doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.030

固定管道式常温烟雾系统雾滴沉积仿真与试验

李　雪[1,2]　陆岱鹏[1,2]　王士林[1,2]　范道全[1]　周　浩[1]　吕晓兰[1,2]
(1.江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 南京 210014; 2.农业部长江中下游设施农业工程重点实验室, 南京 210014)

摘要: 为了进一步研究固定管道式常温烟雾系统的风场分布特性和雾滴沉积分布特性,基于计算流体力学(CFD)非稳态模拟,通过建立固定管道式常温烟雾系统在温室内作业的气流速度场仿真模型及雾滴沉积分布仿真模型,分析了该系统在 3 组作业参数(液压为 0.05MPa,气压为 0.2、0.3、0.4 MPa,3 组作业参数分别对应的喷头出口截面平均气流速度为 200、400、600 m/s)下的气流速度分布特征及在 3 组作业参数、4 组高度水平(0、40、60、80 cm)和 2 个雾滴沉积区域(喷头正下方区域和喷头中间区域)下的常温烟雾系统的雾滴沉积分布特性,并对雾滴沉积分布特性进行了试验验证。研究结果表明:固定管道式常温烟雾系统作业时可在棚室内形成涡旋气流,有益于雾滴在整个棚室内的漂浮、弥散和沉积,根据仿真和试验结果得出本系统的最优作业参数为气压 0.3 MPa、液压 0.05 MPa。喷头正下方和喷头中间区域的雾滴最大沉积量分布在喷头喷射方向前方 1 m 区域(采样点 5),且沿喷头喷射方向呈逐渐降低趋势。相同试验条件下,雾滴沉积量随着气流速度的增加呈降低趋势。喷头正下方的雾滴地面沉积量低于中间区域的雾滴地面沉积量,而在高度水平 40、60、80 cm 下,喷头正下方相应的雾滴沉积量高于中间区域。正下方区域的雾滴主要沉积分布在 60 ~ 80 cm 的高度区间,中间区域的雾滴主要沉积分布在高度 40、80 cm 区域。不同作业参数下雾滴在不同高度的仿真和实测沉积量相关系数范围为 0.990 ~ 0.924。雾滴沉积量仿真值和实测值的相对误差范围为 0.008 ~ 0.374, 说明 CFD 仿真可较准确地预测模拟常温烟雾系统气流速度场与雾滴沉积分布特性,指导实际作业参数优化。

关键词: 温室; 常温烟雾系统; 固定管道式; 二相流; 雾滴沉积; 仿真
中图分类号: S491; S625.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)S2-0261-07

Simulation and Test on Droplet Distribution and Deposition of Fixed-pipe Cold Fogging System in Greenhouse

LI Xue[1,2]　LU Daipeng[1,2]　WANG Shilin[1,2]　FAN Daoquan[1]　ZHOU Hao[1]　LÜ Xiaolan[1,2]
(1. *Institute of Agricultural Facilities and Equipment*, *Jiangsu Academy of Agricultural Science*, *Nanjing* 210014, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: Based on CFD unsteady simulation, the airflow velocity field and droplet deposition model of the fixed-pipe cold fogging system in greenhouse were established, and the airflow velocity and droplet deposition characteristics of the fogging system under different operating parameters were analyzed. At the same time, the experimental verification of the droplet deposition characteristics was implemented. Results showed that the fogging system formed vortex flows in greenhouse, which was beneficial to the floating, dispersion and deposition of droplets. The optimal operating parameter of the system was 0.3 MPa with air pressure and 0.05 MPa with hydraulic pressure. The maximum deposition amount of droplets directly below the nozzle and between the nozzles was distributed in the area of 1m in front of the nozzle spray direction (sampling point 5), decreasing along the nozzle spray direction. The amount of ground droplets deposited directly below the nozzle was lower than that in the middle area, while at the height of 40 cm, 60 cm and 80 cm, the corresponding amount of droplet deposition directly below the nozzle was higher than that in the middle area. The droplets in the area directly below were mainly deposited in the height range of 60 ~ 80 cm, and the droplets in the middle area were mainly distributed

收稿日期: 2020-08-10　修回日期: 2020-09-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(31901419)、江苏省农业自主创新资金项目(CX(19)3070)和国家公派留学项目(201903820138)
作者简介: 李雪(1987—),女,助理研究员,博士,主要从事设施作物环境互作机理、设施施药技术研究,E-mail: lixue@jaas.ac.cn
通信作者: 吕晓兰(1980—),女,研究员,主要从事植保机械与施药技术研究,E-mail: lxlanny@126.com

in the height area of 40 cm and 80 cm. The correlation coefficients of the simulated and measured droplet deposition amount at different heights under different operating parameters were ranged from 0.990 to 0.924. The relative error range between the simulated and measured droplet deposition amount was 0.008 ~ 0.374, indicating that the CFD simulation can accurately predict the airflow velocity field and droplet deposition characteristics of the fogging system, and guide its operating parameters optimization.
Key words: greenhouse; cold fogging system; fixed-pipe; twin fluid; droplets deposition; simulation

0 引言

设施降温系统是一种广泛用于温室生产,避免作物受到夏季高温胁迫的喷雾系统,该系统主要分为高压喷雾系统、低压喷雾系统和气液两相喷雾系统三类,系统作业功能相对单一[1-3]。为了扩展设施降温系统的应用范围,国外学者利用不同的降温系统进行了施药技术研究,结果表明气液两相喷雾系统是最适宜进行植物保护作业的喷雾系统[4-5],但是由于并未对喷雾方式和喷头管路布局等进行优化,所得到的试验结果并不理想[6],但也为设施施药技术的创新提供了思路。

