

风幕式喷杆喷雾气液两相流数值模拟*

燕明德^{1,2} 毛罕平¹ 贾卫东¹ 董祥² 李成¹ 赵丽伟²

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 建立了风幕式喷杆喷雾的数值计算模型并运用 Fluent 软件对其气液两相流场进行了模拟研究, 分别研究了风幕气流、风幕出风口与喷口水平及垂直相对位置和喷施角度对于喷雾流场的影响。研究表明: 随着风幕风速的逐步增大, 风幕气流对于气相流场和喷出雾滴的影响逐步增大; 当风幕出风口与喷口在水平方向拥有合理的距离时, 风幕气流能够发挥较好的防飘移作用; 风幕气流在垂直方向远离喷口等效于风幕气流速度的减小, 因而其防飘移效果逐步变差; 喷施角度变大后雾滴的垂直方向动能变小, 有更多的雾滴因为其垂直方向动能的衰减而难以到达采样面, 从而造成雾滴群的防飘移性能逐步变差。

关键词: 风幕式喷杆喷雾 Fluent 模拟 数值建模 喷雾流场 防飘移性能

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0068-07

Numerical Simulation on Gas-liquid Two Phase Flow of Air-assist Boom Spraying

Yan Mingde^{1,2} Mao Hanping¹ Jia Weidong¹ Dong Xiang² Li Cheng¹ Zhao Liwei²

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A numerical calculation model of air-assist boom spraying was established. The Fluent was used to simulate the gas-liquid two phase flow field of air-assist boom spraying when the operational parameters of influencing factors changed, including airflow velocity of air curtain, the horizontal and vertical relative position between the air curtain and the nozzle, and the spraying angle. The results showed that the influence of air curtain on gas-liquid two-phase gradually increased with the increase of airflow velocity of air curtain. The air curtain could be more useful to anti-drift performance when there was a reasonable horizontal distance between the air curtain and the nozzle. Air curtain going away from the nozzle in vertical direction was equivalent to airflow velocity of air curtain decreasing. Therefore, the anti-drift performance went weaker. With the increase of spraying angle, the kinetic energy of droplets in vertical direction decreased. More droplets were difficult to reach the sample surface because of the attenuation of kinetic energy in vertical direction, so that the anti-drift performance went weaker.

Key words: Air-assist boom spraying Fluent simulation Numerical modeling Spray flow field Anti-drift capability

收稿日期: 2012-11-14 修回日期: 2013-03-01

* 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011048)、江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)和土壤植物机器系统技术国家重点实验室开放基金资助项目(2011-SKL-1)

作者简介: 燕明德, 博士生, 中国农业机械化科学研究院研究员, 主要从事精确施药技术研究, E-mail: y-m-d2008@sohu.com

通讯作者: 毛罕平, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程研究, E-mail: maohp@ujs.edu.cn

引言

喷杆喷雾由于喷雾量大,因而在作业中会出现严重的农药飘移现象。针对这一现象,提出了风幕式喷杆喷雾技术,大量研究结果证实风幕式喷杆喷雾技术在减少飘移方面具有突出优点^[1-4]。一些研究表明:如果风幕式喷杆喷雾技术的相关运行参数设置不当,反而有可能增加药液雾滴的飘移^[5-7]。为了深入理解和更好地利用风幕式喷杆喷雾这项技术,国外研究人员进行了大量的模拟和试验研究,以探索喷雾流场的特性及优化其运行参数^[8-11]。

国内对于风幕式喷杆喷雾技术的关注和研究开始较晚,严荷荣等对喷幅为 24 m 的牵引式风幕式喷杆喷雾机进行了研究,在此基础上,研制了自走式高地隙风幕喷杆喷雾机,并对其性能进行试验^[12-14]。但国内对该项技术的研究还主要停留在风幕式喷杆喷雾机整机的集成与气流辅助功能的实现上。虽然国内王俊、刘雪美等对该技术作了基础理论研究,但是并未对影响防飘移效果的各因素及气液两相流场产生的相应变化进行深入分析^[15-16]。

为了探索风幕式喷杆喷雾的流场特性,本文基于 3W 系列风幕式喷杆喷雾系统,建立风幕式喷杆喷雾的数值计算模型并运用 Fluent 软件对其气液两相流场进行模拟研究。

