

# 风洞条件下雾滴飘移模型与其影响因素分析\*

茹煜<sup>1</sup> 朱传银<sup>2</sup> 包瑞<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 中国民用航空总局第二研究所, 成都 610041)

**摘要:** 航空喷雾作业受侧风的影响容易产生雾滴的随风飘失, 影响喷雾效果。对影响雾滴飘移行为的相关因素进行了分析, 运用在三维坐标系中建立的雾滴运动方程, 获得了雾滴在侧风作用下的飘移预测模型, 通过计算可以预测雾滴在侧风作用下的飘移距离。利用风洞通过雾滴浓度测试方法进行了不同气流条件和喷雾条件下的雾滴飘移规律的试验研究, 并通过线性回归模拟法计算获得雾滴在风洞试验条件下的实际飘移距离。试验结果显示, 随着气流速度增大, 雾滴飘移距离明显增加, 小于 200  $\mu\text{m}$  的雾滴在侧风作用下更容易发生飘移; 对于雾滴粒径在 250  $\mu\text{m}$  以上大雾滴虽然也会沿风洞下风方向发生飘移, 但其垂直方向的动能也比较大, 因而飘移距离比较短。通过分析比较了试验计算的雾滴飘移距离与运动模型得到的雾滴飘移距离预测值, 雾滴飘移随雾滴粒径和气流大小的变化规律的结果比较吻合, 雾滴运动模型作为雾滴飘移行为的显性表达式是可行的。

**关键词:** 风洞 雾滴飘移 预测模型 航空喷雾

**中图分类号:** S252<sup>+</sup>.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0066-07

## 引言

航空喷雾因其作业效率高, 已日益成为农林病虫害快速、高效防治的首选作业模式<sup>[1-2]</sup>。但由于航空喷雾受作业条件和环境因素的影响, 存在飘移损失大、沉积效果差的问题。侧风对雾滴产生的随风飘失, 即雾流中的细小雾滴被与雾滴运动相垂直的气流携带出靶标区后消失或再沉降的过程<sup>[3]</sup>, 是影响航空喷雾效果的主要因素。

目前雾滴飘失的研究方法主要是田间测试和风洞研究。Teske 等根据大量田间测试结果经过近 10 年研发了著名的 AGDISP (Agricultural dispersion) 和 AGDRIFT (Agricultural drift) 模型<sup>[4-5]</sup>。用户可以输入喷嘴、药液、飞机类型、天气因素等, 通过对内部数据库调用, 预测可能产生的飘移, 有效准确预测范围可达 20 km。Fritz 等通过一系列喷嘴在低速风洞中测得的尺寸和流量建立了 WTDISP (Wind tunnel dispersion) 模型, 得到不同喷嘴在风洞条件下的飘移规律<sup>[6]</sup>。由于气象因素的不稳定性和不可控性使得田间试验结果很难重复, 确定某一因素对试验结果的影响作用和对该因素的作用进行量化变得非常困难<sup>[7-8]</sup>。国内更多的学者针对喷洒部件的防飘性能采用了室内风洞试验研究, 傅泽田等利用英国 Silso Research Institute 的风洞完成了一定下风处的

雾滴飘移量试验, 反映了不同类型喷头的飘移特性<sup>[9]</sup>。李秉华等采用室内恒定风速模拟, 结合分光光度法测定和数学模型方法研究了不同农药喷雾量及喷雾溶液浓度在接近地面处的飘移情况<sup>[10]</sup>。祁力钧等应用数学建模方法分析了不同喷雾参数与飘移量之间的相关关系, 并通过回归分析, 确定了它们对飘移量的作用程度<sup>[11]</sup>。吴罗罗等用风洞设备分别比较了多种类型喷头在不同侧风条件下的抗飘失能力<sup>[12-13]</sup>。以上风洞中雾滴飘移研究主要是以飘移量为核心比较了几种不同喷头在不同作业参数下的飘失情况, 而雾滴飘移距离在航空喷雾中是反映雾滴飘移的非常重要参数, 是评价航空喷雾效果非常重要的指标。目前, 就影响雾滴飘移距离主要参数的量化研究很少, 也未形成预测雾滴飘移规律的数学模型。