与国外规范的设施栽培模式相比,国内的设施栽培普遍存在中小拱棚占比高、管理落后、作物栽培密集、植保人员作业暴露风险高等问题[7-11],急需探寻一种即可降低作业人员暴露风险,又可以不受设施栽培环境限制且施药效果优异的技术和方法。因此,文献[12-14]基于国外前期研究基础,结合我国设施栽培植保作业环节现状和其面临的主要问题,通过喷雾方式优化、喷头结构优化、管路布局优化、规范施药方法等手段设计了设施固定管道式二相流常温烟雾系统。

利用传统试验方法对设施固定管道式二相流常温烟雾系统的喷雾性能测试研究存在重复性低、成本高和效率低等问题。而 CFD 仿真技术能有效避免田间试验中不可控环境因素对试验结果的干扰,可精确设定试验条件,快速、准确地对不同作业参数下的机具作业效果进行模拟试验,模拟过程可重复性强。在施药技术方面,有学者利用 CFD 仿真对车载式弥雾机、森林用炮塔式风送喷雾机和不同型号果园风送喷雾机的喷雾流场特性进行了仿真分析并根据试验对象的不同给出了各机具的适宜作业参数[15-17]。文献[18-19]利用 CFD 仿真技术对田间喷杆喷雾机和果园风送喷雾机的雾滴飘移进行了模拟和预测,预测精度大于 90%,可有效指导实际田间作业。文献[20-22]分别针对罩盖防飘效果、果园风送喷雾机流场特性进行了仿真,优化了罩盖设计结构,给出了对应果园风送喷雾机包括送风量、导流板角度在内的适宜作业参数。以上研究均说明 CFD 仿真能较好地模拟分析施药机具喷雾作业时气流场分布与雾滴沉积分布规律。

目前,对设施喷雾雾滴沉积的模拟多是针对常温烟雾机进行的,其作业方式具有单点作业的特点[23-24],而二相流烟雾系统结构类似于温室喷雾降温系统,为多点气-液喷雾,系统对室内气流场和雾滴沉积分布的影响均区别于传统的常温烟雾机。因此,本文以设施固定管道式二相流常温烟雾系统为研究对象,利用 CFD 仿真技术,研究不同作业参数对该系统雾滴沉积分布的影响,并进行试验验证。

1 仿真建模

1.1 物理模型

在江苏省农业科学院农业设施与装备研究所的单体塑料大棚温室(长 50 m、宽 8 m、脊高 3.5 m)内,通过直径 70 mm 圆形滤纸,研究固定管道式二相流常温烟雾系统的雾滴沉积分布。烟雾系统主要由两部分组成,可移动室外中控主机和室内二相管路系统(图 1),室外主机与室内管路通过快速接头连接,气路管路位于液路管路的正上方,气液管路安装在温室中间位置距离地面 2.5 m 处,共配有 25 个喷头,喷头间距 2 m,交叉反向对称安装在整个温室内部,系统工作气压为 0.1 ~ 0.6 MPa,液压 0.05 MPa,雾滴体积中

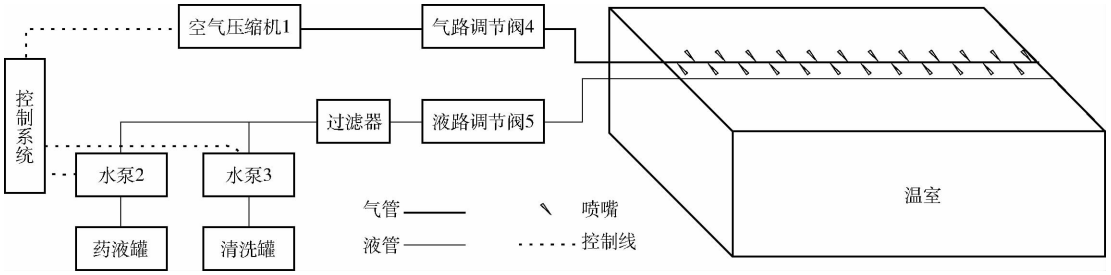


图 1 固定管道式二相流常温烟雾系统框图

Fig. 1 Diagram of fixed-pipe cold fogging system

径(VMD)约为 35 μm,药液箱体积为 50 L。

1.2　计算模型

仿真滤纸具体的排布方式为:沿温室水平方向,在每个喷头水平几何对称面和距离对称面前后 1 m 处温室截面上,以 1 m 为间距分别在 0、0.4、0.6、0.8 m 4 个竖直高度方向布置直径为 70 mm 的滤纸(图 2)。由于温室和作业喷头在长度和宽度方向具有几何对称性和周期对称性,因此雾滴采集区域选择半个喷头所覆盖的正下方的 1/2 排滤纸和 1 对喷头中间区域的整排滤纸作为雾滴沉积分布研究模型(图 3a),在进行沉积量统计时将正下方 1/2 排滤纸上的质量流量乘以 2 作为各采样点最终的沉积量。选择 1 组正反喷头水平几何中心截面和温室几何边界所围成的区域作为仿真计算域,计算域纵向竖直长度为 2 m,横向水平长度为 8 m,脊高 3.5 m(图 3b)。

