18]开展了针对月桂树冠层的吊杆喷雾试验,药液沉积结果表明吊杆喷雾技术可有效改善冠层内上中下部的药液沉积均匀性,是一种具有应用潜力的喷雾施药技术。国内学者也开展了吊杆喷雾技术的田间试验研究,以玉米作物为主要试验对象,证实了吊杆结构能够有效突破枝叶屏障,可以在冠层中下部实现稳定沉积[19-20]。为进一步提升吊杆喷雾冠层雾滴的沉积均匀性,将喷杆结构和吊杆结构相结合,同时利用强制气流强化雾滴的冠层穿透能力,实现分行冠内冠上组合风送式喷杆喷雾,结合了吊杆结构和强制气流的技术优势,施药效果提升明显[21-22],如图 3 所示。



图 3 冠内冠上组合风送式喷杆喷雾机

Fig. 3 Air-assisted boom sprayer with spraying in inside and upper canopy

(2)风送式喷雾

风送式喷雾是利用轴流风机输出的强制气流,以环形出风、塔式出风、多头掌式出风或固定管道式等形式向冠层送风,胁迫雾滴向靶标运移,实现植保喷雾作业的一类机型,在果园各类果树中应用广泛。

横流式喷雾机、离心风送式喷雾机、多出风口喷雾机机型是风送式喷雾的主要机具形式(图 4a),相应的喷雾试验研究表明梨树和苹果树冠层内雾滴沉积分布云图与气流分布具有明显相关性,量化证明了辅助气流对雾滴沉积分布的改善效果;同时,试验结果也表明作物冠层叶密度、孔隙率、冠层体积等作物形态参数对雾滴沉积影响显著[23]。为了实现根据作物冠层形态特征在线变量施药,对多头掌式风送喷雾机[24](图 4b)和离心风送式喷雾机[25](图 4c)加装激光扫描传感器和 PWM 变量调节机构,针对苹果树冠层的喷雾施药试验结果表明,通过

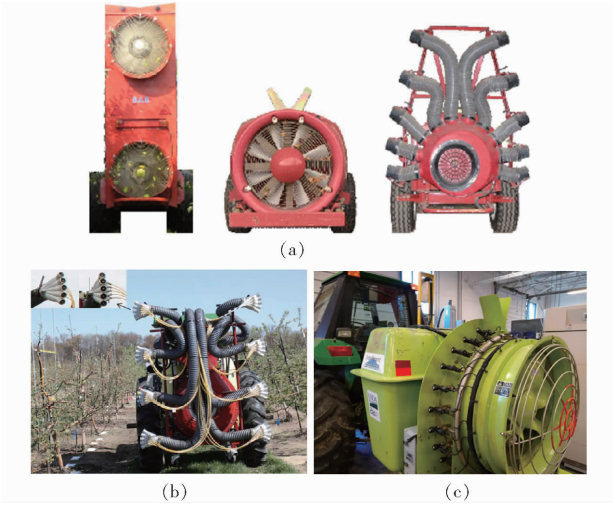


图 4 多类型气流辅助喷雾机

Fig. 4 Various types of air-assisted sprayer

感知冠层形态特征在线调节药液用量，能够在节约药量 27% ~53% 的基础上，实现与非变量喷雾等效的冠层雾滴沉积效果，试验证实了根据靶标形态特征在线变量施药，是提高药液利用率的有效手段。仿形变量喷雾考虑了靶标作物形态特征，可依据果树树冠特征实时调节喷雾参数，对比试验研究表明[26-27]：相比于离心式和定向式风送喷雾形式，仿形变量喷雾的纵向沉积从上到下逐步增加的趋势，实现纵向雾滴沉积的仿形分布，有效改善防治效果。针对温室植保作业环境，固定管道式常温烟雾系统作为一种喷雾作业方式，李雪等[28]分析了其风场腹部特性和雾滴沉积分布特性，研究得出风送气压 0.3 MPa、药液压力 0.05 MPa 为最优作业参数。

（3）植保无人机喷雾

强制气流能够有效提升植保喷雾效率这一优势，不仅体现在风幕式喷杆喷雾机、风送式喷雾机等地面机械，在航空植保喷雾领域中亦有展现。

航空植保喷雾中，单旋翼/多旋翼电动或油动无人机是主要的机具形式，其作业过程的实质是旋翼下洗气流与作物冠层交互影响下雾滴在冠层内的穿透沉积过程。一方面，作物冠层形态特征会对雾滴穿透沉积造成影响，比如面向水稻、小麦、柑橘、椰树、槟榔等多种作物的喷雾沉积试验和作业参数优化研究表明，不同作物的雾滴沉积量和沉积均匀性对飞行高度、飞行速度、喷雾流量等作业参数的敏感度存在差异[29-30]，如图 5 所示，说明了不同作物的形态特征会影响冠层雾滴沉积效果；另一方面，作为胁迫雾滴运移的载体，下洗气流也会影响雾滴在冠层内的沉积行为，比如，许童羽等[31]以粳稻为试验对象，研究发现多旋翼植保无人机低空喷雾时，沿垂直方向雾滴沉积衰减明显，有效喷幅内旋翼下方区域的雾滴覆盖效果最好，而远离旋翼的位置，雾滴覆盖率较差，再如，AHAMD 等[32]通过单旋翼无人机田块外杂草防治试验，发现随飞行高度和速度的降低，下洗气流对作物冠层影响增强，雾滴沉积量、雾滴密度呈增长趋势。由于航空植保喷雾具有不受地形及耕地状态限制、便于进场作业的技术优势，业内学者开展了针对棉花、枣树、梨树等多种作物[33-34]的航空植保冠层雾滴沉积试验分析，研究了多种作业参数对雾滴沉积的影响，并给出了适应不同作物植保防控需求的优化作业参数组合。

2.1.3　静电喷雾

相比于前述喷雾方式，静电喷雾施药过程中荷电雾滴的运动沉积行为拥有独有的影响因素——静电场力。荷电雾滴在冠层内的变轨运移能力增强，有助于雾滴在枝叶表面，尤其是叶片背面沉积附着。

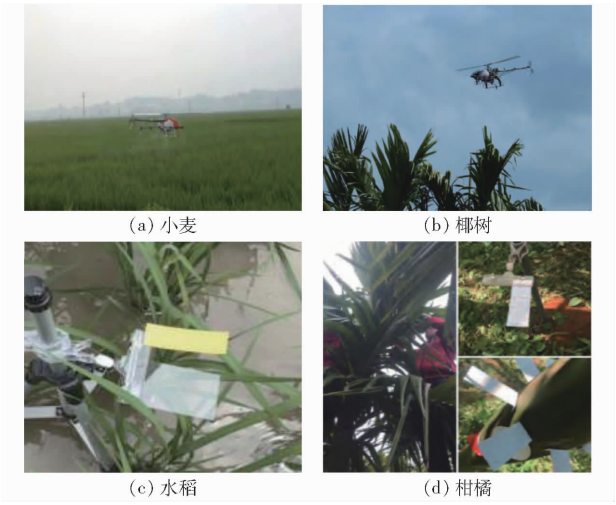


图 5　面向多种作物的航空植保田间试验

Fig. 5　Field experiment of aerial plant protection for various crops

面向植保喷雾作业的静电喷雾技术的研究和应用起源于美国，并逐步受到国际植保工作者的关注。

由于荷电雾滴在静电场力作用下具有更强的变轨运移能力，其更容易在作物冠层枝叶上附着和沉积。以棉花为喷雾对象，航空静电喷头和离心式雾化喷头的对比喷雾试验表明，与非静电喷雾相比，静电喷雾使冠层叶片正面的雾滴覆盖率增加了 2 倍，与非静电和离心式雾化喷雾相比，使叶片背面的雾滴覆盖率提高了 3 倍[35]。在明确静电喷雾确有增强雾滴靶标沉积效果的基础上，国内外学者进一步对静电喷雾作业参数开展研究，KIRK 等[36]和 FRITZ 等[37]针对小麦作物分别使用液压喷头、离心喷头和静电喷头开展喷雾对比试验，发现静电喷雾施药液量为 9.4 L/hm^2 和雾滴体积中径小于等于 150 μm（总体积 50% 的雾滴直径不大于 150 μm）的组合在小麦上获得较好的沉积效果。静电喷雾雾滴沉积试验[38]表明在 50 ~120 μm 区间的雾滴受静电作用影响最大，静电作用下此区间段内的雾滴沉积数量增加了约 2 倍，当雾滴粒径大于 120 μm 时，雾滴沉积密度呈下降趋势，沉积雾滴粒径主要集中在 180 μm 以下，与国外学者的研究结果相互印证，为静电喷雾的实际应用提供了参数依据。

虽然荷电雾滴在靶标枝叶周围借助静电场力可以实现变轨运移和环绕吸附效果，但静电喷雾也存在荷电雾滴的粒径偏小、容易飘移脱靶以及向靶标运移过程中荷电量快速衰减等问题。气流辅助技术与静电喷雾技术的结合是克服上述问题的有效途径，可以实现较好的远程雾滴输送和雾滴叶面环绕吸附效果，试验研究表明两种技术的结合可以实现垂直雾量分布规律、气流速度分布规律与纺锤型果树生物量分布规律的一致，单侧喷雾时果树叶片正

反面雾滴覆盖密度分别为 115、47 个/cm^2，满足防治害虫的要求[39]，为静电喷雾技术的推广应用提供了有益借鉴。

2.2 沉积机理分析与建模

国内外学者为了明晰冠层雾滴沉积机理，从冠层内雾滴、强制气流、枝叶、静电场、吊杆结构等因素的交互过程出发，开展雾滴沉积过程建模与仿真计算方面的理论研究。其中，强制气流具有拓宽雾滴输运通道和增强雾滴变轨迹运移的能力，具有改善雾滴沉积均匀性、提高农药利用率等优势。同时，由于作物种类多样、形态各异导致的枝叶参数的多样性以及辅助气流改变冠层枝叶形态和输运通道及胁迫雾滴运移过程的复杂性，学界对冠层枝叶与气流的交互及其影响下雾滴沉积机理开展了大量研究，获得了大量成果。

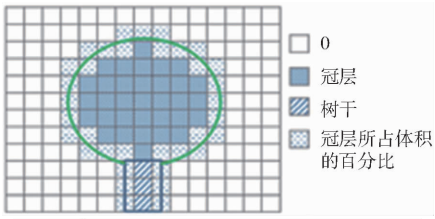
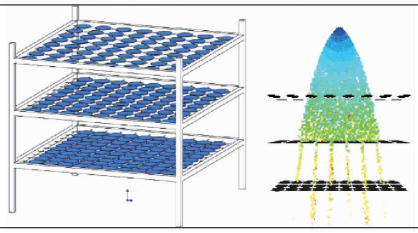
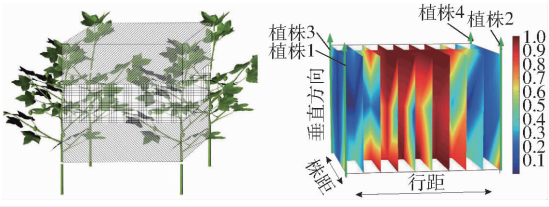
2.2.1 作物冠层等效模型构建