本文对影响雾滴飘移行为的相关因素进行分析, 获得各因素对雾滴飘移的预测模型, 并应用低速风洞, 建立侧风影响雾滴飘移的测试系统, 利用气溶胶颗粒质量浓度测试方法开展不同气流条件和喷雾条件下的雾滴飘移规律的试验研究。

## 1 风洞内雾滴飘移预测模型

雾滴在输运过程中会受到很多力的共同作用, 分析起来非常复杂。为了突出主要力的作用特征,

收稿日期: 2013-11-21 修回日期: 2014-01-12

\* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD19B08)、江苏省自然科学基金资助项目(BK20131422)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)和江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修资助项目

作者简介: 茹煜, 副教授, 博士, 主要从事植保机械和农药使用技术研究, E-mail: superchry@163.com

同时方便建立雾滴运动数学模型,这里进行一些假设,认为单个雾滴是球状粒子,而且不考虑其变形特征;忽略雾滴的蒸发和气流对雾滴的干扰。因而所研究风洞条件下的稀疏两相流雾滴在输运过程中仅考虑受重力,空气曳力的作用。

设雾滴直径为  $d_p$ 、雾滴质量为  $m_p$ 、雾滴密度为  $\rho_p$ 、雾滴速度为  $v_p$ 、空气密度为  $\rho_f$ 、气流速度为  $v_f$ 、气体动力粘性系数为  $\mu_f$ ,根据牛顿运动的方程可知,雾滴在定向气流中的动力学模型<sup>[6]</sup>为

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{C_d Re}{24} F_D + F_w \quad (1)$$

$$\text{其中 } F_w = m_p g = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g \quad (2)$$

$$F_D = \frac{6\pi\mu_f d_p}{C_c} (v_f - v_p) \quad (3)$$

$$Re = \frac{v_f - v_p}{\mu_f} d_p \rho_f \quad (4)$$

式中  $F_w$ ——重力, N  $F_D$ ——空气曳力, N

$C_d$ ——阻力系数  $Re$ ——雷诺数

$C_c$ ——坎宁安滑移修正系数,通常取 1.489

$C_d$  与雾滴在气流中运动的  $Re$  有关。

沿风洞下风方向的雾滴和气流的相对运动速度可近似看作是气流速度,即  $v_f - v_p \approx v_f = 1 \sim 4 \text{ m/s}$ 。此外,  $d_p = 80 \sim 420 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\mu_f = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\rho_f = 1.205 \times 9.8 \text{ (N}\cdot\text{s}^2)/\text{m}^4$ ,可获得雾滴在气流中运动的雷诺数区间为  $52.2 < Re < 2\ 382.7$ 。当雷诺数  $Re < 2 \times 10^5$  时,  $C_d$  为

$$C_d = 24Re^{-1} + 3.73Re^{-0.5} - \frac{4.83 \times 10^{-3} Re^{0.5}}{1 + 3 \times 10^{-6} Re^{1.5}} + 0.49 \quad (5)$$

在三维坐标系下运用局部近似解法和雾滴速度模型<sup>[14-16]</sup>,求解雾滴的运动速度。其中  $Y$  方向设为重力作用方向,  $Z$  方向设为风洞下风方向,即气流作用方向,其解析式可写成

$$v_{px} = v_{px_0} e^{-\lambda S_x} \quad (6)$$

$$v_{py} = v_{py_0} e^{-\lambda S_y} - g\lambda (1 - e^{-\lambda S_y}) \quad (7)$$

$$v_{pz} = v_f - (v_{f_0} - v_{pz_0}) e^{-\lambda S_z} \quad (8)$$

其中

$$\lambda = \frac{3C_d\rho_f}{8\rho_p d_p}$$

式中  $v_{px}$ 、 $v_{py}$ 、 $v_{pz}$ ——雾滴在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的瞬时运动速度, m/s