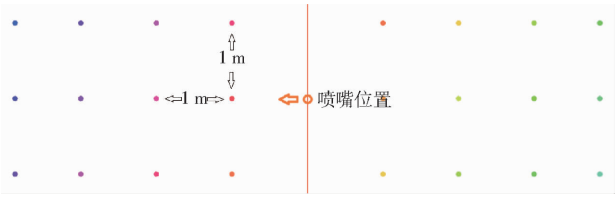
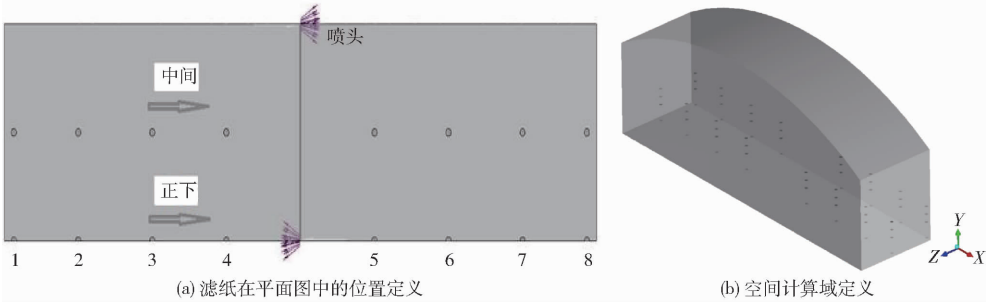


图 2　滤纸布置平面图

Fig. 2　Filter paper arrangement



(a) 滤纸在平面图中的位置定义　　(b) 空间计算域定义

图 3　计算域示意图

Fig. 3　Diagram of computational domain

1.3　模拟参数

对烟雾系统的 3 组工作参数进行仿真分析,研究系统不同作业参数下温室内雾滴沉积分布规律。具体参数设置为喷口截面平均气流速度 v 分别为 200、400、600 m/s。喷头沿着宽度方向水平向前喷射,3 个速度分别对应的系统作业液压为 0.05 MPa,气压为 0.2、0.3、0.4 MPa,供验证试验参考设置机具的作业参数。

1.4　网格划分

采用 ICEM 软件对计算域进行结构化网格划分,在喷头、壁面以及滤纸表面附近区域进行网格加密,网格节点总数约 45 万(图 4)。本文研究的是温室大棚密闭空间内,喷头喷射雾滴随喷射气流在空间内的流动及弥散情况,涉及空气和雾滴两相流动,由于单个喷头喷射的气流速度较高,同时伴随着雾滴与气流间的相互扰动。因此本文基于 CFX 软件采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型,把空气看成连续介质,把雾滴看成离散相,进行气液两相流非稳态数值分析,采用完全耦合计算气体和雾滴的相互作用。

1.5　边界条件

设置温室 Z 轴方向的 2 个面为对称边界条件,大棚其他壁面以及滤纸为无滑移壁面边界条件。喷头气流速度分别为 200、400、600 m/s 的入口边界条件。根据喷头雾滴粒径试验雾滴粒径级配曲线,采用 Rosin－Rammler 分布模型对离散相雾滴的边界

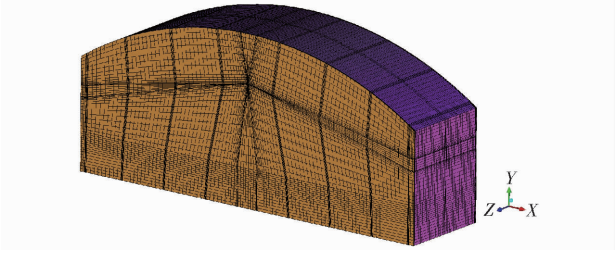


图 4　计算区域网格示意图

Fig. 4　Grid diagram of computational domain

条件进行设置,得到雾滴粒子平均直径约为 32 μm,分布指数为 2.86,并设置最小粒子直径为 2 μm,最大粒子直径为 65 μm,粒径数量 1 500,喷头流量 0.002 6 kg/s。喷头喷射雾滴设为圆面射源,其喷射位置在喷头正中心,喷射锥角为 80°,假设喷射速度与气流速度一致,并设置雾滴粒子在温室空间流动过程中与壁面接触即被壁面捕获,终结运动。

2　试验验证

验证试验于 2018 年 3 月 11 日在江苏省农业科学院农业设施与装备研究所相同规格的单体塑料大棚温室内进行,分别在温室内前、中、后部选取喷头对按照仿真作业参数设置机具试验参数,采集雾滴的滤纸与仿真模型布置方式相同,共选取 3 组 6 个喷头及其对应的仿真喷雾区域滤纸作为研究对象,并对 3 组喷头雾滴覆盖区域按照仿真滤纸设置分为中间区域和喷头正下方区域,喷头正下方区域各采

样点沉积量的分布方向一致。对 2 个区域内的田间数据取平均作为相应区域的实测雾滴沉积量并进行结果分析和讨论，滤纸规格与仿真滤纸规格一致，为直径 70 mm 圆形滤纸。

配置质量分数为 0.1% 的 BSF 荧光示踪剂（德国）作为喷雾液，测试后将滤纸收集于自封袋中避光存放，随后将滤纸放入 30 mL 蒸馏水中浸泡并避光振荡 20 s，采用 LS55 型荧光光谱仪（珀金埃尔默仪器公司，德国）检测荧光示踪剂洗脱液的荧光值。采用 Excel 2016 进行制图和制表。