1 数值建模

1.1 几何模型建立

图 1 为 3W 系列风幕式喷杆喷雾系统的结构,在喷杆喷雾机上添加轴流风机和风幕气囊。喷雾作业时,由轴流风机产生的辅助气流通过风幕气囊并在其出风口形成高速下行气流,由于风幕气囊的出风口为一排直径较小的圆孔,因而高速下行气流组

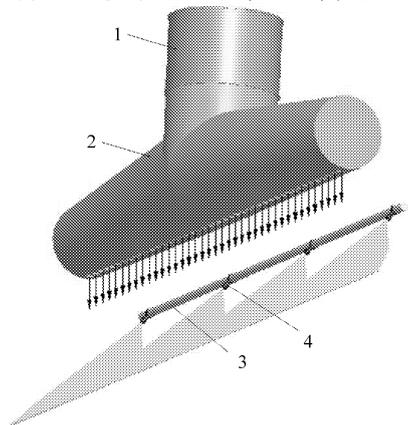


图 1 风幕式喷杆喷雾的基本结构

Fig. 1 Basic components of air-assist boom spraying

1. 轴流风机 2. 风幕气囊 3. 喷杆 4. 喷嘴

成一道风幕并作用于喷出雾滴,从而对喷雾性能产生影响。

根据 3W 系列风幕式喷杆喷雾的实际喷洒范围及相关部件的尺寸,选取如图 2 所示的模拟计算区域,长为 2 800 mm、宽为 1 600 mm、高为 1 150 mm;计算区域顶面有一排小孔($\phi 20 \times 35$)作为风幕出风口,4 个喷口位于计算区域内部;设定计算区域的前界面为自然风的流入界面;根据 Fluent 软件的要求,喷头喷洒方向必须位于 x 正方向,故选择长方体高度方向为 x 方向,选取长方体长度方向为 y 方向、宽度方向为 z 方向,设定坐标系的原点位于风幕出风口的中心位置。

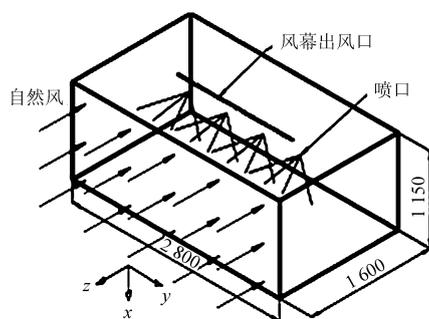


图 2 模拟计算区域

Fig. 2 Simulation of calculated region

1.2 计算模型选取

由于风幕式喷杆喷雾过程是一个气液两相相互作用的过程,其中气相是空气,液相是喷出的雾滴,雾滴相对于周围的空气而言非常稀薄,因而符合 Lagrangian 离散相模型的要求。根据喷雾过程的实际状况及主要影响因素,在模拟中主要用到如下计算模型:①流体运动的基本方程,包括质量守恒定律和动量守恒定律。②标准 $k-\epsilon$ 双方程模型。③颗粒的力平衡方程。④雾滴的轨迹方程。⑤TAB 破碎模型。⑥液滴的碰撞模型。⑦离散相与连续相间的耦合。

1.3 边界条件及相关参数设置

结合风幕式喷杆喷雾的实际工作情况,选择风幕出风口和计算区域的前界面为计算区域的入口并将边界条件分别设定为质量入口和速度入口。为简化计算,质量入口的流量根据实测的风幕风速的平均值换算得出,在速度入口处假定自然风水平且均匀进入计算区域。根据田间植保作业的规范可知,喷杆喷雾不可在 3 级(3.4 ~ 5.4 m/s)以上的自然风下作业,因此本文设置自然风风速为 4 m/s;设定除风幕出风口及前界面之外的各界面为计算区域的出口并将边界条件设定为压力出口,由于喷雾环境为正常的大气环境,因此各压力出口处的总压为零;选择 4 个扇形喷嘴的扁平喷口所在位置为雾滴释放

口,设定雾化器模型为平板扇叶喷嘴,其相关参数根据实测结果及理论计算得出,喷口位置及扇叶向量

根据实际工况确定。表1为模拟计算中连续相和离散相的主要参数。

表1 连续相和离散相的主要参数

Tab.1 Main parameters of continuous phase and discrete phase

边界条件		参数	数值
连续相	质量入口	质量流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0.002 64(35 Hz), 0.003 69(50 Hz), 0(0 Hz), 0.001 72(20 Hz)
		湍流强度/%	10
	速度入口	水力直径/mm	20
		速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	4
		压力出口	总压/Pa
离散相	平板扇叶喷嘴	质量流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0.032 8(0.3 MPa), 0.042 4(0.5 MPa)
		喷雾半角/(°)	55
		喷口等效宽度/mm	0.5
		扩散角/(°)	21