$v_{px_0}$ 、 $v_{py_0}$ 、 $v_{pz_0}$ ——雾滴在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的初始速度, m/s

$v_{f_0}$ ——气流在喷头安装位置处的速度, m/s

$S_x$ 、 $S_y$ 、 $S_z$ ——雾滴在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的运动位移, m

$\lambda$ ——动量弛豫系数

联合式(1)~(8),可以求出雾滴在三维坐标位置处的运动速度。其中,雾滴初始速度主要是由喷射压力决定;通过流经液力喷头流体的伯努利方程和连续性方程可求得<sup>[17]</sup>。由上述模型可以看出随着时间的增长,雾滴在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的瞬时运动速度都在变小。当速度几乎等于零时,雾滴的运动基本结束,此时可计算出雾滴在三坐标方向的运动位移;通过计算模型中的  $v_{py}$  和  $S_z$  值可以预测雾滴在垂直沉降位置处的速度以及侧风作用下的飘移距离。

## 2 试验方法和设计

### 2.1 试验装置

基于风洞的雾滴飘移试验目的是验证雾滴飘移预测模型的合理性。

雾滴飘移风洞测试系统由风洞单元、喷雾单元以及测量单元等 3 部分组成,如图 1 所示。

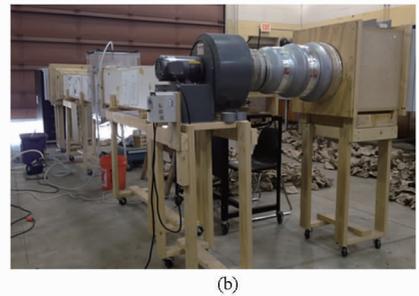
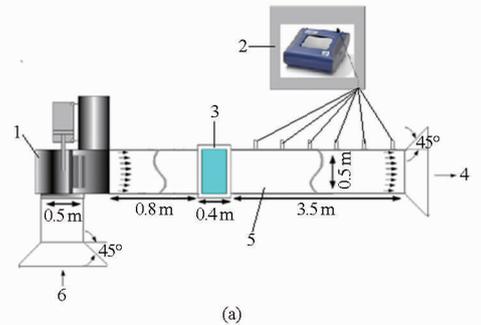


图 1 雾滴飘移风洞测试系统

Fig. 1 Wind tunnel testing system for spray drift

(a) 原理图 (b) 实物图

1. 风机 2. 测试单元 3. 喷雾单元 4. 气流出口 5. 风洞  
6. 气流入口

其中,风洞单元由封闭风道和离心风机构成,总长度为 5.8 m。风道截面为 0.5 m × 0.5 m 的正方形,喷雾前的风道长度为 0.8 m,喷雾后的风道长度为 3.5 m,为尽量减少气流输运过程的压力损失,内部平整光滑,气流沿着风道输送是稳定均匀的。气流由 D11E 型鼓风机产生,该风机通过 GS2 变频器可以调节电动机转速,从而可以获得 0.5 ~ 4 m/s 范围的可调气流速度。

喷雾单元由喷头、泵、管路、调节阀、压力表、流量计和水箱等部件组成(图2),根据试验需要选择S48AB88B92P型液泵,压力可以在0.1~0.5 MPa范围内调节;通过调节调压阀,可以控制喷头的喷雾压力和流量,从而得到不同的雾滴粒径。风洞单元和喷雾单元为测量单元提供了人为可控的作业参数。