对作物冠层枝叶分布及密度进行量化描述是开展冠层雾滴沉积机理研究的前提条件。学者通过大量冠层喷雾沉积试验发现，作物冠层对雾滴在冠层内的运移沉积具有重要影响。因此，为进一步厘清各类辅助措施作用下冠层枝叶对雾滴的阻截、雾滴的穿透运移及雾滴的叶面沉积等规律，需要先对作物冠层形态、枝叶密度、空间分布等进行量化分析。

利用数值仿真、试验分析等不同雾滴沉积机理研究途径，学界主要采用 4 种方式对作物冠层进行了量化描述或等效表达，其主要特点对比见表 1。

表 1 作物冠层等效模型对比

Tab. 1 Comparison of equivalent models of crop canopy

作物冠层等效模型	模型示意图	特点及应用
局部枝叶等效多孔介质模型[40-41]		局部枝叶用多孔介质表征，主侧枝仍用实测试验数据构建，与实际冠层相似度高 局部枝叶众多导致模型复杂、建模困难、仿真算力要求高，限制模型推广应用 用于 CFD 中等效表示作物冠层，分析冠层气流分布或雾滴沉积规律
冠层简化等效多孔介质模型[42]		采用多孔介质对冠层整体进行表征，降低模型构建难度和仿真算力要求 忽略冠层内部枝叶分布不均的现实情况，与实际作物冠层之间存在较大区别 与局部枝叶多孔介质模型类似，简化模型也可用于 CFD 仿真中气流场或雾滴沉积分析
基于静态孔隙率相似性的冠层等效模型[43-44]		基于孔隙率相似性，利用等效圆片的空间排列组合，抽象表示作物冠层 等效圆片与辅助气流的交互过程与实际中冠层叶片与辅助气流的交互存在差异 CFD 仿真中等效表示作物冠层，分析冠层内雾滴的穿透沉积，也可基于该模型开展喷雾试验研究
基于分层孔隙率的冠层量化表达[45]		基于生长发育特征和枝叶空间分布规律，建立描述枝叶空间分布疏密的数字化模型 作物生长及枝叶分布的影响因素较多，模型精度有提升空间 可提供作物冠层枝叶密度、分布的量化数据，为雾滴沉积机理分析或作业参数在线决策提供数据支持

2.2.2 冠层枝叶与强制气流的交互

气流辅助喷雾田间试验表明，冠层内强制气流流场与冠层雾滴沉积分布具有明显相关性，说明强制气流对雾滴的胁迫运移是改善雾滴沉积均匀性的重要因素。因此，明确强制气流与冠层枝叶交互下冠层气流场的衰减变化规律，建立冠层气流场分布模型，对厘清气流强制喷雾中雾滴沉积机理具有重要意义。

CFD 仿真中局部枝叶多孔介质模型的运用可以获取丰富的流场数值信息，在揭示作物冠层与辅助气流交互方面发挥了重要作用。ENDALEW 等[40-41]利用上述模型，开展了单风机(Condor V)、双风机塔式(Duoprop)和四风机塔式(AirJet Quatt) 3 种机型的梨树冠层气流场数值模拟，验证了所提

出的多孔介质 CFD 模型的有效性，并进一步研究发现出风口的布置方案和冠层形态及枝叶密度分布对强制气流场具有重要影响[46-47]，如图 6 所示。利用简化等效多孔介质模型[42]，通过集成滑动网格技术的 CFD 分析，较好地预测树冠内外强制气流的空气速度分布，如图 7 所示，达到了降低模型复杂度、减少计算耗时下的作物冠层流场的良好预测效果。

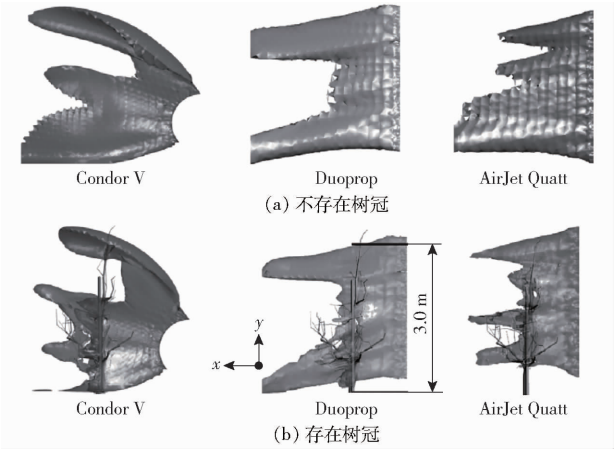


图 6　基于多孔介质模型的辅助气流场模拟

Fig. 6　Simulation of assisted airflow field based on porous media model

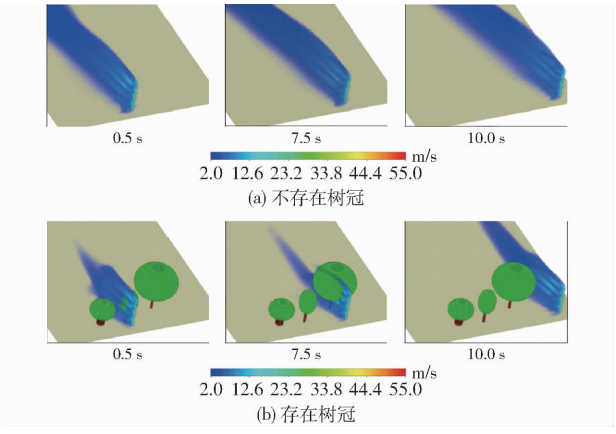


图 7　基于简化多孔介质模型的辅助气流场模拟

Fig. 7　Simulation of assisted airflow field based on simplified porous media model

与国外学者采用的研究思路类似，国内学者也利用简化等效多孔介质模型对作物冠层流场进行了仿真分析。面向果树冠层，利用简化等效多孔介质模型，多旋翼植保无人机下洗气流的 CFD 仿真分析表明，果树冠层对旋翼下洗气流有明显的阻挡作用，如图 8 所示。3 种枝叶疏密程度不同的冠层风场分布结果呈现出风速衰减与冠层压力损失系数呈正相关特点，量化表征了冠层枝叶疏密程度对强制气流的阻挡和衰减作用[48-49]。

与此同时，多位学者也通过田间试验手段，分析了辅助气流，主要是无人机下洗气流，在作物冠层的分布规律。针对水稻[50]、小麦[51]冠层的单旋翼、多

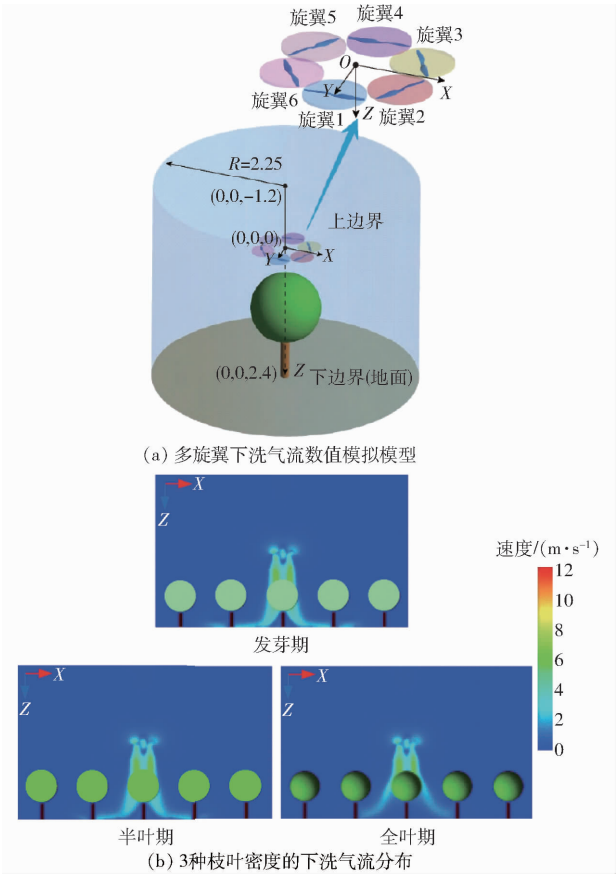
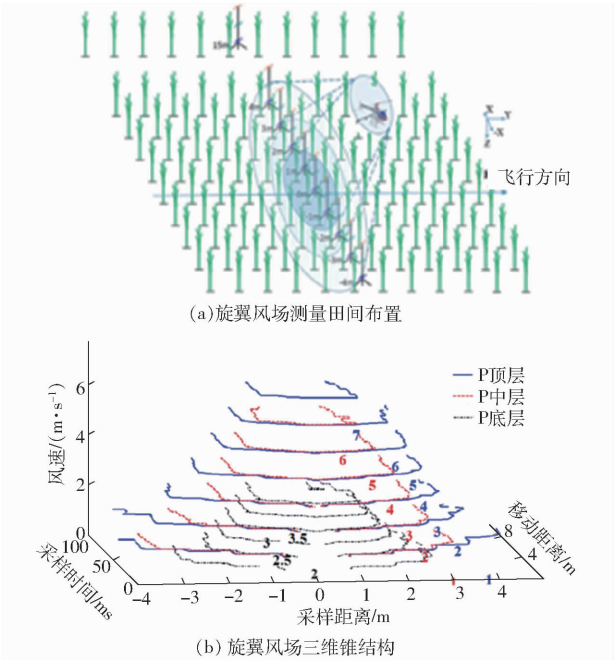


图 8　多旋翼植保无人机下洗气流仿真分析

Fig. 8　Simulation of downwash airflow of multi-rotor UAV

旋翼气流场试验研究均表明，不同旋翼结构布置与水稻冠层耦合形成的风场在风场宽度、风速、空间分布规律等方面存在明显差异。上述研究表明施药机械自身的强制气流配送方案对作物冠层处的风场分布具有重要影响，因此针对具体作物冠层的风场分布规律及雾滴沉积规律研究应先明确施药机械的强制气流配送方案。延续上述研究，李继宇等[52-53]针对水稻这一具体作物，详细分析了单旋翼无人机的风场分布，借助等效面积（等高线和上边界包围面积）和风场宽度等参数，描述了风场分布区域与无人机旋翼风场的线性衰减关系，并根据无人机旋翼半径和等效面积衰减率建立了水稻冠层内翼风场覆盖区域呈现的涡旋结构的等效锥模型，如图 9 所示，为理解无人机旋翼风场与水稻冠层的交互过程提供帮助，并为明确雾滴在水稻冠层内的穿透沉积行为提供依据。

上述关于作物冠层与辅助气流交互的研究侧重于作物冠层阻碍下强制气流的衰减变化规律，而没有关注强制气流对作物冠层枝叶形态的改变。强制气流辅助喷雾能够改善沉积均匀性的原因之一是气流载荷作用下，柔性作物枝叶会发生弯曲变形，从而减轻冠层郁闭度、拓宽雾滴输运通道。为明确辅助气流对冠层枝叶变形的作用规律，刘兴华等[54]借助