2 模拟计算

2.1 计算步骤

在 Gambit 2.3.16 中建立图2中的计算区域,采用四面体与六面体相结合的非结构网格对计算区域进行网格划分,网格数为539 962。采用 Fluent 3d 求解器,选择非稳态压力基隐式求解,设置压力-速度耦合方式为 PISO。模拟中首先计算连续相,随后在收敛或部分收敛的连续相流场中加入离散相,进行连续相与离散相的耦合计算直到获取收敛的解。

2.2 模拟研究

(1) 风幕气流对喷雾流场的影响

固定风幕出风口于喷口后方,使喷口与风幕出风口水平距离为零,垂直距离为20 mm,喷施角度为 15° ,在工作压力为0.5 MPa和0.3 MPa下分别对风机频率为0(无风)、20、35、50 Hz 工况进行模拟。

(2) 风幕出风口与喷口水平相对位置对喷雾流场的影响

固定风机频率为50 Hz、工作压力为0.5 MPa、喷口与风幕出风口垂直距离为零,在喷施角度为 5° 和 15° 下对风幕出风口位于喷口后方且两者水平距离分别为0、40、80、120、160 mm 的工况进行模拟。

(3) 风幕出风口与喷口垂直相对位置对喷雾流场的影响

固定风机频率为50 Hz、工作压力为0.5 MPa、喷施角度为 15° ,在风幕出风口与喷口的水平相对位置 z 为-20 mm和-40 mm下对风幕出风口与喷口的垂直距离分别为0、50、100 mm 的工况进行模拟。

(4) 喷施角度对喷雾流场的影响

固定风机频率为50 Hz、工作压力为0.5 MPa、风幕出风口与喷口的垂直距离为零,在风幕出风口

与喷口的水平相对位置 z 为-20 mm和-40 mm下对喷施角度分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 的工况进行模拟。

3 模拟结果及分析

3.1 风幕气流

选取计算区域内 $y = 250$ mm处的剖面作为观察面,该面刚好位于距离喷杆中心250 mm的喷头的中间平面上。图3和图4分别给出了在该观察面上不同风幕风速下气相流场的垂直方向分速度(速度显示范围-3.0~15.1 m/s,正值代表速度方向朝下、负值代表速度方向朝上)和水平方向分速度(速度显示范围-5~1 m/s,正值代表速度方向为逆自然风方向、负值代表速度方向为顺自然风方向)。观察风幕气流未加入时的流场可知:雾滴群附近及其后方区域为气相流场垂直方向分速度较大区域、顺自然风方向分速度较小区域;当风幕气流进入气相流场时对其气相分布结构产生影响,总体来说随着风幕风速的逐步变大,受到风幕气流影响的区域逐步扩大,具体表现为垂直方向分速度较大区域和顺自然风方向分速度较小区域逐步扩大,因而风幕气流能够优化气相流场的结构,对于减弱雾滴的飘移有正面影响。

由于田间实际的喷施作业中喷口与作物的垂直距离为400~500 mm,因此为了模拟雾滴在作物上的沉积情况,选取喷口下方500 mm的平面作为雾滴采样面,对所模拟的8个工况进行采样,采样步长0.01 s、采样步数5步(下文对雾滴的采样均采用该方式)。采样结束后以风幕出风口为原点,统计风幕出风口之前0.4 m到风幕出风口之后0.8 m区间内的雾滴总个数作为衡量雾滴总体防飘移性能指标,采集到的雾滴越多,总体防飘移性能越好。图5