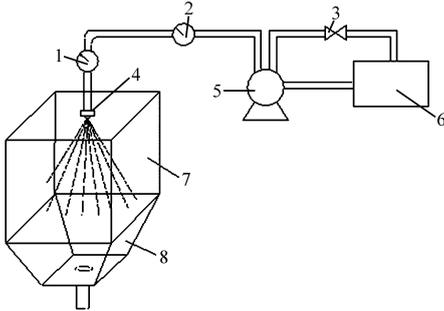


图2 喷雾单元的组成

Fig.2 Component of spraying unit

1. 流量计 2. 压力表 3. 调节阀 4. 喷头 5. 泵 6. 水箱  
7. 喷雾室 8. 沉降室

## 2.2 试验设计

影响雾滴飘移的主要因素包括雾滴粒径、空气气流速度、喷头作业高度。由于飞机飞行喷洒过程中,考虑安全因素飞机的飞行高度基本确定,所以在风洞试验系统里并未考虑喷头高度变化对雾滴飘移的影响,而是主要分析风洞气流速度(0.5、1.0、2.0、3.0和4.0 m/s)及雾滴粒径(60、150、200、250、350和450  $\mu\text{m}$ )对雾滴飘移的综合影响,从而获得不同大小的雾滴在风洞气流下的飘移规律。

### 2.2.1 雾滴标定试验

为了探讨雾滴粒径在风洞条件下对雾滴飘移的影响,应对试验用的喷头进行雾滴粒径的标定,如图3所示。试验采用TeeJet TX系列喷头,用LPSA激光粒度分析仪(Laser particle size analyzer,德国,SYMPATEC HELOS-VARIO,测量粒径范围0.1~875  $\mu\text{m}$ )对这几种喷头进行雾滴粒径的标定,选择5种(60、150、250、350和450  $\mu\text{m}$ )雾滴尺寸的作业参数(喷嘴型号、喷雾压力)为飘移测试试验作准备。测试时,激光扫描雾流的垂直高度与喷头至风洞轴线高度基本一致,以获得距离喷头一定位置处(距离喷头0.4 m)的雾滴粒径。

### 2.2.2 雾滴飘移试验

由于小雾滴在运动过程中更容易产生飘移,通过气溶胶监测仪检测小雾滴(PM10, 粒子直径在10  $\mu\text{m}$ 以内)在运动过程中的质量浓度变化,可以预测雾滴的飘移距离。在喷雾后的风道上每隔0.5 m布置5个测点(即距离喷头的横向距离为0.5、1.0、1.5、2.0和2.5 m),在不同作业条件(雾滴粒径、气



图3 雾滴粒径标定试验

Fig.3 Calibration test of droplets size

流速度)下在5个测点处采用气溶胶监测仪(DUSTTRAK DRX Aerosol Monitor Model 8533, TSI公司,美国,测量质量浓度范围1~10  $\text{mg}/\text{m}^3$ )分别进行小雾滴平均质量浓度的测量(图4),然后通过回归模拟法计算获得雾滴的实际飘移距离。



图4 雾滴质量浓度测试

Fig.4 Test of droplets concentration

## 3 结果与分析

### 3.1 雾滴的粒径标定

试验风洞气流速度0.5~4.0 m/s,属于低速气流,因而忽略气流对雾滴粒径的影响。5种TeeJet标准喷头在标准喷雾压力下的雾滴粒径测试结果如表1所示。在标定后的雾滴粒径结果中筛选出6种雾滴粒径(60、150、200、250、350和450  $\mu\text{m}$ )如表1中的灰色标识,同时确定获得这6种粒径时的喷雾作业参数,作为雾滴飘移试验的操作参数。这里的雾滴粒径是指雾滴累计分布为50%的雾滴直径 $D_{v50}$ ,即小于此雾滴直径的雾粒体积占全部雾粒体积的50%,也称为体积中径(VMD)。

表1 标准喷雾压力下雾滴粒径的标定

Tab.1 Droplet size calibration of nozzles under standard operating pressures  $\mu\text{m}$

喷雾压力 $p/\text{MPa}$	TeeJet 喷头型号(TX 系列)				
	VS3	VS6	VK8	VK12	VK18
0.15	150.28	218.52	342.20	350.28	450.16
0.25	124.56	198.84	300.24	308.46	386.36
0.35	83.24	168.90	250.32	260.82	320.42
0.45	59.54	142.68	212.74	208.72	274.83