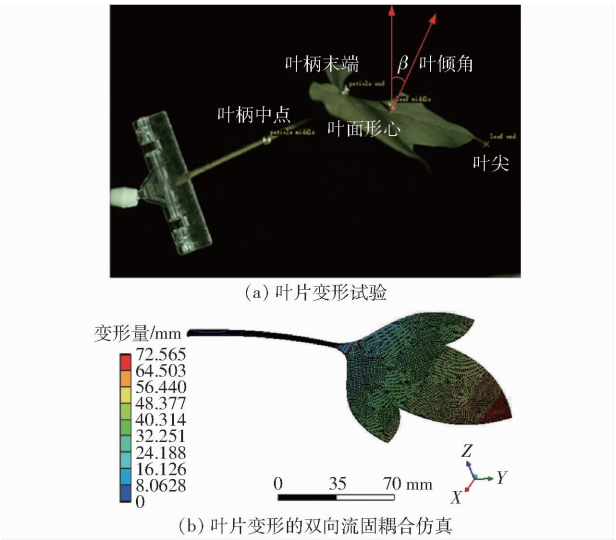
(a)旋翼风场测量田间布置

(b) 旋翼风场三维锥结构

图 9 单旋翼无人机水稻冠层风场分布规律

Fig. 9 Airflow field distributions of rice canopy with single-rotor UAV

高速摄像技术和双向流固耦合模型,分析了风力载荷下棉花叶片的弯曲变形规律,建立了棉花叶片弯曲变形的参数辨识模型,如图 10 所示。上述研究结果可以为气流辅助喷雾作业中作物冠层郁闭度的动态变化、施药参数的合理选取提供参考。强制气流除了能够引起枝叶弯曲变形、拓宽雾滴输运通道外,还能够增强雾滴动能、改善雾滴的变轨穿透能力。



(a) 叶片变形试验

(b) 叶片变形的双向流固耦合仿真

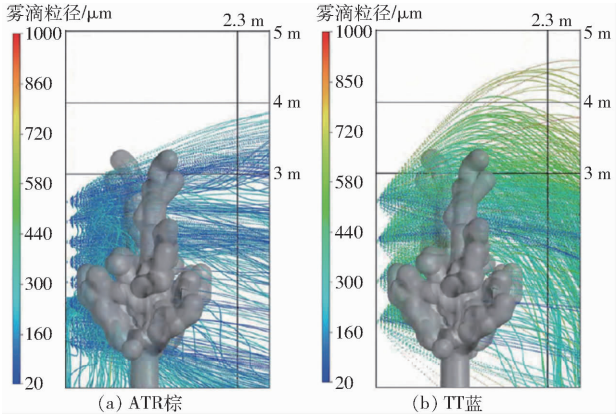
图 10 气流作用下叶片变形试验与仿真

Fig. 10 Leaf deformation test and simulation under airflow

2.2.3 冠层与强制气流交互下雾滴穿透沉积

为探究辅助气流喷雾过程中雾滴的运移沉积机理,需要在研究冠层枝叶与强制气流交互影响下,进一步明确冠层、气流、雾滴三者交互行为及其影响雾滴在冠层内穿透、运移及沉积的规律,以建立精准喷雾的重要理论基础。

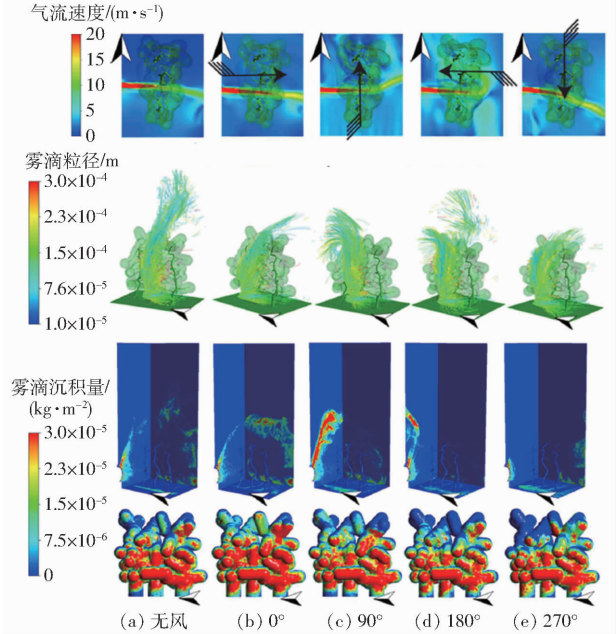
局部枝叶等效多孔介质模型和简化等效多孔介质模型在研究辅助气流与作物冠层交互下雾滴沉积行为也发挥了重要作用。借助局部枝叶等效多孔介质模型, ENDALEW 等[55]以梨树为研究对象,建立了考虑作物叶片光学孔隙率、叶面积密度、叶片阻力系数以及叶面雾滴截获系数等因素的雾滴沉积概率模型,如图 11 所示,为分析作物冠层、辅助气流、雾滴沉积三者交互影响规律提供了一种可行的研究路径。依托上述多孔介质模型和雾滴沉积概率模型,针对 4 种不同苹果和梨树作物冠层的环境风及辅助气流配送方式研究表明,当垂直于喷雾方向时,环境风对树冠内部雾滴轨迹流形影响较树冠外部小;当环境风速设定 6.5 m/s 时,风向与喷雾方向相同显著增加雾滴与叶片的交互沉积量,但雾滴漂移造成地面沉积量也有所增加,如图 12 所示[56]。



(a) ATR棕 (b) TT蓝

图 11 两种喷头的雾滴颗粒追踪

Fig. 11 Droplet particles tracking of two types of nozzles



(a) 无风 (b) 0° (c) 90° (d) 180° (e) 270°

图 12 不同环境风向对雾滴沉积及飘移的影响(6.5 m/s)

Fig. 12 Effects of different environmental wind directions on droplet deposition and drift (wind speed was 6.5 m/s)

简化多孔介质模型也是分析作物冠层内雾滴沉积分布的有利工具。结合雾滴沉积概率模型，针对苹果冠层的简化等效多孔介质 CFD 模型分析结果表明，冠层枝叶密度增加，可以增强冠层对雾滴的捕获能力，其冠层内沉积量由 8.5% 增加至 65.8%，同时空中飘移和地面沉积量分别由 25.8%、47.8% 下降至 7.0%、21.2%；同时仿真结果揭示风送喷雾虽然具有增强雾滴穿透、提高沉积均匀性的优势，但不恰当的强制气流参数可能加重雾滴飘移损失，如图 13 所示[57]。与此同时，依据上述研究，HONG 等[58]开发了气流辅助喷雾分析软件（Software of air-assisted sprayers，SAAS），其可以帮助用户评估和预测雾滴沉积、飘移量及飘移距离，为强制气流辅助喷雾提供决策依据，如图 14 所示。

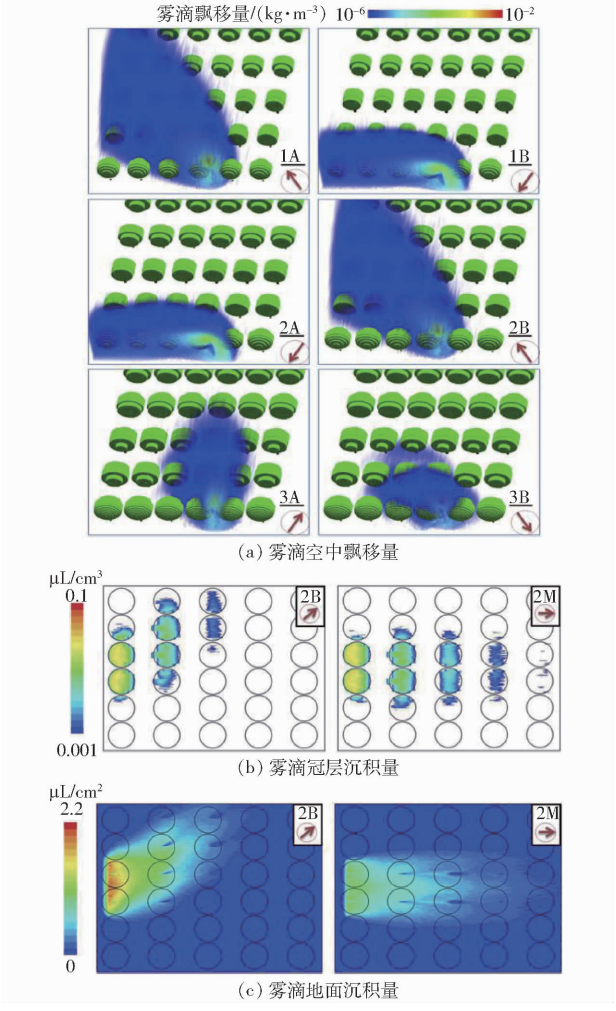


图 13　气流辅助喷雾雾滴沉积 CFD 仿真分析

Fig. 13　CFD simulation of droplets deposition with air-assisted spray

气流辅助田间喷雾试验虽然存在试验开展工作量大、环境因素不可控等问题，但其仍是研究冠层雾滴沉积分布规律的重要手段。针对苹果等果树作物的气流辅助喷雾田间试验也揭示了辅助气流对雾滴的沉积和飘移行为影响显著[59-61]，同时发现不同喷雾器类型下雾滴沉积量均随冠层深度增加不断减少，说明冠层枝叶对雾滴的向内运移沉积具有截留和阻碍作用[62]，与基于 CFD 的冠层等效多孔介质模型研究结果具有一致性，均表明强制气流辅助喷雾中，强制气流对冠层雾滴运移沉积的主导作用，同时也表明强制气流与冠层内雾滴沉积是一对矛盾体，合理的气流配送方案及配送量是实现改善沉积和减少飘移双重目标的关键。

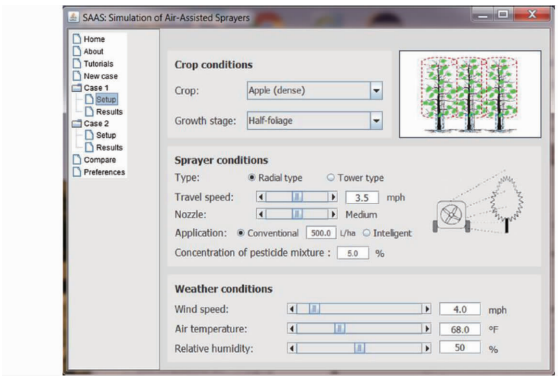


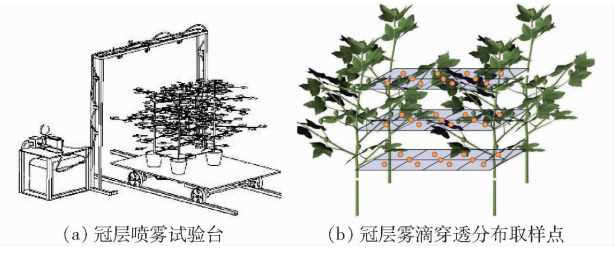
图 14　气流辅助喷雾雾滴沉积分析软件 SAAS

Fig. 14　Air-assisted spray droplet deposition analysis software SAAS

随着对作物冠层、强制气流和药液雾滴三者交互过程认识的深入，国内学者也从雾滴粒径、冠层流场分布、叶面积体密度、冠层分层孔隙率等因素入手，对强制气流辅助喷雾冠层雾滴运移沉积规律开展研究。李继宇等[63]分析了 4 种无人机喷雾粒径（218、200、178、145 μm）对水稻冠层雾滴沉积效果的影响，发现不同粒径雾滴沉积量之间差异极显著，平均单位面积沉积量具有随雾滴粒径减小而增大的趋势，说明雾滴粒径越小，其冠层分布均匀性越好。陈盛德等[64]、王昌陵等[65]分别分析了多旋翼无人机下洗气流三维矢量对有效喷幅内雾滴沉积量及雾滴沉积穿透性的影响，均发现相比于 X、Y 向风速，Z 向风速对雾滴沉积量及沉积穿透性影响更加显著。陈盛德等[64]还进一步建立了有效喷幅区内雾滴沉积量与因素 Z 向风速之间的回归模型及有效喷幅区内雾滴沉积穿透性与因素 Y、Z 向风速之间的回归模型，可以为实际作业提供指导。