3 结果分析

3.1 模拟气流场分布特性

气流场截面选取 X 方向上的截面，观察温室速度场的分布情况。3 个截面与喷头的距离为 1、2、3 m。图 5 为时间 $t=300$ s 时，喷头两侧不同截面处的速度分布云图。从图中可以看出，喷头两侧的截面速度分布具有相似性，与喷头高度相同平面处的速度最大，随着与喷头距离的增大，气流速度逐渐变小，且截面中间区域的速度低于截面上方和底部气流速度。同时，随着平均气流速度的增加，气流场整体气流速度呈增加趋势，结合气流流线图（图 6）可知，气流从喷头喷出后撞击到温室壁面反弹后在相应喷头覆盖区域的中间区域形成涡流，从而导致中间气流速度较其他区域低，出现截面中间区域速度低于截面上方和底部气流速度的现象。进一步观察还可发现喷头正下方区域的气流速度强于喷头之间区域的气流速度，这有利于气流带动近壁面边缘、近地面底层和喷头下方附近上层雾滴的扰动，使雾滴在整个温室和作物生长冠层区域进行漂浮、弥散和沉积。

3.2 不同作业参数下雾滴沉积分布特性

雾滴沉积分布均匀性等参数是评价喷雾机作业效果的重要参数，为了解本系统喷雾作业的雾滴沉积分布特性，对模拟雾滴通过距离地面不同高度采样滤纸上的质量流率及其分布特性作了数据采集与分析。图 7～10 为雾滴喷雾到沉积 1 800 s 时，不同作业参数下雾滴在不同高度和不同区域下的仿真和实测沉积量分布情况。

由图 7～10 可知，不同作业参数、不同雾滴采集区域内、相同采样高度下，雾滴沉积量随着气流速度的增加呈降低趋势。气流速度增加导致液体更充分

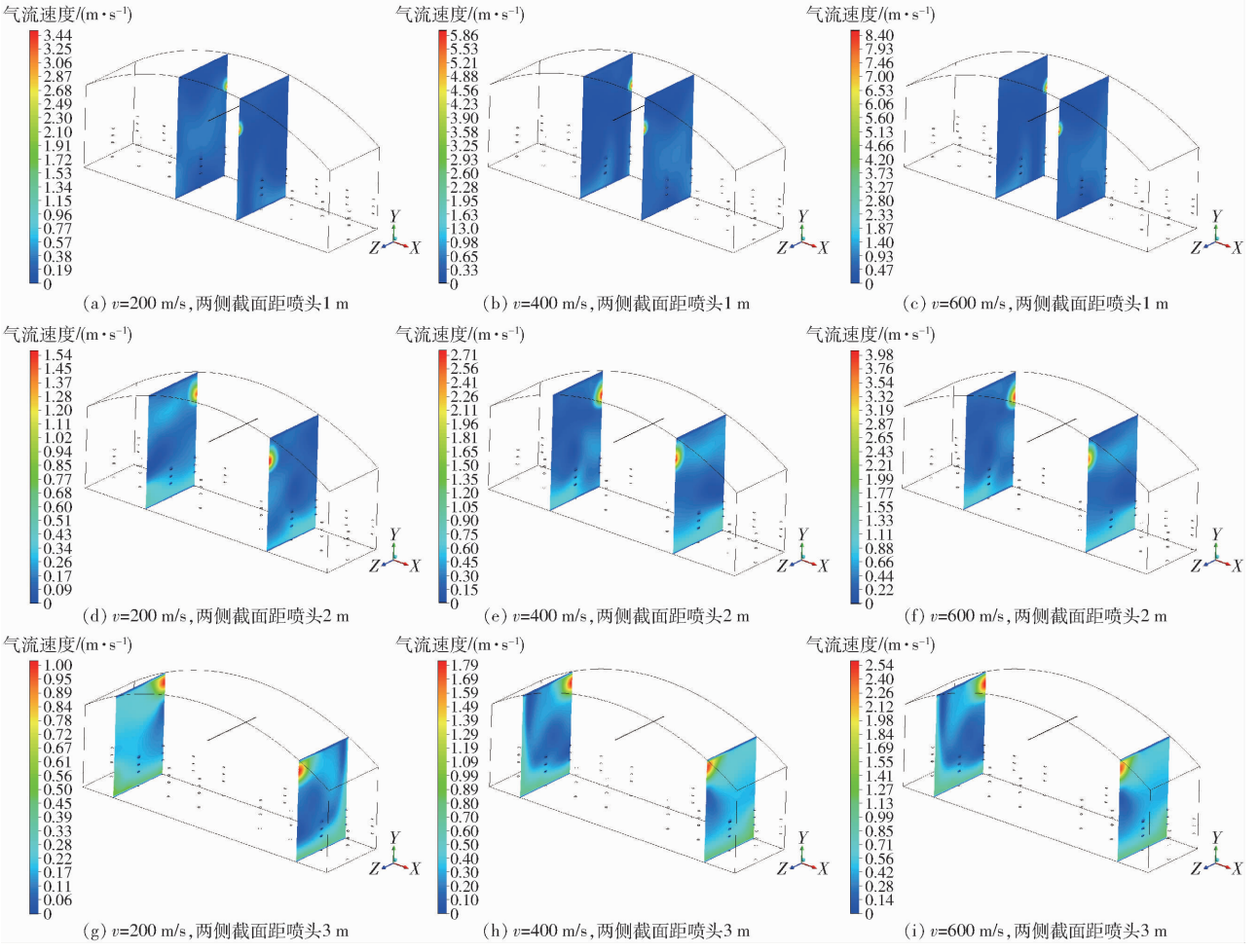


图 5 $t=300$ s 时，不同平均气流速度下两侧与喷头不同距离截面的速度分布云图

Fig. 5 Velocity distribution maps at different distances from both sides of nozzle at different average airflow velocities at $t=300$ s