### 3.2 雾滴粒径对雾滴飘移的影响

在气流速度为 1 m/s 条件下,在距离喷头不同位置的 5 个测点处测得不同雾滴粒径时的小雾滴平均质量浓度,如图 5 所示。可以看出,随着雾滴粒径的增加,在相同测点处小雾滴的质量浓度变小,说明飘移到该测点的雾滴数量变少;而且雾滴质量浓度曲线随雾滴粒径增加而变陡,雾滴更容易快速沉降,飘移距离缩短。针对雾滴粒径对雾滴飘移影响的数据进行线性回归分析<sup>[18-19]</sup>,得到 1 m/s 气流条件下,不同雾滴粒径的飘移规律(表 2)。当雾滴粒径为 60  $\mu\text{m}$  时,雾滴沿风洞气流方向的最大飘移为 30.25 m,当雾滴粒径为 150  $\mu\text{m}$  时,雾滴沿风洞气流方向的最大飘移为 10.76 m,飘移量减少了将近 1/3,雾滴粒径继续增加,飘移量继续减小,但减少相对缓慢。说明雾滴粒径小于 150  $\mu\text{m}$  的雾滴,在气流作用下沿着下风方向的动能比较大,容易随气流运动产生下风方向的飘移。随着飘移距离的增加,下风方向的气流也在逐渐衰减,雾滴最终会沉降下来。此外,小雾滴质量浓度与飘移距离拟合方程的拟合相关系数  $R$  均接近 1,说明线性回归方程的拟合度较好。

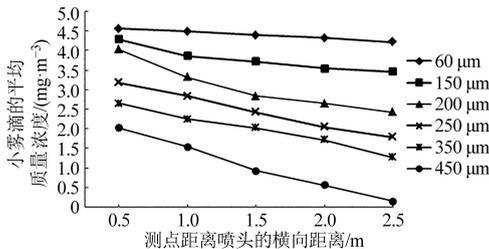


图 5 不同雾滴粒径下的小雾滴平均质量浓度  
Fig. 5 Average small droplet mass concentration under different droplets size

表 2 不同雾滴粒径的飘移距离(气流速度  $v = 1 \text{ m/s}$ )

Tab. 2 Drift distance under different droplets size

雾滴体积中径/ $\mu\text{m}$	拟合表达式	飘移距离/m	拟合相关系数 $R$
60	$y = -0.16x + 4.84$	30.25	0.989
150	$y = -0.24x + 4.52$	18.76	0.982
200	$y = -0.41x + 4.08$	10.00	0.988
250	$y = -0.27x + 3.64$	6.78	0.995
350	$y = -0.65x + 3.26$	4.97	0.986
450	$y = -0.86x + 2.54$	2.94	0.992

注:  $y$  表示小雾滴平均质量浓度;  $x$  表示飘移距离,下同。

### 3.3 气流速度对雾滴飘移的影响

选择 TeeJet VS3 型喷头,压力为 0.15 MPa,此时雾滴粒径  $D_{v50}$  为 150  $\mu\text{m}$ ,在距离喷头不同位置的 5 个测点处测得风洞风速变化时的小雾滴平均质量浓度,如图 6 所示。

由图 6 可知,同一测点处的小雾滴质量浓度随着气流的增加而增加,气流对雾滴飘移有明显影响。

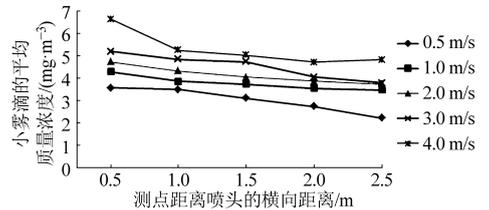


图 6 不同气流速度下的小雾滴平均质量浓度  
Fig. 6 Average small droplet mass concentration under different air velocity

不同气流作用下的小雾滴质量浓度变化曲线比较平缓,说明雾滴在气流作用下沿着下风方向的动能依旧很大,雾滴会向更远的地方运动。对气流速度影响雾滴飘移的数据进行非线性回归分析,得到 150  $\mu\text{m}$  粒径条件下,不同风速时雾滴的飘移规律(表 3)。当气流速度为 4 m/s 时,雾滴的飘移量最大,可到达距离喷头横向 42.56 m 远的地方。小雾滴质量浓度与飘移距离拟合方程的拟合相关系数  $R$  均接近 1,说明线性回归方程的拟合度较好。相比雾滴粒径而言,气流速度的增加可以使雾滴产生更大的飘移距离。因此,气流速度对雾滴飘移距离的影响程度更大。