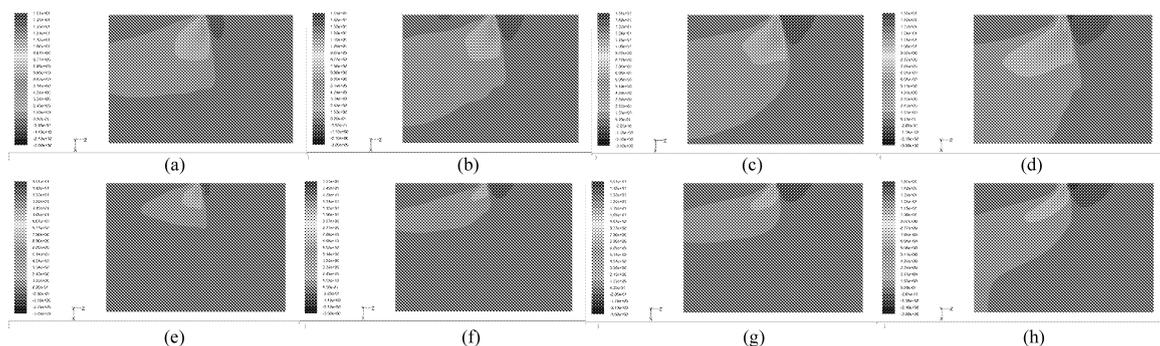


图 3 气相流场的垂直方向分速度

Fig. 3 Vertical velocity of air flow field

(a) $p = 0.5 \text{ MPa}, f = 0 \text{ Hz}$ (b) $p = 0.5 \text{ MPa}, f = 20 \text{ Hz}$ (c) $p = 0.5 \text{ MPa}, f = 35 \text{ Hz}$ (d) $p = 0.5 \text{ MPa}, f = 50 \text{ Hz}$
 (e) $p = 0.3 \text{ MPa}, f = 0 \text{ Hz}$ (f) $p = 0.3 \text{ MPa}, f = 20 \text{ Hz}$ (g) $p = 0.3 \text{ MPa}, f = 35 \text{ Hz}$ (h) $p = 0.3 \text{ MPa}, f = 50 \text{ Hz}$

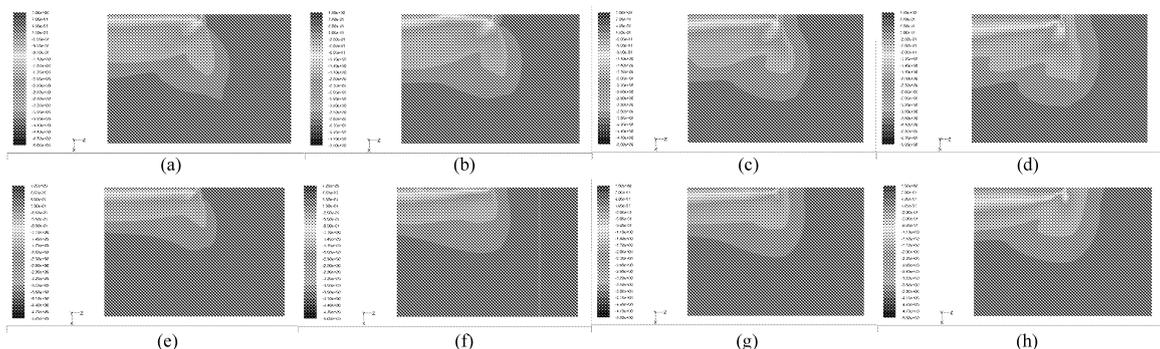


图 4 气相流场的水平方向分速度

Fig. 4 Horizontal velocity of air flow field

(a) $p = 0.5 \text{ MPa}, f = 0 \text{ Hz}$ (b) $p = 0.5 \text{ MPa}, f = 20 \text{ Hz}$ (c) $p = 0.5 \text{ MPa}, f = 35 \text{ Hz}$ (d) $p = 0.5 \text{ MPa}, f = 50 \text{ Hz}$
 (e) $p = 0.3 \text{ MPa}, f = 0 \text{ Hz}$ (f) $p = 0.3 \text{ MPa}, f = 20 \text{ Hz}$ (g) $p = 0.3 \text{ MPa}, f = 35 \text{ Hz}$ (h) $p = 0.3 \text{ MPa}, f = 50 \text{ Hz}$

为 8 个工况下采集到的雾滴总个数。为清晰地描述数据散点的规律,在 Excel 中对数据进行了二次曲线的拟合,得出了数据散点的趋势线。由图可知:风机频率与采集到的雾滴总个数呈现一个二次曲线的关系,并且随着风幕风速的逐步变大,采集到的雾滴个数逐步变多,这意味着较大的风幕风速对于防止雾滴的飘移具有更好的效果。