为进一步揭示靶标作物的冠层枝叶密度、冠层深度等对雾滴在果树冠层的穿透沉积的影响，孙诚达等[66]、邱威等[67]以腊梅、早樱、花石榴、梨树等为试验对象，以叶面积体密度、冠层取样深度、出口风速等为试验变量，构建了雾滴穿透比例二次指数数学模型，表明取样深度相比于叶面积体密度及出口风速对雾滴的冠层穿透影响更加显著。利用前期建立的棉花冠层分层孔隙率估算模型，LIU 等[68]为进一步量化分析冠层枝叶对雾滴

在冠层内穿透分布的规律,建立了以冠层分层孔隙率为输入变量的冠层雾滴沉积分布量高斯过程回归模型,可以实现冠层雾滴穿透分布的可靠预测,如图 15 所示,量化揭示了棉花冠层枝叶对雾滴的阻截作用下雾滴在冠层内的穿透规律,为探明其他作物冠层内雾滴穿透规律提供了解决思路。为深入分析强制气流在雾滴胁迫运移和冠层孔隙改变两方面的作用,刘雪美等[69]还开展了强制气流作用下雾滴冠层沉积性能影响解耦研究,揭示了强制气流对雾滴的胁迫作用相较于冠层孔隙变化更有利于雾滴在棉花冠层内的附着沉积,两者对雾滴冠层沉积量的提升比例分别为 39.81% 和 10.52%;冠层孔隙增大形成的雾滴运移通道相比于气流对雾滴的胁迫作用更有利于雾滴在冠层内的均匀分布,两者对沉积均匀性的提升比例分别为 42.71% 和 1.10%。上述量化研究结果说明,强制气流能够从改善雾滴变轨运移能力和拓宽雾滴输运通道两方面增强雾滴在冠层内的有效沉积是确实存在的,并且其影响机理也是存在差别的,这一发现可以为针对不同作物的气流辅助施药模式及施药参数选择提供参考。



(a) 冠层喷雾试验台 (b) 冠层雾滴穿透分布取样点

图 15 棉花冠层雾滴穿透分布试验

Fig. 15 Droplets penetration and distribution test in cotton canopy

在探究强制气流与作物交互影响下雾滴运移沉积规律的同时,为了能够对冠层雾滴的沉积性能做出预测,学界从雾滴运动轨迹力学分析、雾滴运移模拟、田间试验研究等角度,建立了雾滴运移、穿透和沉积的回归模型。基于雾滴粒径谱概率描述的拉格朗日随机行走模型能够给出雾滴群在气流胁迫下运移、蒸发和持留等信息,适用于微观层面雾滴的飞行段运动和在冠层顶部的沉积分析[70-71]。借助棉花叶面积指数(LAI)等冠层宏观参数,分析和建立雾滴沉积多元回归模型已被证实是预测雾滴沉积的有效手段[72]。与此同时,以无人直升机飞行高度、速度等作业参数为影响因素,邱白晶等[73]研究了小麦冠层的雾滴沉积分布规律,分别建立了飞行速度、高度与试验指标沉积浓度及沉积均匀性之间的关系模型,可以实现根据无人直升机喷雾作业参数预测特定小麦冠层形态下的雾滴沉积情况。

2.2.4 雾滴与靶标叶面的交互行为分析

雾滴在靶标叶面上有效沉积是植保喷雾作业的最终目的,雾滴与靶标叶面的交互行为既是从微观上明晰雾滴沉积机理的重要基础,也是在宏观上明晰雾滴在冠层内穿透分布规律的重要前提。受雾滴惯性、重力场、局部气流场、静电场、液滴表面张力、靶标叶面疏水特性等多重因素影响,雾滴在靶标叶面表面可能出现碰撞、附着、浸润、凝并、铺展、反弹、破碎飞溅等多种微观行为[74-75]。微距高速摄像技术是研究雾滴在靶标叶面运动行为的有效试验工具,可以研究液滴与不同倾角的植物叶片的弹跳、碰撞、驻留以及飞溅等行为[76],也可以进一步用于揭示药液性质、靶标表面性质对雾滴沉积行为的影响[77]。在认识到药液理化性质和作物叶面表面结构是影响雾滴在靶标叶面沉积行为的重要因素后,学界开展了大量研究。陆军等[78]研究了药液理化性质(表面张力、垂直方向碰撞速度)对雾滴的铺展、凝并行为的影响,推测滚入底部吸入凝并和直接顶部吸入凝并两种方式分别由表面张力梯度和动态表面张力所主导。周召路[79]研究了水溶性农药雾滴在水稻、棉花及悬浮剂型农药雾滴在甘蓝叶面上的蒸发动力学行为和叶面弹跳行为,揭示了雾滴界面膜的稳定性对雾滴弹跳性能存在影响。作为雾滴沉积的靶标,作物叶片表面结构对雾滴沉积亦是需要考虑的影响因素,雾滴在毛刺、蜡质和粗糙 3 种表面的沉积试验表明,影响雾滴叶面运动行为的叶面参数中,叶面结构的影响程度仅次于叶片倾角[80]。

与此同时,除上述雾滴理化性质和叶面表面结构两方面的研究外,学界也开展了强制气流场、静电力等因素对雾滴沉积行为的影响。王胜增[81]研究了非离子、阴离子、阳离子 3 类表面活性剂在不同浓度下对雾滴荷质比的影响,发现雾滴荷质比与其临界胶束浓度(CMC)有关,进而影响雾滴在叶面的润湿能力。MERCER[82]研究了辅助气流作用下雾滴在叶面周围的运动轨迹(图 16),综合分析了雾滴惯性及空气曳力作用下雾滴在叶面的沉积概率,以斯托克斯数(St)为主要衡量指标,建立单一雾滴叶面沉积概率 E 经验公式,并以此为基础分析了作物冠层对雾滴捕获概率 T 与冠层光学孔隙率 τ 及叶面沉积概率 E 的关系式,为理解辅助气流作用下雾滴的局部沉积行为提供了有益借鉴。

综上,一方面,针对作物冠层与辅助气流的交互作用,学界通过多孔介质 CFD 模型基于冠层状态实测数据的风场分布试验分析等方式,证实了作物冠层对强制气流风场分布具有显著影响,并建立了一些具体作物,如苹果、梨树、水稻等冠层风场分布模

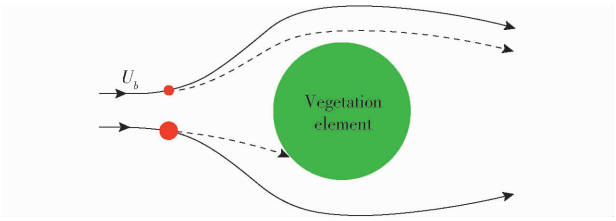


图 16　辅助气流下雾滴运移轨迹分析

Fig. 16　Analysis of droplet movement trajectory under assisted airflow

型，对理解冠层与强制流场的交互提供有益参考；另一方面，针对冠层与气流交互下雾滴穿透沉积行为，大量研究借助多孔介质模型、辅助气流场三维矢量、叶面积体密度、冠层分层孔隙率参数等，研究了多种作物冠层内雾滴的穿透行为、沉积分布规律等，促进了学界对作物冠层与强制气流交互下冠层对雾滴的阻挡截获、强制气流对雾滴的胁迫运移等机理的理解；另外，学界也针对辅助气流、静电场等多类因素影响下雾滴与靶标叶片的交互行为开展了研究，从药液理化性质、靶标叶面表面类型等角度入手，分析了雾滴在叶面的黏附、反弹、破碎、沉积等行为。上述雾滴沉积机理及建模方面的诸多研究成果，既包含宏观的作物冠层模型构建、气流场与冠层的交互及其影响下雾滴的沉积规律分析，也涵盖了微观的雾滴与靶标叶片的交互行为探究，为精准喷雾理论的完善、喷雾装备的研发、喷雾作业参数优化等提供了扎实的理论支撑。

2.3　雾滴沉积检测与评价

作物冠层雾滴沉积数据的准确检测，是分析植保喷雾时冠层内雾滴沉积机理的重要前提；同时，沉积数据的快速检测与评估也是植保喷雾作业时及时分析施药效果、有针对性调整喷雾作业参数的重要手段。因此，雾滴沉积状况的准确检测和合理评估，在雾滴沉积理论研究和喷雾实际作业两方面均具有重要作用，为实现作物喷雾施药的精准智能调控提供数据支撑。

针对目前缺乏雾滴沉积数据准确、快速的评估手段，国内外学者根据图像处理、光学、电磁学等不同原理，提出了多种软硬件的解决方案。表 2 对其进行概括对比。

采用雾滴收集板和量筒等设备开展雾滴沉积量检测是基本的雾滴沉积方法。基于上述思路，BAHLOL 等[83-84]融合二维声速计和雾滴捕捉单元，开发了智能喷雾实时检测与分析系统。该类方案适用于室内试验和植保机具田间初步测试，但不适合于大规模田间场景下雾量检测。水敏纸是喷雾沉积试验中用于测定雾滴沉积分布的另一重要工具。

表 2　雾滴沉积检测与评价方案对比

Tab. 2　Comparison of droplets deposition detection and evaluation scheme

检测原理	检测与评价方案	特点
液体计量	智能雾量实时监测[83-84]	智能融合风速与雾滴量数据
图像处理	SnapCard[85-86]	基于水敏纸沉积分析的移动端 APP，便于开展田间应用
	DropLeaf[87]	
光学	光谱光度雾滴沉积传感器[88]	基于光波导原理和多光谱分析，检测精度较高
	嵌入 AgNRs 的农药残留检测[89]	基于表面增强拉曼散射法的农药残留检测，有借鉴意义
	雾滴图像采集与分析装置[90]	基于结构光透射与视觉检测原理，同时检测正反面沉积
电磁学	交叉指式雾滴收集装置[91]	基于驻波速率原理，建立输出电压与沉积量的回归模型
	雾滴沉积快速检测系统[92]	基于溶液电导率原理，实现雾滴的沉积快速检测
	LWS 型叶面湿度传感器[93]	基于变介电常数电容器原理，沉积检测曲线可信度高
	雾滴沉积传感器及检测系统[94]	