表 3 不同气流速度的飘移距离(雾滴粒径  $d_p = 150 \mu\text{m}$ )

Tab. 3 Drift distance under different air velocity

气流速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	拟合表达式	飘移距离/m	拟合相关系数 $R$
0.5	$y = -0.67x + 3.88$	5.79	0.946
1.0	$y = -0.24x + 4.52$	18.76	0.984
2.0	$y = -0.34x + 9.36$	27.54	0.987
3.0	$y = -0.24x + 8.38$	35.18	0.990
4.0	$y = -0.22x + 9.54$	42.56	0.980

### 3.4 雾滴粒径与风速对雾滴飘移的综合影响

以上分析表明雾滴粒径和气流速度 2 个因素与雾滴飘移距离之间有明显的关系,为了进一步表征雾滴粒径和风速对飘移性能的交互影响,运用前文试验及拟合计算方法可获得随雾滴粒径、气流速度参数变化的雾滴飘移距离结果,如图 7 所示。

由图 7 可看出,随着气流速度的增大,雾滴沿风洞下风方向的速度增加,雾滴飘移距离均有明显增加。从雾滴粒径 200  $\mu\text{m}$  开始,曲线变得平缓而集中,说明粒径小于 200  $\mu\text{m}$  的雾滴飘移距离增加得更多,因此小于 200  $\mu\text{m}$  的雾滴在侧风作用下易发生飘移,小于 60  $\mu\text{m}$  的雾滴飘移非常严重。对于粒径在 250  $\mu\text{m}$  以上的大雾滴虽然也会沿风洞下风方向发生飘移,但其垂直方向的动能也比较大,因而飘移距离比较短。

### 3.5 飘移预测模型和试验数据的比较

选择气流速度为 0.5、2.0 和 4.0 m/s 3 种气流速度条件,分别进行试验与预测数据的比较。结果

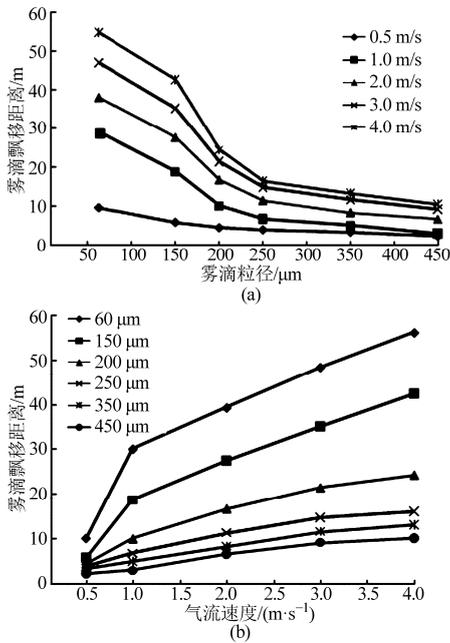


图7 不同粒径和气流速度下雾滴飘移结果  
Fig.7 Droplets drift distance under different droplets size and air velocity

如图8所示,2种方法的模拟结果基本吻合。

此外,运用试验及拟合计算方法获得的雾滴飘移距离数据与运动模型得到的雾滴飘移距离预测值进行拟合分析(图9),发现所得到雾滴飘移距离预测值与试验拟合数据值可以拟合成斜率接近于1、并经过原点的一条直线,拟合相关系数 $R$ 为0.95,无离群值出现,表明运用雾滴的运动模型来分析雾滴的飘移和沉降运动是可行的,该运动模型也可以认为是雾滴粒径和气流速度相对雾滴飘移距离的显性表达式。