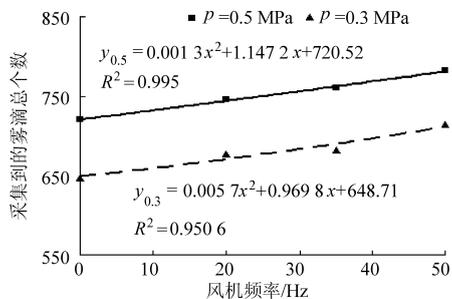


图 5 不同压力下采集到的雾滴总个数和风机频率关系曲线

Fig. 5 Total number of collected droplets in different pressures

3.2 水平相对位置

对几种工况进行采样,采样结束后以喷口为原点将采样面沿水平方向分为 12 个区间,区间范围的正值代表雾滴位于喷口的逆自然风方向、负值代表位于其顺自然风方向。

图 6 为风幕出风口与喷口的不同水平距离下采样面上雾滴个数的分布,其中 z 为风幕出风口与喷口的水平相对位置, z 为负值代表风幕出风口位于喷口后方。由图 6 可知:随着喷口与风幕出风口之间的距离逐步增大,在 $0 \sim 0.1 \text{ m}$ ($0.1 \sim 0.2$) 区间内雾滴的个数逐步增大,而在 $-0.2 \sim -0.1 \text{ m}$ ($-0.1 \sim 0$) 区间及其之后的区间内雾滴的个数呈现逐步减少的趋势。这意味着随着风幕出风口在水平方向逐步远离喷口,沉积在喷口前方的雾滴个数逐步减少,更多的雾滴顺自然方向向喷口后方运动并在距离喷口一定位置处得到沉积。

图 7 为采样面上雾滴的总个数及经过 Excel 二次数据拟合得到的趋势线。由图 7 可知:随着喷口与风幕出风口之间的距离逐步增大,雾滴个数先逐步增多直至 $z = -120 \text{ mm}$ 处出现峰值,随后逐步减少,因此风幕气流的防漂性能随着其与喷口间距离的增大而呈现先逐步变好后逐步变差的趋势。据此可以认为:风幕距离喷口较近时,喷口附近区域的气相流场受风幕气流的影响越大,喷出雾滴在气相流场的影响下能够较早地向下沉积,从而出现图 6 中所示的风幕距离喷口越近,沉积于喷口前方的雾滴

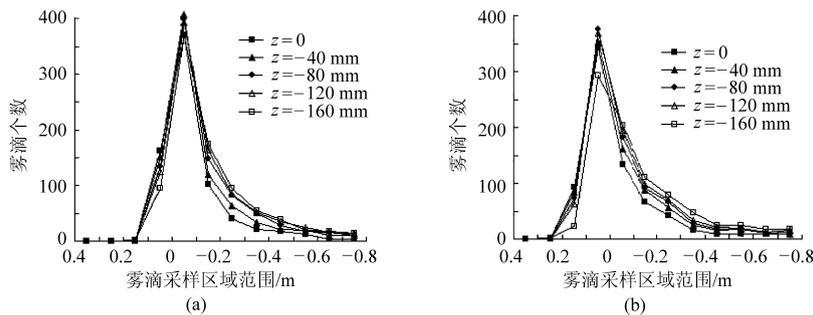


图6 不同水平距离下采样面上雾滴分布

Fig. 6 Droplet distribution on sampling plane in different horizontal distances

(a) $\theta = 5^\circ$ (b) $\theta = 15^\circ$

个数越多的现象,然而沿顺风方向通过风幕气流的主要影响区域后,部分未沉积的雾滴依然会随着自然风向后飘移;当风幕与喷口的距离逐步变大时,虽然喷出雾滴受到风幕气流的影响变弱,但此时风幕气流能够拦截到更多向后飘移的雾滴并将其向下输送,在自然风的作用下这部分雾滴顺风运动并逐步得到沉积,从而出现图6中所示的风幕距离喷口越远,沉积于喷口后方的雾滴个数越多的现象。可以认为:对风幕式喷杆喷雾而言,沉积到采样面上的雾滴由两部分组成,一部分为受风幕气流影响而得到较快沉积的雾滴,另一部分为风幕气流拦截到的原本待飘的雾滴。风幕气流距离喷口越近时,受风幕气流影响而得到较快沉积的雾滴个数越多,而拦截到的待飘雾滴个数越少;反之,风幕气流距离喷口越远时,受风幕气流影响而得到较快沉积的雾滴个数越少,而拦截到的待飘雾滴个数越多。因此,从防飘移角度考虑,当风幕与喷口之间拥有合理的水平距离时(在本文模拟的几个工况中,合理的水平距离为120 mm附近),沉积到采样面上的雾滴个数较多,即风幕气流能够发挥出较好的防飘移作用。