CERRUTO 等[85]证实了水敏纸的单位面积沉积量与覆盖率指标具有显著相关性，为利用水敏纸准确检测雾滴沉积提供了参考标准。针对水敏纸、Kromekote 雾滴测试卡数据处理步骤繁琐、时效性差等问题，国内外学者开发了多款便携式扫描测试系统，如 SnapCard[85-86]（图 17）、DropLeaf[87]。



图 17　SnapCard 雾滴检测软件的田间实际应用

Fig. 17　Field application of droplet detection software SnapCard

国内外学者设计了多款基于光学原理或电磁学原理的雾滴沉积传感器，为雾滴沉积数据的快速准确获取提供了研发方向。TALEB 等[88]研发了基于光波导原理和多光谱分析的微型雾滴沉积传感器，如图 18 所示，试验结果表明其雾滴沉积检测相关性为 66.5%，检测精度达到 0.39 μL。KUMAR 等[89]通过对表面增强拉曼散射法的改进，在样品的复杂表面提取感兴趣目标元素，检测精度达到

10^{-9} g/cm^2,如图 19 所示。虽然其主要针对农作物的低量农药残留而设计,但其为雾滴沉积量的精准检测提供了研发思路。刘雪美等[90]基于结构光透射原理和视觉检测,设计了一种同时检测正反面雾滴沉积量的测量节点,可以实现雾滴密度、覆盖率、单位面积沉积量等指标的在线雾滴沉积检测,如图 20 所示。

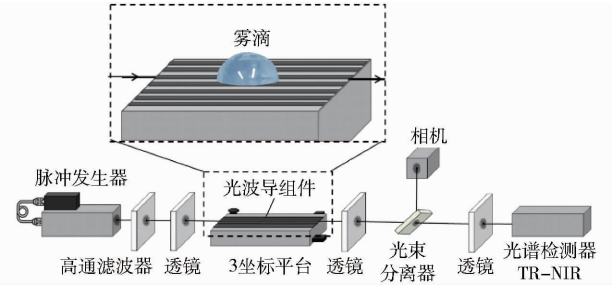


图 18 光谱光度雾滴沉积检测传感器原理图

Fig. 18 Schematic of spectral photometric droplet deposition detection sensor

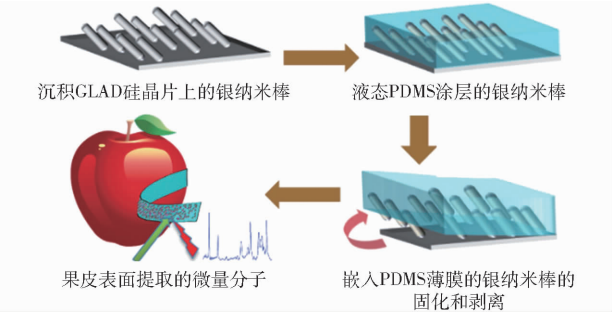


图 19 嵌入 AgNRs 的 PDMS – SERS 衬底的农药残留检测材料

Fig. 19 Pesticide residue detection material PDMS – SERS substrate embedded with AgNRS

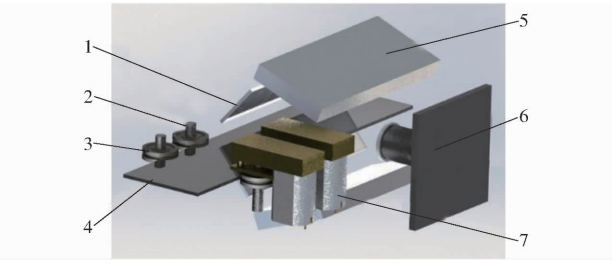


图 20 雾滴图像采集装置内部结构模型图

Fig. 20 Internal structure model diagram of droplet image acquisition device

1. 反光镜 2. 固定轴 3. 传动轮 4. 承接板 5. 面光源 6. 4K 工业相机 7. 直流减速电机

基于光学原理和变介电常数原理的雾滴沉积传感器具有较好的检测性能,适合于小范围场景下雾滴沉积状况的快速精准抽检和分析,为雾滴沉积检测由传统的洗脱示踪剂和水敏纸等方式向快速高效测量的光学或电气传感器方式转变提供了研发方向上的启示。

上述雾滴沉积检测技术和装置侧重于从雾滴个体在光学参数或电气参数方面对检测基材的影响入手,获取雾滴沉积量数据。与此同时,学界也从雾滴群体在作物冠层沉积附着对冠层理化性能改变的宏观整体出发,结合深度学习技术,开发雾滴沉积检测技术。空间金字塔池化网络(SPP – Net)经证实可以实现冠层热红外图像的多尺度特征融合,实现柑橘冠层雾滴沉积量的快速准确分类,为大规模喷雾场景下雾滴沉积状况的准确检测和快速评估提供解决思路[96]。

综上,研发雾滴沉积快速检测传感器和检测系统是业界共识的发展趋势,但目前所研发的雾滴沉积传感和检测技术尚不够成熟,无法应用于大规模喷雾场景的雾滴沉积检测。

2.4 施药作业参数优化

喷雾作业参数优化最初仅考虑施药机械输出的雾滴粒径和药液分布,未考虑靶标特征。为了达到最佳沉积效果,近年来国内外学者将作物特定形态和雾滴群飞行特征纳入喷雾过程优化,主要通过 3 种途径开展施药作业参数优化:依托具体植保作业机具,针对具体作物,开展作物参数优化研究;根据靶标作物形态特征和冠层外形特征,通过结构参数优化改善喷雾施药质量;根据作业靶标对象特征及作业场景特点,研究新型喷雾机具,并对作业参数进行优化。

面向水稻、冬小麦、果树等多种作物,学界针对多旋翼无人机[97-100]、单旋翼无人机[101]、风送喷雾机[102]、对靶喷雾机[103]等多款装备,研究了喷雾作业参数对雾滴沉积的影响规律,并分别确定了适于不同作物的各类机型的优化作业参数。除了上述基于田间试验的作业参数优化研究外,学界也对多种喷雾机械的结构参数进行优化设计,从而达到改善气流场及雾流场分布、雾滴变轨迹运移能力或冠层枝叶扰动效果等目标,从而实现更好的喷雾沉积施药效果。针对挡板导流式罩盖喷雾机,通过风洞试验与除草剂田间药效试验进行了性能测定和罩盖结构参数优化,达到了减量施药的目标[104]。针对吊杆式喷雾机,利用 EBF 神经网络算法和鲟鱼头部曲线对分禾结构进行了参数优化,以达到减小作物茎叶损伤、改善冠层开合效果,提高药液雾滴在冠层内部的沉积均匀性[105]。针对喷杆式喷雾机,对风助风筒结构参数进行优化设计[106-107],并将利用优化设计理论结果用于指导气流辅助式喷杆喷雾机的研制[108-109],获得了理想的辅助气流配送效果和雾滴沉积效果。

除了对现有机具进行作业参数优化外,学界也

根据植保作业靶标对象或作业场景的差异，研制了多款新型喷雾机，并对作业参数进行了优化。祁力钧团队分别针对温室和果园环境，研发了变速摇摆式变量喷雾机，并利用响应面法对喷雾流量、喷雾距离、喷雾机行走速度和喷头摆动速度等参数进行优化，分别获得了适用于温室和果园植保作业的最佳作业参数组合[110-111]。刘雪美团队研制了自走式风送式对行喷雾温室喷雾机，如图 21 所示，并对风筒俯仰角度、风速、喷雾量等作业参数进行优化，通过建立强制气流胁迫雾滴群的飞行轨迹计算模型，推导了雾滴沉积区域与喷雾机风筒姿态的映射关系，以喷雾雾滴在作物群体上均匀覆盖为目标，应用遗传算法对喷雾机工作参数进行了优化，取得了很好的作业效果[112]。

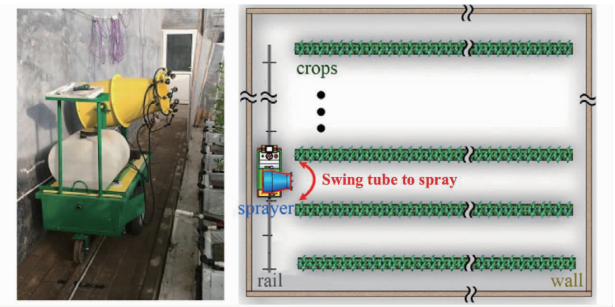


图 21　温室环境下自走式喷雾机作业模式

Fig. 21　Operation mode of self-propelled sprayer in greenhouse

综上，国内外学者以改善雾滴沉积效果为目标，以田间试验为主要分析手段，开展了大量作业参数优化及结构参数优化研究[113-114]，为田间喷雾作业参数的合理确定提供了选择依据，具有重要的实践价值；同时，上述作业参数优化及田间试验结果也为明晰雾滴的冠层沉积行为机理提供了数据支持，有助于植保喷雾作业向精准化方向发展。

3　作物冠层雾滴沉积研究的开放性问题

目前对冠层枝叶与辅助气流交互下雾滴穿透沉积规律的研究多为定性或半定量分析，当前喷雾作业参数优化和施药沉积效果提升，主要依靠针对特定作物或特定生长期的作物冠层开展田间试验而获取，其优化结果适应性不强，优化获取的雾滴沉积效果，因农艺、品种和生长期变化而难以复现和推广。因此目前作物雾滴沉积研究仍存在以下开放性问题亟待解决：

（1）喷雾田间试验及参数优化面临试验结果适应性不强、大规模试验难度大、不易明晰雾滴沉积内在机理等问题。田间施药试验一般只针对特定作物或者作物给定生长期的冠层形态，并且施药环境不可控，经过作业参数优化获得的雾滴沉积效果难以重现，当靶标类型、作物叶面积指数、生物力学特性或作业环境参数出现差异时，优化获取的作业参数适应性较差，难以推广应用。同时，面对种类繁多的作物冠层及不断变化的喷雾作业环境，大规模田间试验分析手段存在的试验场地布置不便、雾滴沉积数据采集工作量大等问题十分突出。此外，田间试验的数据丰富度及表达力不足，一般仅能获取喷雾作业参数、环境参数及有限的靶标作物参数和雾滴沉积量等试验数据，难以获取雾滴在冠层内的速度场、空间分布及运动轨迹等中间态数据，雾滴沉积过程呈黑箱或灰箱状态，需进一步明晰作物冠层内雾滴沉积机理。