应用预测模型中的式(7)对雾滴沿喷射方向(垂直于气流方向)的运动进行计算。结果发现,在喷头下方28 cm处,小于 $60\ \mu\text{m}$ 雾滴的理论计算速度值接近于零,表明雾滴基本失去动能而处于悬浮状态,这些雾滴非常容易在侧向气流的作用下飞向远处,发生飘移。对于 $250\ \mu\text{m}$ 的较大雾滴,运动到喷头下方50 cm处仍然有 $2.34\ \text{m/s}$ 的速度,因此雾滴继续向下运动,即使有侧风作用使雾滴飘移,飘移距离也相比小雾滴要短很多。可见,理论模型分析结果与前文试验分析结果是一致的。

综合以上分析结果可知,要减少航空喷雾作业中的雾滴飘移,首先要选择合适的喷头,根据飞机作业条件确定合理的雾滴粒径;其次,应该选择合适的气候条件进行作业,当侧风气流超过 $4\ \text{m/s}$ 时,尽量不要作业,否则产生的雾滴飘移可以达到50 m甚至更远;再者,可以采用固定翼航空静电喷雾或者旋翼飞机喷雾进行航空施药作业,雾滴荷电以及旋翼向

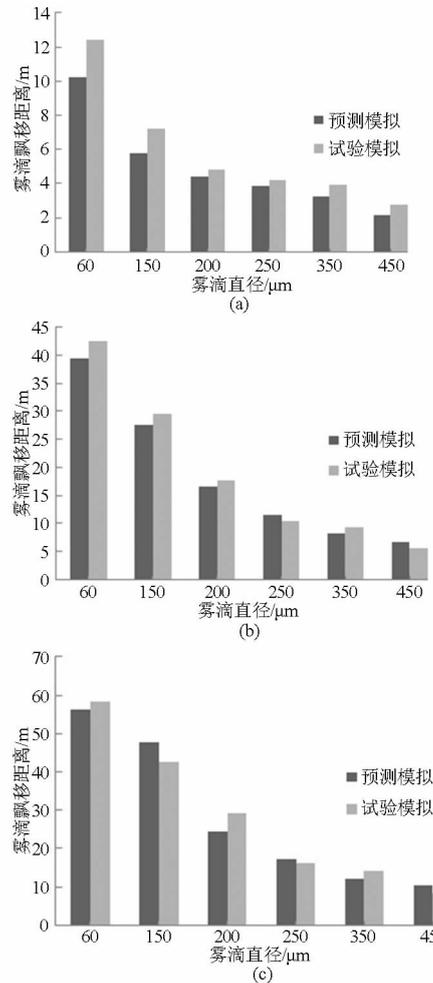


图8 预测模拟和试验模拟的雾滴飘移结果比较  
Fig.8 Compare droplets drift of predict simulation with test simulation

(a) 气流速度 $v = 0.5\ \text{m/s}$  (b) 气流速度 $v = 2.0\ \text{m/s}$   
(c) 气流速度 $v = 4.0\ \text{m/s}$

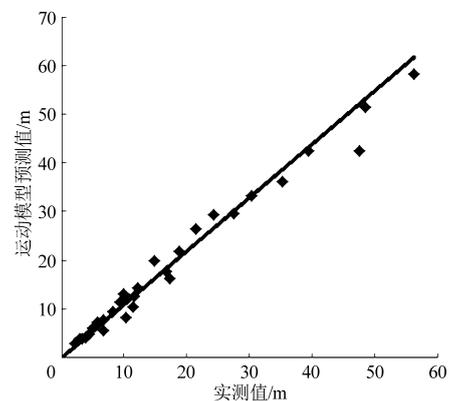


图9 雾滴飘移距离预测模拟和实测结果的拟合  
Fig.9 Fitting of predict simulation result with actual test result for droplets drift distance