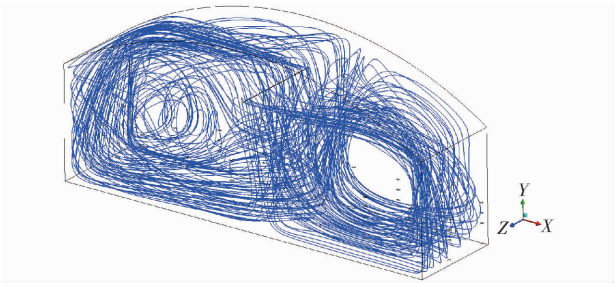


图 6　气流速度流线图

Fig. 6　Motion pattern of airflow velocity

的雾化，雾滴更加细腻，同时气流对温室内相对静止空气的扰动程度随之增加，使变得更加细腻的雾滴受气流场扰动更充分，在温室内漂浮和弥散的时间变长，因此在相同雾滴收集时间内，气流速度越大，雾滴沉积量越低。相同作业参数，相同采样高度，不同雾滴采样区域下的雾滴沉积量均呈现先增加后降低的趋势，并且最大雾滴沉积量均出现在距离喷头喷射方向前方 1 m 左右的位置（采样点 5）。

图 7 ~ 10 也表明，不同作业参数、相同采样区域、不同采样高度下，雾滴在地面沉积量最少，距地面高度 80 cm 时，雾滴沉积量最高。总体来看，正下方区域的雾滴主要沉积量分布在 60 ~ 80 cm 的高度区间，中间区域雾滴主要沉积量分布在 40、80 cm 的高度区域。喷头正下方的雾滴地面沉积量低于中间区域，而在高度 40、60、80 cm 下，喷头正下方相应的雾滴沉积量高于中间区域。由于雾滴的沉积分布依附于空间气流场运动，以上仿真和实测结果均说明喷头正下方和喷头中间区域气流场分布特征有所区别，导致雾滴受气流裹挟程度和运动特性的不同，从雾滴沉积量观察可发现，喷头正下方区域的涡旋气流场强于中间区域，使得喷头正下方区域的雾滴被气流更多地裹挟到空中悬浮、弥散和沉积，这一特点与气流场仿真所得的结论一致。同时，结合雾滴沉积量仿真值和实测值可以发现，在保持高度 40 ~ 80 cm 范围（作物冠层区域）采样点雾滴沉积量相对

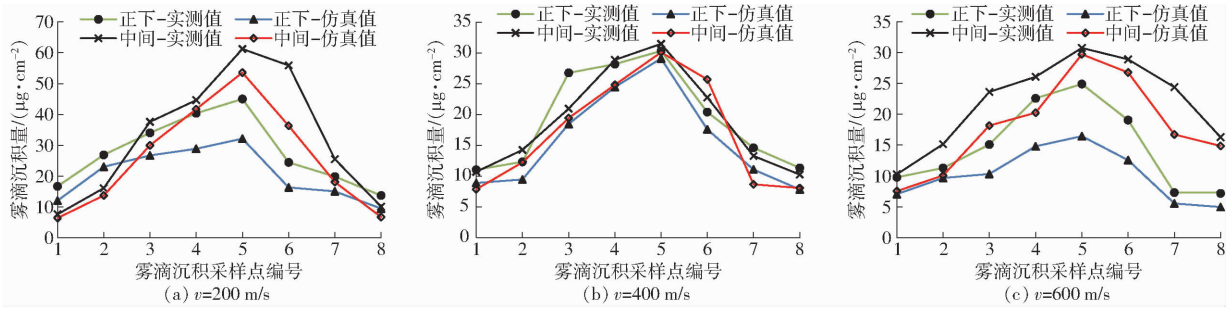


图 7　t = 1 800 s 时，不同气流速度下地面雾滴沉积量的仿真值和实测值

Fig. 7　Simulation and measured values of ground deposition under different operating parameters at t = 1 800 s

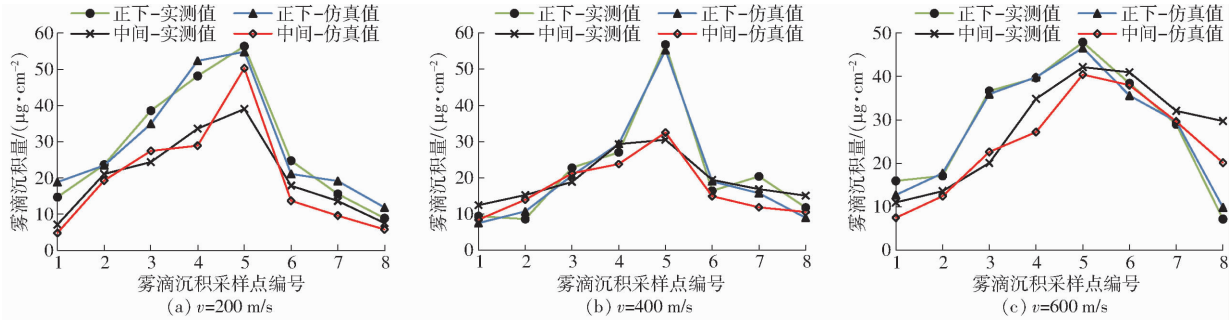


图 8　t = 1 800 s 时，不同气流速度下距地面高度 40 cm 位置雾滴沉积量的仿真值和实测值

Fig. 8　Simulation and measured values of droplets deposition at height of 40 cm under different operating parameters at t = 1 800 s