（2）作物冠层、强制气流、雾滴群体三者的量化交互机理尚不清晰，作物冠层雾滴沉积机理缺乏量化解析，现有研究手段面临诸多挑战。学界近些年认识到作物冠层对气流分布和雾滴运移沉积的重要影响，并开始考虑将植株冠层特性纳入雾滴沉积机理研究中。依托于现有的 CFD 仿真计算能力，学界利用多孔介质简化表征作物冠层的研究手段有效促进了辅助气流与作物冠层的交互以及雾滴的冠层沉积机理的理解，成为较为广泛的研究手段，但其仍存在一定缺陷：①其各向同性特性与冠层孔隙率各向差异不符。②多孔介质的孔隙率等参数为固定值，无法描述枝叶与气流的双向耦合作用，亦不能准确反映雾滴在冠层枝叶上的沉积行为。③多孔介质的阻力系数等参数与作物冠层枝叶力学、枝叶三维尺寸、冠层枝叶分布及叶密度、风速等参数的映射关系复杂，目前多孔介质参数的确定主要采用针对特定作物的试验测定法，其适应性较差，理论依据尚不清晰。另一方面，沉积过程中存在两个不确定性：① 到达作物冠层前雾滴粒径谱、雾滴动能、风场风速分布、风量变化等参数存在不一致性和不确定性。② 枝叶密度、枝叶力学特性、植株高度、种植农艺等作物冠层特征参数存在诸多差异性和不确定性。上述两方面不确定性和差异性导致雾滴群在作物冠层内运移、穿透和沉积过程十分复杂。因此，如何恰当地表征作物冠层形态，准确分析雾滴冠层内沉积行为一直是困扰学界的难点问题。

（3）田间监测的作业数据无法构成量化评价施药质量及指导作业参数在线调控的完整闭环。雾滴全株沉积均匀性作为减药增效、稳定防效的重要指标，在规模化施药场景中快速准确地获取十分重要。目前植保机械施药中行走轨迹、环境工况和喷雾作业参数已经实现了在线监控，但在作物上的雾滴沉积性能评价方面，由于雾滴沉积传感器的监测性能无法实现田间快速反馈，在大规模施药场景中只能

依靠少量采样(布置水敏纸等)加以评价,且采样点布置有主观性,数据存在较大变异,因此规模化施药场景中的雾滴沉积效果无法给出具有说服力的量化评价。同时,由于雾滴冠层沉积机理尚不清晰,导致现有雾滴沉积预测模型不足以有效解析作业参数与施药效果之间存在的因果关系。雾滴沉积效果评价能力和沉积预测模型精度不足导致目前无法实现作业参数的在线闭环调控。

4 展望

随着我国经济发展水平的提高和全社会环保意识的增强,植保喷雾作业面临减药增效和环保政策趋严的双重压力,对精准施药技术提出了更高要求,对作物冠层雾滴沉积机理的理论需求更加迫切。综合上述作物冠层雾滴沉积研究的系统梳理可知,冠层雾滴沉积研究在雾滴沉积田间试验、冠层雾滴沉积机理、雾滴沉积监测与评价以及施药作业参数优化等方面取得了大量有益成果,相关理论成果应用促进了植保喷雾技术及装备的发展,有效改善了作物冠层雾滴沉积均匀性和施药效果。但同时作物冠层雾滴沉积研究与精准施药技术还面临喷雾田间试验成果可重复性和适应性差、冠层雾滴沉积机理尚不清晰、雾滴沉积效果评价-雾滴沉积预测-作业参数在线调控无法闭环等问题亟待突破。

近年来,人工智能、农业大数据、数字孪生、5G 通信、物联网、机器视觉等新技术或生物传感基材等新材料的快速发展,使解决冠层雾滴沉积研究与精准施药面临的难题成为可能。基于上述新技术,后续研究的重点和方向有:

(1)利用光学、多光谱、电磁学或机器视觉技术,开发能够测量和感知冠层枝叶遮挡状态下雾滴运移分布轨迹的便携式仪器,便于田间试验过程中多维数据的采集;以及利用生物基材等新材料,开发便于大规模喷雾场景中密集采集冠层内喷雾沉积数据的传感器,提高田间雾滴沉积效果的分辨精度和分析效率。

(2)利用新的复杂物理场计算方法,构建双向流固耦合的多相多场冠层沉积仿真过程,实现作物冠层数据、作业参数、雾滴状态参数等多物理量、多尺度的冠层雾滴沉积物理过程向虚拟空间的映射,构建作物冠层雾滴运移及沉积的数字孪生体,实现作物冠层、辅助气流场、静电场等耦合下雾滴冠层穿透运移过程的数字化描述,为厘清雾滴冠层沉积机理提供量化分析平台。

(3)利用深度学习、大数据分析等人工智能技术,提高作物冠层柔性枝叶群体、辅助气流矢量场、静电力场、雾滴颗粒群空间运动矢量等多源多维数据的能力,借助机器学习等先进算法,充分挖掘高通量样本数据的内在规律,构建各因素相互影响的概率描述的知识图谱,构建实时施药沉积数据分析-雾滴冠层沉积预测-作业参数在线决策的闭环系统,实现动态响应靶标对象和作业环境变化的精准喷雾施药系统。

(4)研究如何应用农业物联网及 5G 通信技术,实现作业环境气象数据、作物群体长势与冠层形态等特性参数、喷雾装备状态数据、冠层雾滴沉积数据等多源广域高通量信息的互联互通,降低田间试验的数据采集和传输难度,为喷雾雾滴沉积物理模型与虚拟雾滴沉积数字孪生模型的数据互通提供保障。

参 考 文 献

[1] 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.
YUAN Huizhu, WANG Guobin. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides[J]. Plant Protection, 2015,41(6):9 - 16. (in Chinese)

[2] GASKIN R E, MANKTELOW D W, COOK S, et al. Effects of canopy density on spray deposition in kiwifruit[J]. New Zealand Plant Protection, 2013, 66: 194 - 198.

[3] ZHANG Y, HUANG X, LAN Y, et al. Development and prospect of UAV-based aerial electrostatic spray technology in China [J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4071.

[4] 刘雪美,苑进,宋来其,等. 一种自适应冠层打开气流辅助喷雾装置及方法: CN112021288A[P]. 2020 - 12 - 04.

[5] 何勇,吴剑坚,方慧,等. 植保无人机雾滴沉积效果研究综述[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2018,44(4):392 - 398.
HE Yong, WU Jianjian, FANG Hui, et al. Research on deposition effect of droplets based on plant protection unmanned aerial vehicle: a review[J]. Journal of Zhejiang Universiny (Agric. & Life Sci.), 2018,44(4):392 - 398. (in Chinese)

[6] 王俊,董祥,严荷荣, 等. 风幕式喷杆喷雾机玉米田间施药试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):79 - 84.
WANG Jun, DONG Xiang, YAN Herong, et al. Experiment on spraying performance of air-assisted boom sprayer in corn field [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 79 - 84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150712&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.012. (in Chinese)

[7] 刘兴华,刘雪美,苑进, 等. 植保静电喷雾技术发展现状与前景[J]. 农机化研究,2019,41(2):8 - 14.
LIU Xinghua, LIU Xuemei, YUAN Jin, et al. The development and prospect of electrostatic spraying technique in crop

protection [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(2):8 - 14. (in Chinese)

[8] 孙文峰,刘海洋,付天鹏, 等. 基于鲟鱼头部曲线的植保分禾吊杆组合装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(1):49 - 61.
SUN Wenfeng, LIU Haiyang, FU Tianpeng, et al. Design and experiment of plant protection opener suspender combination device based on sturgeon head curve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(1):49 - 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.006. (in Chinese)

[9] 郑加强,徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):1 - 16.
ZHENG Jiaqiang,XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):1 - 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210301&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.001. (in Chinese)

[10] FERGUSON J C, CHECHETTO R G, HEWITT A J, et al. Assessing the deposition and canopy penetration of nozzles with different spray qualities in an oat (*Avena sativa* L.) canopy[J]. Crop Protection, 2016, 81: 14 - 19.

[11] 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.

[12] LEGLEITER T R, JOHNSON W G. Herbicide coverage in narrow row soybean as influenced by spray nozzle design and carrier volume[J]. Crop Protection, 2016, 83:1 - 8.

[13] ZHU H, DORNER J W, ROWLAND D L, et al. Spray penetration into peanut canopies with hydraulic nozzle tips[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(3): 275 - 283.

[14] HISLOP E C, WESTERN N M, BUTLER R. Experimental air-assisted spraying of a maturing cereal crop under controlled conditions[J]. Crop Protection, 1995, 14(1):19 - 26.

[15] FOQUÉ D, NUYTTENS D. Effect of air support and spray angle on coarse droplet sprays in ivy pot plants[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(2): 409 - 416.

[16] 燕明德,贾卫东,毛罕平,等. 风幕式喷杆喷雾雾滴粒径与速度分布试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):104 - 110.
YAN Mingde, JIA Weidong, MAO Hanping, et al. Experimental investigation of droplet diameter and velocity distributions in air-assist boom sprays[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(11):104 - 110. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20141116&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.016. (in Chinese)

[17] 吴彦强,林立恒,侯加林, 等. 风幕式高地隙喷杆喷雾机研究与设计[J]. 农机化研究,2018,40(7):55 - 61.
WU Yanqiang, LIN Liheng, HOU Jialin, et al. Design and experiment of high clearance boom sprayer with air-assisted system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(7):55 - 61. (in Chinese)

[18] FOQUÉ D, PIETERS J G, NUYTTENS D. Spray deposition and distribution in a bay laurel crop as affected by nozzle type, air assistance and spray direction when using vertical spray booms[J]. Crop Protection, 2012, 41: 77 - 87.

[19] 孔肖,王国宾,嵇俭, 等. 七种植保机械在玉米田喷雾作业的雾滴沉积分布及农药利用率研究[C]//绿色生态可持续发展与植物保护——中国植物保护学会第十二次全国会员代表大会暨学术年会论文集, 2017.

[20] 张琳娜,叶玉涛,高圆圆, 等. 自走式高杆喷雾技术中吊杆喷雾雾滴在玉米中后期的沉积分布[C]//植保科技创新与病虫防控专业化——中国植物保护学会 2011 年学术年会论文集,2011.

[21] 魏新华,邵菁,解禄观,等. 棉花分行冠内冠上组合风送式喷杆喷雾机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):101 - 107,90.
WEI Xinhua, SHAO Jing, XIE Luguan, et al. Design and experiment of air-assisted cotton boom sprayer with separating row and spraying in inside and upper canopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):101 - 107,90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.014. (in Chinese)

[22] 郝雪枫. 顶喷与侧喷组合喷雾系统的吊杆碰撞与沉积试验研究[D]. 镇江: 江苏大学,2017.
HAO Xuefeng. Experimental study on collision and sedimentation of combined spray system with top spray and side spray[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

[23] DUGA A T, RUYSEN K, DEKEYSER D, et al. Spray deposition profiles in pome fruit trees: effects of sprayer design, training system and tree canopy characteristics[J]. Crop Protection, 2015, 67:200 - 213.

[24] SALCEDO R, ZHU H P, ZHANG Z, et al. Foliar deposition and coverage on young apple trees with PWM-controlled spray systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178:1 - 15.

[25] CHEN Y, OZKAN H E, ZHU H P, et al. Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(6):1263 - 1272.