3.3 垂直相对位置

以风幕出风口为原点将采样面沿水平方向分为12个区间,区间范围的正值代表位于风幕出风口的逆自然风方向、负值代表位于其顺自然风方向。

图8为风幕出风口与喷口具有不同垂直距离下

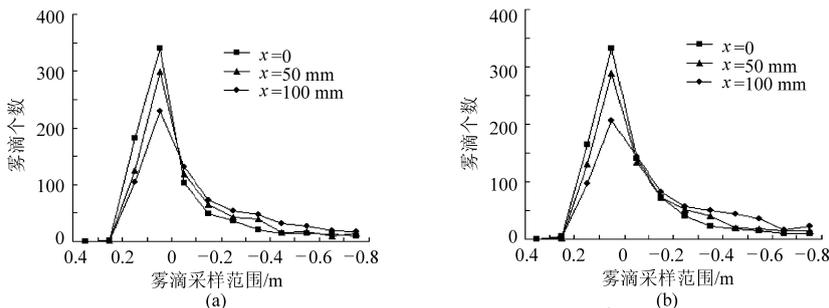


图8 不同垂直距离下采样面上雾滴分布

Fig. 8 Droplet distribution on sampling plane in different vertical distances

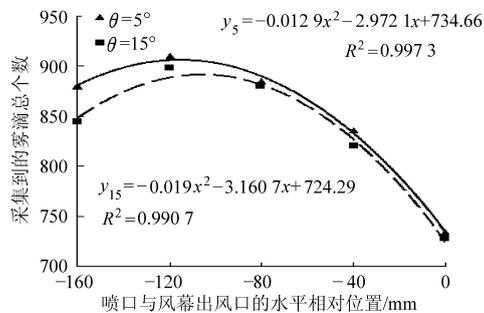
(a) $z = -20$ mm (b) $z = -40$ mm

图7 不同喷施角度下采集到的雾滴总个数

Fig. 7 Total number of collected droplets in different spray angles

采样面上雾滴个数的分布,其中 x 为风幕出风口与喷口的垂直相对位置。由图可知:在采样面上 $0 \sim 0.2$ m区间范围内,雾滴个数随着喷口与风幕出风口垂直距离的逐步增大而减小,而 $-0.1 \sim 0$ m区间及其以后区域内的雾滴个数却呈现逐步增多的趋势。这意味着随着风幕在垂直方向远离喷口,雾滴群受到风幕气流的影响逐步减弱,更多的雾滴顺自然风向后运动并在距离喷口后方一定位置处沉积于采样面上。

图9为各工况下雾滴的总个数及经过Excel二次数据拟合得到的趋势线。由图可知:随着喷口与风幕出风口垂直距离的逐步增大,采集到的雾滴总个数在逐步减少。这意味着风幕气流的防飘移效果随着其与喷口间距离的增大而逐步变差。将喷口与

风幕出风口垂直距离和风幕气流速度进行比较可知两者对于雾滴群的影响具有相似的规律。可以认为：风幕远离喷口等效于风幕气流速度的减小，从而对雾滴群附近的气相流场的影响减小、对雾滴群向下的压制作用减弱，因而其防飘移效果逐步变差。

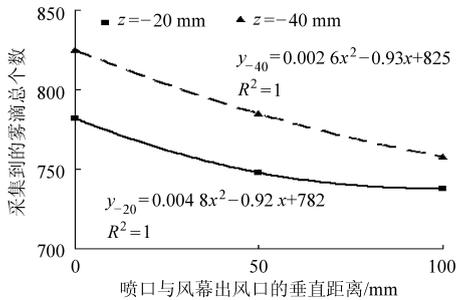
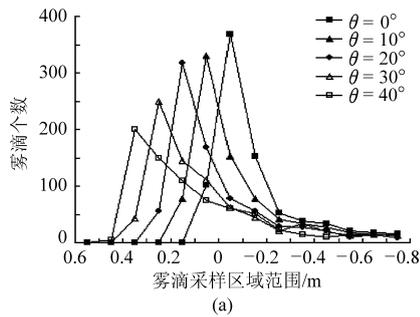