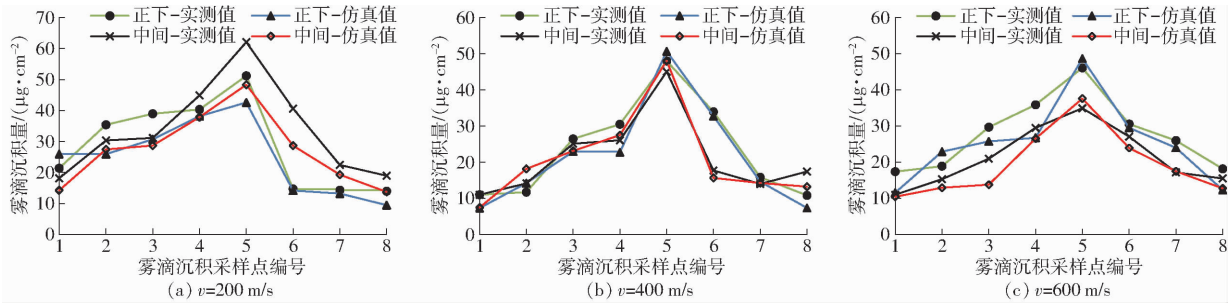


图 9　t = 1 800 s 时，不同气流速度下距地面高度 60 cm 位置雾滴沉积量的仿真值和实测值

Fig. 9　Simulation and measured values of droplets deposition at height of 60 cm under different operating parameters at t = 1 800 s

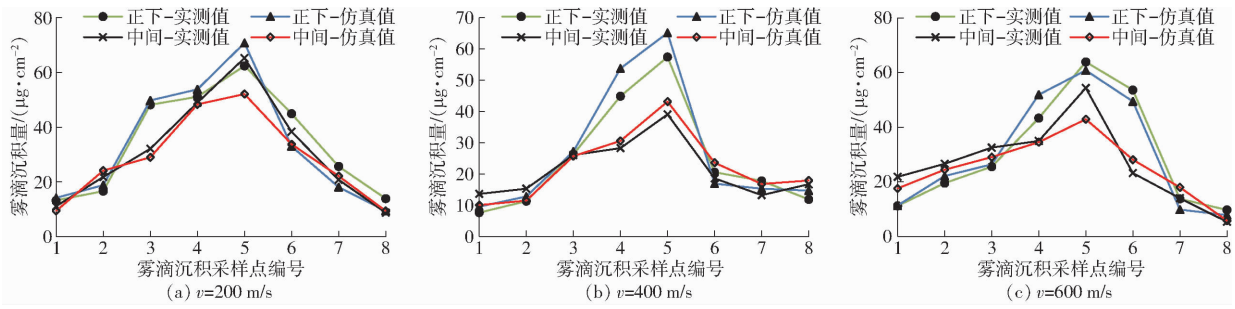


图 10 t = 1 800 s 时,不同气流速度下距地面高度 80 cm 位置雾滴沉积量的仿真值和实测值

Fig. 10 Simulation and measured values of droplets deposition at height of 80 cm under different operating parameters at t = 1 800 s

不变的情况下,当作业参数选取气流速度 400 m/s(系统气压 0.3 MPa,液压 0.05 MPa)时,能够获得最优的作业效果,即:较低的雾滴地面沉积量,较高的雾滴空中沉积量。

表 1 为不同作业参数下实测值与仿真值的相关系数。由表 1 可知,雾滴沉积量的仿真值和实测值的相关系数为 0.924 ~ 0.990,在相同作业参数、相同采集区域、相同采集高度下,仿真值与实测值具有极强相关性,说明在雾滴的分布特征和变化趋势上,仿真值与真实值具有极高的一致性,仿真值能够很好地反映烟雾系统在实际作业中雾滴的沉积量分布特性。

表 1 不同作业参数下实测值与仿真值的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient between measured and simulated values under different operation parameters

气流速度/(m·s⁻¹)	采样区域	采样点距地面高度/cm			
		0	40	60	80
200	正下	0.961	0.949	0.981	0.981
	中间	0.980	0.976	0.958	0.967
400	正下	0.989	0.972	0.985	0.966
	中间	0.959	0.976	0.924	0.969
600	正下	0.979	0.924	0.990	0.988
	中间	0.954	0.952	0.948	0.948

表 2 为不同作业参数下雾滴沉积量仿真值与实测值的相对误差分布表。相对误差能很好地反映测量的可信程度。由表 2 可知,在不同作业参数、不同采集区域、不同采集高度下,雾滴沉积量的仿真值和实测值的相对误差为 0.008 ~ 0.374,仿真值和实测值的整体相对误差小于 0.374 2,其中各采样点相对

表 2 不同作业参数下实测值与仿真值的相对误差

Tab. 2 Relative error between measured and simulated values under different operation parameters

气流速度/(m·s⁻¹)	采样区域	采样点编号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
200	正下	0.069	0.133	0.033	0.053	0.134	0.265	0.294	0.320
		0.213	0.268	0.212	0.054	0.168	0.035	0.077	0.322
		0.281	0.008	0.094	0.087	0.027	0.147	0.229	0.334
		0.279	0.144	0.216	0.285	0.286	0.333	0.242	0.310
	中间	0.156	0.108	0.098	0.013	0.202	0.119	0.064	0.071
		0.216	0.096	0.079	0.157	0.222	0.295	0.140	0.276
		0.321	0.085	0.126	0.140	0.288	0.232	0.297	0.232
		0.164	0.148	0.203	0.065	0.125	0.350	0.292	0.336
400	正下	0.252	0.133	0.033	0.198	0.134	0.178	0.141	0.236
		0.334	0.213	0.133	0.255	0.056	0.035	0.077	0.322
		0.203	0.246	0.094	0.087	0.027	0.158	0.227	0.238
		0.195	0.233	0.310	0.132	0.040	0.138	0.242	0.310
	中间	0.262	0.249	0.014	0.080	0.105	0.269	0.270	0.071
		0.322	0.284	0.079	0.054	0.067	0.116	0.018	0.240
		0.321	0.085	0.126	0.188	0.065	0.232	0.297	0.298
		0.266	0.142	0.073	0.140	0.044	0.128	0.348	0.213
600	正下	0.013	0.133	0.033	0.198	0.048	0.078	0.286	0.193
		0.334	0.213	0.132	0.255	0.056	0.035	0.077	0.322
		0.203	0.036	0.019	0.004	0.027	0.073	0.024	0.374
		0.279	0.144	0.316	0.345	0.340	0.341	0.242	0.310
	中间	0.193	0.082	0.107	0.013	0.210	0.211	0.283	0.071
		0.051	0.154	0.343	0.101	0.076	0.116	0.018	0.176
		0.321	0.085	0.126	0.219	0.040	0.072	0.076	0.322
		0.266	0.336	0.231	0.223	0.034	0.073	0.315	0.087