[26] 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.
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 56 - 63. (in Chinese)

[27] 刘冬梅,杨杭旭,周宏平,等. 密植矮化茶园地面低容量仿形喷雾液滴沉积性能研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(10):96 - 105.
LIU Dongmei,YANG Hangxu,ZHOU Hongping,et al. Droplet deposition performance of low-capacity profiling spray in densely

planted dwarf tea plantation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 96 - 105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20191011&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.011. (in Chinese)

[28] 李雪,陆岱鹏,王士林,等.固定管道式常温烟雾系统雾滴沉积仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(增刊2):261 - 267,315.
LI Xue, LU Daipeng, WANG Shilin, et al. Simulation and test on droplet distribution and deposition of fixed-pipe cold fogging system in greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 261 - 267, 315. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2020s230&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.030. (in Chinese)

[29] 王娟,兰玉彬,姚伟祥,等.单旋翼无人机作业高度对槟榔雾滴沉积分布与飘移影响[J/OL].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 areca tree[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 109 - 119. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190711&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.011. (in Chinese)

[30] SHAN C, WANG G, WANG H, et al. Effects of droplet size and spray volume parameters on droplet deposition of wheat herbicide application by using UAV[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1): 74 - 81.

[31] 许童羽,于丰华,曹英丽,等.粳稻多旋翼植保无人机雾滴沉积垂直分布研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(10):101 - 107.
XU Tongyu, YU Fenghua, CAO Yingli, et al. Vertical distribution of spray droplet deposition of plant protection multi rotor UAV for japonica rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 101 - 107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171012&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.012. (in Chinese)

[32] AHMAD F, QUI B, DONG X, et al. Effect of operational parameters of UAV sprayer on spray deposition pattern in target and off-target zones during outer field weed control application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 1 - 10.

[33] 陈晓,刘德江,王果,等.喷雾参数及助剂类型对植保无人飞机在棉花中期喷雾雾滴沉积分布的影响[J].农药学学报,2020,22(2):347 - 352.
CHEN Xiao, LIU Dejiang, WANG Guo, et al. Effect of spray parameters and adjuvant type on droplet deposition deposition of plant protection unmanned aerial vehicle in mid-growth-cotton field[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2020, 22(2): 347 - 352. (in Chinese)

[34] 杨莉,施英俊,冯宏祖,等.B - 7451 型直升机喷雾参数对枣树冠层雾滴沉积分布的影响[J].果树学报,2019,36(3):338 - 346.
YANG Li, SHI Yingjun, FENG Hongzu, et al. Effect of flight parameters of B - 7451 helicopter on distribution pattern of droplet deposition in jujube canopy[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(3): 338 - 346. (in Chinese)

[35] MARTIN D E, LATHEEF M A. Aerial electrostatic spray deposition and canopy penetration in cotton[J]. Journal of Electrostatics, 2017, 90: 38 - 44.

[36] KIRK I W, FRITZ B K, HOFFMANN W C. Aerial methods for increasing spray deposits on wheat heads[C]// ASAE Annual International Meeting, Ottawa, Canada, 2004.

[37] 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, 23(6): 709 - 715.

[38] 兰玉彬,张海艳,文晟,等.静电喷嘴雾化特性与沉积效果试验分析[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):130 - 139.
LAN Yubin, ZHANG Haiyan, WEN Sheng, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics and spray deposition of electrostatic nozzle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 130 - 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180415&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.015. (in Chinese)

[39] 周良富,张玲,薛新宇,等.3WQ - 400 型双气流辅助静电果园喷雾机设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(16):45 - 53.
ZHOU Liangfu, ZHANG Ling, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of 3WQ - 400 double air-assisted electrostatic orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 45 - 53. (in Chinese)

[40] ENDALEW A M, HERTOG M, GEBREHIWOT M G, et al. Modelling airflow within model plant canopies using an integrated approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(1): 9 - 24.

[41] ENDALEW A M, HERTOG M, DELELE M A, et al. CFD modelling and wind tunnel validation of airflow through plant canopies using 3D canopy architecture[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2009, 30(2): 356 - 368.

[42] HONG S W, ZHAO L, ZHU H P. CFD simulation of airflow inside tree canopies discharged from air-assisted sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149: 121 - 132.

[43] 张海淑. 静态孔隙率相似的空间雾滴沉积分布仿真与试验研究[D].泰安:山东农业大学,2018.
ZHANG Haishu. Simulation and experimental study of spatial droplet deposition distribution with similar static porosity[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[44] 刘雪美,张海淑,赵新学,等. 一种基于作物孔隙率相似性的雾滴沉积测试装置: CN206990397U[P]. 2018 - 02 - 09.

[45] LIU X H, LIU X M, LI Y, et al. Estimation model of canopy stratification porosity based on morphological characteristics: a

case study of cotton[J]. Biosystems Engineering, 2020, 193:174 – 186.

[46] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010,71(2):128 – 136.

[47] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying—Part Ⅱ: validation for different sprayer types[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2):137 – 147.

[48] 张豪,祁力钧,吴亚垒,等. 基于 Porous 模型的多旋翼植保无人机下洗气流分布研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):112 – 122.
ZHANG Hao, QI Lijun, WU Yalei, et al. Spatio-temporal distribution of down-wash airflow for multi-rotor plant protection UAV based on Porous model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):112 – 122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190212&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.012. (in Chinese)

[49] 张豪,祁力钧,吴亚垒,等. 无人机果树施药旋翼下洗气流场分布特征研究[J]. 农业工程学报,2019,35(18):44 – 54.
ZHANG Hao, QI Lijun, WU Yalei, et al. Distribution characteristics of rotor downwash airflow field under spraying on orchard using unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 44 – 54. (in Chinese)

[50] 汪沛,胡炼,周志艳,等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 54 – 61.
WANG Pei, HU Lian, ZHOU Zhiyan, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(3):54 – 61. (in Chinese)

[51] 田志伟,薛新宇,徐阳,等. 植保无人机下洗气流对作物冠层作用规律研究[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(1):40 – 48.
TIAN Zhiwei, XUE Xinyu, XU Yang, et al. Effect of plant protection UAVs downwash on crop canopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 40 – 48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210105&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.005. (in Chinese)

[52] LI J Y, SHI Y Y, LAN Y B, et al. Vertical distribution and vortex structure of rotor wind field under the influence of rice canopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,159: 140 – 146.

[53] 李继宇,郭爽,姚伟祥,等. 气流作业下雾滴粒径稻株间分布特性与风洞模拟试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):148 – 156.
LI Jiyu, GUO Shuang, YAO Weixiang, et al. Distribution characteristics of droplet size in rice field and wind tunnel simulation test under airflow operation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8): 148 – 156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190817&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.017. (in Chinese)

[54] 刘兴华,苑进,李扬, 等.采用双向流固耦合方法构建辅助气流作用下棉花叶片变形模型[J].农业工程学报,2021,37(5):68 – 76.
LIU Xinghua, YUAN Jin, LI Yang, et al. Deformation modelling of cotton leaf under assisted airflow using bidirectional fluid-structure coupling method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 68 – 76. (in Chinese)

[55] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. Modelling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: a new integrated CFD approach[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(10):1383 – 1392.

[56] DUGA A T, DEKEYSER D, RUYSEN K,et al. Numerical analysis of the effects of wind and sprayer type on spray distribution in different orchard training systems[J]. Boundary Layer Meteorology, 2015, 157(3):517 – 535.

[57] HONG S W, ZHAO L, ZHU H P. CFD simulation of pesticide spray from air-assisted sprayers in an apple orchard: tree deposition and off-target losses[J]. Atmospheric Environment, 2018, 175(2):109 – 119.

[58] HONG S W, ZHAO L, ZHU H P. SAAS, a computer program for estimating pesticide spray efficiency and drift of air-assisted pesticide applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,155:58 – 68.

[59] CROSS J V, WALKLATE P J, MURRAY R A, et al. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 1. Effects of spray liquid flow rate[J]. Crop Protection, 2001, 20(1): 13 – 30.

[60] CROSS J V, WALKLATE P J, MURRAY R A, et al. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 2. Effects of spray quality[J]. Crop Protection, 2001, 20(4): 333 – 343.

[61] CROSS J V, WALKLATE P J, MURRAY R A, et al. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 3. Effects of air volumetric flow rate[J]. Crop Protection, 2003, 22(2):381 – 394.

[62] FAROOQ M, SALYANI M. Spray penetration into the citrus tree canopy from two air-carrier sprayers[J]. Transactions of the ASAE, 2002,45(5):1287 – 1293.

[63] 李继宇,兰玉彬,彭瑾.无人机喷雾粒径对水稻冠层雾滴沉积效果的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(4):442 – 446.
LI Jiyu, LAN Yubin, PENG Jin. Effect of droplet size spraying by unmanned aerial vehicle on droplet deposition in rice canopy [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences),2018,44(4):442 – 446. (in Chinese)

[64] 陈盛德,兰玉彬,BRADLEY K F,等.多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J/OL].农业机械学报,

2017,48(8):105 - 113.
CHEN Shengde, LAN Yubin, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105 - 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170811&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011. (in Chinese)

[65] 王昌陵,何雄奎,JANE B,等.不同飞行参数下八旋翼植保无人机下洗气流场对雾滴沉积分布特性的影响[J].智慧农业,2020,2(4):124 - 136.
WANG Changling, HE Xiongkui, JANE B, et al. Effect of downwash airflow field of 8-rotor unmanned aerial vehicle on spray deposition distribution characteristics under different flight parameters[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 124 - 136. (in Chinese)

[66] 孙诚达,柳长鼎.风送喷雾雾滴冠层穿透模型构建及应用[J].农业工程学报,2019,35(15):25 - 32.
SUN Chengda, LIU Changding. Construction and application of droplet canopy penetration model for air-assisted spraying pattern[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 25 - 32. (in Chinese)

[67] 邱威,顾家冰,丁为民,等.果园风送式施药雾滴在冠层内沉积分布规律[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2015,36(2):68 - 72.
QIU Wei, GU Jiabing, DING Weimin, et al. The droplet deposition distribution in fruit canopy using air assisted sprayer[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2015,36(2):68 - 72. (in Chinese)

[68] LIU X, LIU X, LI Y, et al. Predicting spray deposit distribution within a cotton plant canopy based on canopy stratification porosity and Gaussian process models[J]. Biosystems Engineering, 2021, 204:1 - 14.

[69] 刘雪美,宋来其,苑进,等.气流雾滴胁迫和冠层孔隙变化对沉积性能影响解耦研究[J/OL].农业机械学报,2021,52(8):117 - 126,137.
LIU Xuemei, SONG Laiqi, YUAN Jin, et al. Decoupling study on the influence of air droplets stress and canopy porosity change on deposition performance in air-assisted spray[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(8): 117 - 126, 137. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210811&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.011. (in Chinese)

[70] COCK N, MASSINON M, SALAH S, et al. Investigation on optimal spray properties for ground based agricultural applications using deposition and retention models[J]. Biosystems Engineering, 2017, 162: 99 - 111.