图 9 不同水平距离下采集到的雾滴总个数

Fig. 9 Total number of collected droplets in different horizontal distances



3.4 喷施角度

以风幕出风口为原点将采样面沿水平方向分为 14 个区间，区间范围的正值代表雾滴位于风幕出风口的逆自然风方向、负值代表位于其顺自然风方向。

图 10 为不同喷施角度下，采样面上雾滴个数的分布。由图可知：随着喷施角度的逐步变大，雾滴个数的峰值区间沿逆风方向向前移动，并且峰值区间内雾滴的个数逐步减少，同时在整个采样平面上雾滴的分散程度随着喷施角度的逐步变大而变大。

图 11 为采样面上雾滴的总个数及经过 Excel 二次数据拟合得到的趋势线。由图可以看出：随着喷施角度的增大，采样面上雾滴个数减少，即雾滴的防飘移性能变差。可以认为：随着喷施角度变大，雾滴的垂直方向平均分速度也逐渐变小，雾滴向下运动直至到达采样面的过程需要更多的时间，部分顺

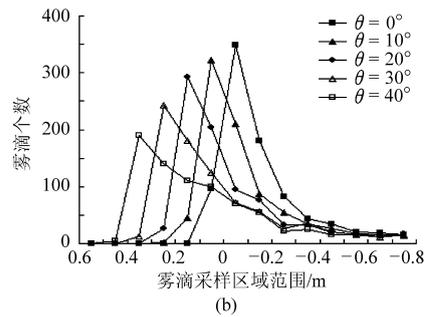


图 10 不同喷施角度下采样面上雾滴分布

Fig. 10 Droplet distribution on sampling plane in different spray angles

(a) z = -20 mm (b) z = -40 mm

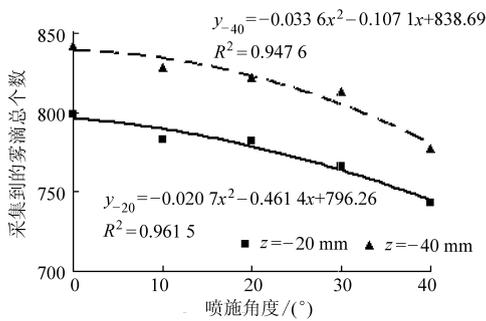


图 11 不同水平距离下采集到的雾滴总个数

Fig. 11 Total number of collected droplets in different horizontal distances

风运动的雾滴在到达采样面前就已经被自然风向后输送到更远的距离，加之逆风向前运动的雾滴个数逐步增多，从而造成了图 10 中所示的喷施角度越大雾滴越分散的现象。由于空气对于雾滴运动存在阻力，因而雾滴向下运动直至到达采样面的过程伴随着其垂直方向动能的衰减，而喷施角度变大后雾滴的垂直方向动能已经变小，在这种情况下有更多的

雾滴因为其垂直方向动能的衰减而难以到达采样面，从而造成雾滴群的防飘移性能逐步变差。

4 结论

(1) 风幕气流进入气相流场时能够对其产生影响，使气相流场垂直方向分速度具有较大区域和顺自然风方向分速度具有较小区域；随着风幕风速的逐步增大，风幕气流对于气相流场的影响逐步增强，对喷出雾滴的影响越来越大。