误差小于等于 0.15 占 47.83%，小于等于 0.25 占 72.02%，小于等于 0.35 占 98.68%，说明在沉积量的模拟预测方面，仿真值也能够较好地反映实测值。

4　结论

（1）固定管道式常温烟雾系统作业时可在温室内形成涡旋气流，有益于雾滴在整个温室内和作物冠层中的漂浮、弥散和沉积。系统最优作业参数为气压 0.3 MPa、液压 0.05 MPa。

（2）喷头正下方和中间区域的雾滴最大沉积量分布在喷头喷射方向前方 1 m 区域（采样点 5），且延喷头喷射方向呈逐渐降低趋势。相同试验条件下，雾滴沉积量随着气流速度的增加呈降低趋势。喷头正下方的雾滴地面沉积量低于中间区域的雾滴地面沉积量，而在高度 40、60、80 cm 下，喷头正下方相应的雾滴沉积量高于中间区域。正下方区域的雾滴沉积量主要分布在高度 60 ~ 80 cm 区间，中间区域的雾滴沉积量主要分布在高度 40、80 cm 的区域。

（3）不同作业参数下雾滴在不同高度沉积量的仿真值和实测值的相关系数为 0.990 ~ 0.924。雾滴沉积量仿真值和实测值的相对误差为 0.008 ~ 0.374，说明 CFD 仿真能较好地反映出试验条件下雾滴的沉积分布特性。

参　考　文　献

[1] ARBEL A, YEKUTIELI O, BARAK M. Performance of a fog system for cooling greenhouses[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72:129 - 136.

[2] LI S, WILLITS D H. Comparing low-pressure and high-pressure fogging systems in naturally ventilated greenhouses[J]. Biosystem Engineering, 2008, 101: 69 - 77.

[3] ISHIGAMI Y, TETSUKA T, GOTO E. Analysis of the aerial environment of a tomato greenhouse equipped with different fog cooling systems[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2014, 70(2): 127 - 131.

[4] KATSOULAS N, SAVVAS D, TAIROGIANNIS I, et al. Response of an eggplant crop grown under Mediterranean summer conditions to greenhouse fog cooling[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 123: 90 - 98.

[5] GARCIA M L, MEDRANO E, SANCHEZ-GUERRERO M C, et al. Climatic effects of two cooling systems in greenhouses in the Mediterranean area: external mobile shading and fog system[J]. Biosystem Engineering, 2011, 108: 133 - 143.

[6] SANCHEZ-HERMOSILLA J, PAEZ F, RINCON 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.

[7] NUYTTENS D, WINDEY S, SONCK B. Comparison of operator exposure for five different greenhouse spraying applications [J]. Journal of Agricultural Safety and Health, 2004, 10: 187 - 195.

[8] NUYTTENS D, BRAEKMAN P, WINDEY S, et al. Potential dermal pesticide exposure affected by greenhouse spray application technique[J]. Pest Management Science, 2009, 65: 781 - 790.

[9] 訾薇, 孙万华, 韩莉梅,等. 保护地蔬菜病害发生动态及防治对策[J]. 现代农业科技, 2013(5): 159.

[10] 何雄奎. 中国植保机械与施药技术研究进展[J]. 农药学学报, 2019, 21(5 - 6): 921 - 930.
HE Xiongkui. Research and development of crop protection machinery and chemical application technology in China[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2019, 21(5 - 6): 921 - 930. (in Chinese)

[11] 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, 2020, 2(1): 133 - 146.
HE Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China [J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133 - 146. (in Chinese)

[12] 李雪, 吕晓兰, 张美娜,等. 设施固定管道式二相流常温烟雾系统雾滴沉积试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 199 - 204.
LI Xue, LÜ Xiaolan, ZHANG Meina, et al. Droplet distribution and deposition of fixed pipes cold fogging system in greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 199 - 204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s026&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.026. (in Chinese)

[13] LI X, LU D P, WANG S L, et al. Droplet distribution and airflow simulation of a newly designed[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2019, 28(2): 194 - 202.

[14] 李雪, 陆岱鹏, 王士林, 等. 一种农用气液两相喷头的设计与喷雾特性仿真[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 722 - 728.
LI Xue, LU Daipeng, WANG Shilin, et al. Design and simulation of an agricultural twin fluid nozzle[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(3): 722 - 728. (in Chinese)

[15] DELELE M A, DE MOOR A, SONCK B, et al. Modelling the dispersion of pesticide droplets from air-assisted orchard sprayers[C]// Fluent Benelux 2005 User Group Meeting, 2005.