[71] 梁昭,范国强,王光明,等.基于双峰分布的风胁迫雾滴沉积分布模型研究[J/OL].农业机械学报,2020,51(4):28 - 37.
LIANG Zhao, FAN Guoqiang, WANG Guangming, et al. Distribution model of wind-stressed droplet deposition based on bimodal distribution[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 28 - 37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200403&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.003. (in Chinese)

[72] LIAO J, ZANG Y, LUO X, et al. The relations of leaf area index with the spray quality and efficacy of cotton defoliant spraying using unmanned aerial systems (UASs)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169(1): 1 - 7.

[73] 邱白晶,王立伟,蔡东林,等.无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J].农业工程学报,2013,29(24):25 - 32.
QIU Baijing, WANG Liwei, CAI Donglin, et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 25 - 32. (in Chinese)

[74] DAMAK M, MAHMOUDI S R, HYDER M N, et al. Enhancing droplet deposition through in-situ precipitation[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 1 - 9.

[75] 赵可,王瑜,蒋彦龙.农药液滴撞击移动液膜和非对称冠状水花形成机理分析[J/OL].农业机械学报,2021,52(5):83 - 91.
ZHAO Ke, WANG Yu, JIANG Yanlong. Mechanism analysis of pesticide droplets impacting moving liquid film and asymmetric crown behavior formation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 83 - 91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210509&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.05.009. (in Chinese)

[76] 丁维龙,金梦杰,罗临风,等.基于虚拟模型的雾滴与叶片的交互行为分析[J].农业工程学报,2017,33(14):40 - 48.
DING Weilong, JIN Mengjie, LUO Linfeng, et al. Behavior analysis of spray droplet interacting with plant leaves based on virtual model[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 40 - 48. (in Chinese)

[77] 王双双.雾化过程与棉花冠层结构对雾滴沉积的影响[D].北京:中国农业大学,2015.
WANG Shuangshuang. Studying the influence of spray atomization process and cotton canopy structure on the droplet deposition[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[78] 陆军,金天澍,张红涛.溴氰菊酯乳油液滴在薤菜叶面的叠加凝并行为研究[J].农药学学报,2019,21(4):514 - 522.
LU Jun, JIN Tianpeng, ZHANG Hongtao. Deltamethrin emulsifiable concentrates droplets superposition and coagulation behavior on water spinach leaf surface[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2019,21(4):514 - 522. (in Chinese)

[79] 周召路.农药助剂调控雾滴在典型作物上的蒸发、沉积及弹跳行为研究[D].北京:中国农业科学院,2018.
ZHOU Zhaolu. Study on the effects of pesticide adjuvant on the evaporation, deposition and rebouncing for droplet on typical biointerface[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)

[80] 王沛,祁力钧,李慧, 等.植物叶片表面结构对雾滴沉积的影响分析[J/OL].农业机械学报,2013,44(10):75 - 79.
WANG Pei, QI Lijun, LI Hui, et al. Influence of plant leaf surface structures on droplet deposition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 75 - 79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20131013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.013. (in Chinese)

[81] 王胜增.喷雾过程中叶面微结构及药液性能对液滴铺展行为影响的研究[D].镇江:江苏大学,2020.
WANG Shengzeng. Study on the effect of leaf surface microstructure and chemical liquid properties on droplet spreading behavior during spraying[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)

[82] MERCER G N. Modelling to determine the optimal porosity of shelterbelts for the capture of agricultural spray drift[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(11):1349 - 1352.

[83] BAHLOL H, CHANDEL A K, HOHEISEL G A, et al. The smart spray analytical system: developing understanding of output air-assist and spray patterns from orchard sprayers[J]. Crop Protection, 2020,127(1):1 - 10.

[84] SINHA R, RANJAN R, BAHLOL H Y, et al. Development and performance evaluation of a pneumatic solid set canopy delivery system for high-density apple ochards[J]. Transactions of the ASABE,2020, 63(1):37 - 48.

[85] NANSEN C, FERGUSON J C, MOORE J, et al. Optimizing pesticide spray coverage using a novel web and smartphone tool, SnapCard[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(3): 1075 - 1085.

[86] FERGUSON J C, CHECHETTO R G, O'DONNELL C C, et al. Assessing a novel smartphone application-SnapCard, compared to five imaging systems to quantify droplet deposition on artificial collectors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 128: 193 - 198.

[87] BRANDOLI B, SPADON G, ESAU T, et al. DropLeaf: a precision farming smartphone tool for real-time quantification of pesticide application coverage[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 105906.

[88] TALEB BENDIAB A, RYCKEWAERT M, HERAN D, et al. Coupling waveguide-based micro-sensors and spectral multivariate analysis to improve spray deposit characterization in agriculture[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4168.

[89] 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.

[90] 刘雪美,苑进,索金政, 等. 一种无耗材的在线雾滴沉积检测装置及方法: CN202010081834.5[P].2020 - 05 - 08.

[91] 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 CSAE, 2017, 33(15): 64 - 71. (in Chinese)

[92] 孙诚达. 基于电导率原理的雾量测量系统研制及应用研究[D].南京:南京农业大学,2017.
SUN Chengda. Design and application of measurement system for droplet quantity based on solution conductivity principle[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[93] 杨玮,郝子源,李民赞, 等.果树叶片雾滴沉积量检测系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(增刊):8 - 14.
YANG Wei, HAO Ziyuan, LI Minzan, et al. Detecting system design of droplet deposition on fruit leaves[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 8 - 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2017s002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.002. (in Chinese)

[94] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 123 - 127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140820&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.020. (in Chinese)

[95] CERRUTO E, MANETTO G, LONGO D, et al. A model to estimate the spray deposit by simulated water sensitive papers[J]. Crop Protection, 2019, 124: 104861.

[96] 陆健强,林佳翰,邓小玲, 等.多尺度特征融合的柑橘冠层施药沉积量分类模型[J].农业工程学报,2020,36(23):70 - 76.
LU Jianqiang, LIN Jiahan, DENG Xiaoling, et al. Classification model for citrus canopy spraying deposition based on multi-scale feature fusion[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 70 - 76. (in Chinese)

[97] KHARIM M N A, WAYAYOK A, SHARIFF A R M, et al. Droplet deposition density of organic liquid fertilizer at low altitude UAV aerial spraying in rice cultivation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: 105045.

[98] 杜文,曹英丽,许童羽, 等.无人机喷雾参数对粳稻冠层沉积量的影响及评估[J].农机化研究,2017,39(4):182 - 186,191.
DU Wen, CAO Yingli, XU Tongyu, et al. Effect and assessment of UAV spraying parameters at japonica rice canopies[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(4):182 - 186,191. (in Chinese)

[99] 谢英杰,王国宾,王宝聚, 等.植保无人机喷施除草剂喷头选择及参数优化[J].中国农机化学报,2021,42(4):61 - 69.
XIE Yingjie, WANG Guobin, WANG Baoju, et al. Selection of nozzle type and parameter optimization in herbicide spraying process of plant protection UAV [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(4):61 - 69. (in Chinese)

[100] 刘琪,兰玉彬,单常峰, 等.航空植保喷施参数对苹果树雾滴沉积特性影响[J].农机化研究,2020,42(9):173 - 180.
LIU Qi, LAN Yubin, SHAN Changfeng, et al. The influence of spraying parameters of aerial application on droplet deposition characteristics for apple fields[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(9):173 - 180. (in Chinese)

[101] 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)

[102] 孙诚达,邱威,丁为民, 等. 梨树风送喷雾关键作业参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(24):30 - 38.
SUN Chengda, QIU Wei, DING Weimin, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted spraying on pear trees [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 30 - 38. (in Chinese)

[103] 贾卫东,刘欢,薛新宇,等. 对靶喷雾机喷雾参数对雾滴沉积分布的影响试验[J]. 中国农机化学报,2016,37(12):53 - 56,93.
JIA Weidong, LIU Huan, XUE Xinyu, et al. Influence test of spraying parameters of target sprayer on droplet deposition distribution [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(12): 53 - 56,93. (in Chinese)

[104] 张京,何雄奎,宋坚利, 等. 挡板导流式罩盖喷雾机结构优化与性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(10):101 - 104.
ZHANG Jing, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Structure optimization and performance research of guided baffle shield sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(10):101 - 104. (in Chinese)

[105] 崔龙飞,薛新宇,秦维彩. 基于 EBF 神经网络模型的喷雾机吊喷分禾器参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):62 - 69.
CUI Longfei, XUE Xinyu, QIN Weicai. Parameter optimization on crop divider of cotton defoliation sprayer based on EBFNN [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):62 - 69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160509&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.009. (in Chinese)

[106] 刘雪美,张晓辉,刘丰乐, 等. 喷杆喷雾机风助风筒相关向量机多目标优化设计[J]. 农业机械学报,2010,41(6):75 - 80.
LIU Xuemei, ZHANG Xiaohui, LIU Fengle, et al. Multi-objective dynamic design optimization for air duct of air-assisted boom sprayer based on RVM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 75 - 80. (in Chinese)

[107] 刘雪美,张晓辉,侯存良. 喷杆喷雾机风助风筒流场分析与结构优化[J]. 农业机械学报,2011,42(4):70 - 75.
LIU Xuemei, ZHANG Xiaohui, HOU Cunliang. Air flow simulation and flow field optimization for airduct of air-assisted boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(4):70 - 75. (in Chinese)

[108] 刘雪美,苑进,张晓辉, 等. 气流辅助式喷雾工况参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):67 - 72.
LIU Xuemei, YUAN Jin, ZHANG Xiaohui, et al. Effect of air-assisted spraying condition parameters on boom spray drift characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.):67 - 72. (in Chinese)

[109] 刘雪美,张晓辉,马伟伟,等. MQ - 600 型气流辅助式喷杆弥雾机风机设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):190 - 193,176.
LIU Xuemei, ZHANG Xiaohui, MA Weiwei, et al. Design and test on axial fan of MQ - 600 type air-assisted boom sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):190 - 193,176. (in Chinese)

[110] 袁雪,祁力钧,王虎,等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J]. 农业机械学报,2012,43(4):45 - 50,54.
YUAN Xue, QI Lijun, WANG Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(4):45 - 50,54. (in Chinese)

[111] 程浈浈,祁力钧,吴亚垒,等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):22 - 29.
CHENG Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Parameter optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(Supp.):22 - 29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2017s004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004. (in Chinese)

[112] LI Y, YUAN J, LIU X, et al. Spraying strategy optimization with genetic algorithm for autonomous air-assisted sprayer in Chinese heliogreenhouses[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,156:84 - 95.

[113] 吕晓兰,傅锡敏,宋坚利, 等. 喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(1):59 - 63.
LÜ Xiaolan,FU Ximin,SONG Jianli,et al. Influence of spray operating parameters on spray drift[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(1):59 - 63. (in Chinese)

[114] 丁素明,薛新宇,董祥, 等. 喷雾参数对雾滴沉积性能影响研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):308 - 315.
DING Suming,XUE Xinyu,DONG Xiang,et al. Effects of spraying parameters on droplet deposition performance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.2):308 - 315. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2020s236&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.036. (in Chinese)