(2) 当风幕出风口与喷口在水平方向拥有合理的距离时，风幕气流能够发挥出较好的防飘移作用。

(3) 风幕气流在垂直方向远离喷口等效于风幕气流速度的减小，因而其防飘移效果逐步变差。喷施角度越大，雾滴越分散。

(4) 喷施角度变大后雾滴的垂直方向动能变小，有更多的雾滴因为其垂直方向动能的衰减而难以到达采样面，从而造成雾滴群的防飘移性能逐步变差。

参 考 文 献

- 1 Taylor W A, Andersen P G, Cooper S. The use of air assistance in a field crop sprayer to reduce drift and modify drop trajectories [C]//Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference: Weeds 2. Farnham, U. K. : BCPC Publications, 1989: 631 ~ 639.
- 2 Quanquin B J. Less drift, more on target with the twin system [C]. ASAE Paper 92-1564, 1992.
- 3 Quanquin B J. Air-assist applied to field sprayers [C] // Proceedings of the National Conference on Pesticide Application Technology. Guelph, Ontario: University of Guelph, 1995:124 ~ 126.
- 4 Young B W. A method for assessing the drift potential of hydraulic nozzle spray clouds, and the effect of air assistance[C] // Air-Assisted Spraying in Crop Protection, BCPC MONO. No.46. Farnham, U. K. : BCPC Publications, 1991: 77 ~ 86.
- 5 Hislop E C, Western N M, Cooke B K, et al. Experimental air-assisted spraying of young cereal plants under controlled conditions [J]. Crop Protection, 1993,12(3): 193 ~ 200.
- 6 Howard K D, Mulrooney J E. Testing protocol for the evaluation of air-assisted boom sprayers [C]. ASAE Paper AETC96116, 1996.
- 7 Robert E W. Equipment to reduce spray drift [R]. Lawrence, KS: Kansas State University, 2000.
- 8 Hislop E C, Western N M, Ruth Butler. Experimental air-assisted spraying of a maturing cereal crop under controlled conditions [J]. Crop Protection, 1995,14(1): 19 ~ 26.
- 9 Panneton B, Phillion H, Thériault R, et al. Spray chamber evaluation of air-assisted spraying on broccoli [J]. Crop Science, 2000,40(2): 444 ~ 448.
- 10 Piché M, Panneton B, Thériault R. Field evaluation of air-assisted boom spraying on broccoli and potato[J]. Transactions of the ASAE, 2000,43(4): 793 ~ 799.
- 11 Scudeler F, Raetano C G. Spray deposition and losses in potato as a function of air-assistance and sprayer boom angle [J]. Sci. Agric. , 2006,63(6): 515 ~ 521.
- 12 严荷荣,张志平. 风幕式喷杆喷雾机的研制 [J]. 农业机械,2006(1):139 ~ 140.
- 13 杨学军,严和荣,刘树民,等. 自走式高地隙风幕式喷杆喷雾机的研制[J]. 农业机械,2008(6):34 ~ 35.
- 14 张铁,杨学军,董祥,等. 超高地隙风幕式喷杆喷雾机施药性能试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):66 ~ 71.
Zhang Tie, Yang Xuejun, Dong Xiang, et al. Experiment on spraying performance of super-high clearance boom sprayer with air-assisted system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(10):66 ~ 71. (in Chinese)
- 15 王俊,祁力钧. 喷雾机喷杆压力损失及对喷雾质量的影响[J]. 农业机械学报,2006,37(3):42 ~ 45.
Wang Jun, Qi Lijun. Pressure drop on the boom sprayer and its effect on spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(3):42 ~ 45. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 汤伯敏,林光武,高崇义,等. 二相流喷雾技术的研究[J]. 农业工程学报,2001,17(5):59 ~ 62.
Tang Bomin, Lin Guangwu, Gao Chongyi, et al. Study on two-phase flow spraying technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2001,17(5):59 ~ 62. (in Chinese)

(上接第 67 页)

- 8 Lefcourt A M, Narayanan P, Tasch U, et al. Theoretical analysis of stability of axially-symmetric rotating objects with regard to orienting apples[J]. Transactions of the ASABE, 2008,51(4):1 353 ~ 1 364.
- 9 金诚谦,袁文胜,吴崇友,等. 大蒜播种时鳞芽朝向对大蒜生长发育影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(4):155 ~ 158.
Jin Chengqian, Yuan Wensheng, Wu Chongyou, et al. Experimental study on effects of the bulbil direction on garlic growth[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(4):155 ~ 158. (in Chinese)
- 10 何岳平,陈青春,何瑞银,等. 大蒜栽植机栽植系统优化设计与运动分析[J]. 农业机械学报,2011,42(2):88 ~ 93,119.
He Yueping, Chen Qingchun, He Ruiyin, et al. Optimal design and kinematic analysis for planting system of garlic planting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(2):88 ~ 93,119. (in Chinese)
- 11 荐世春,赵峰,李青,等. 旋转式蒜瓣单粒定向取种器的研究设计[J]. 农业装备与车辆工程,2009(2):18 ~ 20.
Jian Shichun, Zhao Feng, Li Qing, et al. Research and design on rotary garlic single-clove directional seed metering device[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2009(2):18 ~ 20. (in Chinese)
- 12 Gao Chi, Zhang Heng. Study on the direction identification and alignment of garlic scaly bud[J]. Advanced Materials Research, 2012, 482 ~ 484: 220 ~ 223.
- 13 俞亚新,赵匀,张斌,等. 基于稻种胚胎定向排列原理的排种器研究及参数优化[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2008, 29(3):194 ~ 197.
Yu Yaxin, Zhao Yun, Zhang Bin, et al. Seed metering device based on orienting ordered arrangement in embryo and parameter optimization[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008,29(3):194 ~ 197. (in Chinese)
- 14 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- 15 谢传锋. 动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.