[16] WEINER K L, PARKIN C S. The use of computational fluid dynamics code for modeling spray from a mistblower[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 44(5): 313 - 324.

[17] SIDAHMED M M, BROWN R B. Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry air blast sprayer—part I: air jet model[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 5 - 10.

（下转第 315 页）

of different wind tunnel evaluation methods[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(3): 271 – 280.
[14] HERBST A. A method to determine spray drift potential from nozzles and its link to buffer zone restrictions[C]. ASAE Paper 011047, 2001.
[15] GENG B, KAZUHIRO N, TOMOMICHI M K, et al. Characteristics and classification of Japanese nozzles based on relative spray drift potential[J]. Crop Protection, 2013, 46:88 – 93.
[16] TESKE M E, BOWERS J F, RAFFERTY J E, et al. FSCBG: an aerial spray dispersion model for predicting the fate of released material behind aircraft[J]. Environmental Toxicology and Chemisty, 1993, 12(3): 453 – 464.
[17] TESKE M E, THISTLE H W. Aerial application model extension into the far field[J]. Biosystems Engineering, 2004,89(1): 29 – 36.
[18] NUYTTENS D, DE S M, BAETENS K, et al. The influence of operator-controlled variables on spray drift from field crop sprayers[J]. Trans. ASABE, 2007,50(4): 1129 – 1140.
[19] 李秉华,王贵启,李香菊,等. 农药飘移状况的室内模拟测定[J]. 河北农业科学,2006,10(2): 43 – 46.
LI Binghua, WANG Guiqi, LI Xiangju, et al. Determination of indoor simulation of pesticide drift[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2006, 10(2): 43 – 46. (in Chinese)
[20] 祁力钧,胡锦蓉,史岩,等. 喷雾参数与飘移相关性分析[J]. 农业工程学报,2004,20(5):122 – 125.
QI Lijun, HU Jinrong, SHI Yan, et al. Correlative analysis of drift and spray parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 122 – 125. (in Chinese)
[21] 张慧春,GARY Dorr,郑加强,等. 喷雾飘移的风洞试验和回归模型[J]. 农业工程学报,2015,31(3):94 – 100.
ZHANG Huichun, GARY Dorr, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment and regression model for spray drift[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 94 – 100. (in Chinese)
[22] 张慧春, GARY Dorr, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6):53 – 57.
ZHANG Huichun, GARY Dorr, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribution of flat fan nozzles[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):53 – 57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120610&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.010. (in Chinese)
[23] 丁素明,薛新宇,兰玉彬,等. NJS – 1 型植保直流闭口式风洞设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(4):76 – 84.
DING Suming, XUE Xinyu, LAN Yubin, et al. Design and experiment of NJS – 1 type open-circuit closed wind tunnel for plant protection[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4):76 – 84. (in Chinese)
[24] FRITZ B K, HOFFMANN W C, KRUGER G R, et al. Comparison of drop size data from ground and aerial application nozzles at three testing laboratories[J]. Atomization and Sprays, 2014, 24(2): 181 – 192.
[25] 屠豫钦,李秉礼. 农药应用工艺学导论[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
[26] ASAE Standards. S572: Spray nozzle classification by droplet spectra[S]. St. Joseph, Mich.: ASAE,2004.
[27] MILLER P C H, MAWER C J, MERRITT C R. Wind tunnel studies of the spray drift from two types of agricultural spray nozzle[J]. Aspects of Applied Biology, 1989,21: 237 – 238.
[28] HERBST A, GANZELMEIER H. Classification of sprayers according to drift risk—a German approach[J]. Aspects of Applied Biology, 2000, 57: 35 – 40.
[29] NILARS M S. Some nozzle performance considerations when using wide booms at higher spraying speeds[J]. Aspects of Applied Biology, 2002, 66: 95 – 105.

(上接第 267 页)

[18] TSAY J, OZKAN H E, FOX R D, et al. CFD simulation of mechanical spray shields[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(5): 1271 – 1280.
[19] BAETENS K, NUYTTENS D, VERBOVEN P, et al. Predicting drift from field spraying by means of 3D computational fluid dynamics model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 161 – 173.
[20] 王俊, 祁力钧, 孙小华. 基于 CFD 的罩盖防飘移机理模拟及防飘移效果量化研究[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(4):95 – 100.
WANG Jun, QI Lijun, SUN Xiaohua. Simulation and quantification on drift-reduction of double-foil shield[J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(4): 95 – 100. (in Chinese)
[21] 傅泽田, 王俊, 祁力钧, 等. 果园风送式喷雾机气流速度场模拟及试验验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 69 – 74.
FU Zetian, WANG Jun, QI Lijun, et al. CFD simulation and experimental verification of air-velocity distribution of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 69 – 74. (in Chinese)
[22] 吕晓兰, 张美娜, 常有宏,等. 果园风送喷雾机导流板角度对气流场三维分布的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15):81 – 87.
LÜ Xiaolan, ZHANG Meina, CHANG Youhong, et al. Influence of deflector angles for orchard air-assisted sprayer on 3D airflow distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 81 – 87. (in Chinese)
[23] OLIVET J J, VAL L, USERA G. Distribution and effectiveness of pesticide application with a cold fogger on pepper plants cultured in a greenhouse[J]. Crop Protection, 2011, 30(8):977 – 985.
[24] 李慧, 祁力钧, 王沛. 悬挂式常温烟雾机气流场与雾滴沉积三维模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 103 – 109.
LI Hui, QI Lijun, WANG Pei. 3-D simulation for airflow field and droplets deposition of hanging cold sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 103 – 109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140416&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.016. (in Chinese)