下的气流都可以促使雾滴做定向运动,减少飘失。

## 4 结论

(1) 根据雾滴在风洞中的受力分析,在三维坐标系中建立了雾滴的运动方程,并获得了雾滴在侧

风作用下的飘移预测模型。

(2) 利用雾滴质量浓度测试方法进行了不同气流条件和喷雾条件下的雾滴飘移规律的试验研究, 并通过线性回归模拟法计算获得雾滴在风洞试验条件下的实际飘移距离。

(3) 分析比较了试验计算的雾滴飘移距离与运动模型得到的雾滴飘移距离预测值, 与雾滴飘移随雾

滴粒径和气流大小变化规律的结果比较吻合, 雾滴运动模型作为雾滴飘移行为的显性表达式是可行的。

(4) 随着气流增大, 雾滴飘移距离明显增加, 小于  $200\ \mu\text{m}$  的雾滴在侧风作用下更容易发生飘移; 对于粒径在  $250\ \mu\text{m}$  以上的大雾滴虽然也会沿风洞下风方向发生飘移, 但其垂直方向的动能也比较大, 因而飘移距离比较短。

#### 参 考 文 献

- Murphy S D, Miller P C H, Parkin C S. The effect of boom section and nozzle configuration on the risk of spray drift[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 75(4): 127 - 137.
- 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 194 - 201.  
Xue Xinyu, Lan Yubin. Agricultural aviation applications in USA [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 194 - 201. (in Chinese)
- 刘秀娟, 周宏平, 郑加强. 农药雾滴飘移控制技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(1): 186 - 190.  
Liu Xiujuan, Zhou Hongping, Zheng Jiaqiang. Research advances of the technologies for spray drift control of pesticide applications[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(1): 186 - 190. (in Chinese)
- 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 Chemistry*, 1993, 12(3): 453 - 464.
- Teske M E, Thistle H W. Aerial application model extension into the far field[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 89(1): 29 - 36.
- Fritz B K, Hoffmann W C, Lan Y. Evaluation of the EPA drift reduction technology (DRT) low-speed wind tunnel protocol[J]. *Journal of ASTM International*, 2009, 6(4): 183 - 191.
- Thomson S J, Smith L A, Hanks J E. Evaluation of application accuracy and performance of a hydraulically operated variable-rate aerial application system[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(3): 715 - 722.
- 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.
- 傅泽田, 祁力钧. 风洞实验室喷雾飘移试验[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(1): 109 - 112.  
Fu Zetian, Qi Lijun. Spray drift test in wind tunnel laboratory[J]. *Transactions of the CSAE*, 1999, 15(1): 109 - 112. (in Chinese)
- 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)
- 祁力钧, 胡锦荣, 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)
- 吴罗罗, 李秉礼, 何雄奎, 等. 雾滴飘移试验与几种喷头抗飘失能力的比较[J]. *农业机械学报*, 1996, 27(10): 120 - 124.  
Wu Luoluo, Li Bingli, He Xiongkui, et al. The nature of the drift loss and the anti-drifting ability of different nozzles [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1996, 27(10): 120 - 124. (in Chinese)
- 曾爱军, 何雄奎, 陈青云, 等. 典型液力喷头在风洞环境中的飘移特性试验与评价[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 78 - 81.
- 宋强, 邓忠民. 航空喷雾飘移控制仿真器的设计[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(1): 264 - 266.  
Song Qiang, Deng Zhongmin. Design of aerial spray drift control simulator[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(1): 264 - 266. (in Chinese)
- Miller P C, Butler Ellis M C, Tuck C R. Entrained air and drop let velocities produced by agricultural flat-fan nozzles[J]. *Automization and Sprays*, 1996, 42(6): 693 - 707.
- Baetens K, Nuytens 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.
- 宋吉林, 祁力钧, 孙小华, 等. 喷雾机雾滴大小和飞行时间的研究[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(4): 54 - 57.  
Song Jilin, Qi Lijun, Sun Xiaohua, et al. Study on flying time and distributing characteristic of droplet from sprayer [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(4): 54 - 57. (in Chinese)
- 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)
- Hoffmann W C, Fritz B K, Lan Y. Evaluation of a proposed drift reduction technology high-speed wind tunnel testing protocol[J]. *Journal of ASTM International*, 2009, 6(4): 212 - 223.

## Spray Drift Model of Droplets and Analysis of Influencing Factors Based on Wind Tunnel

Ru Yu<sup>1</sup> Zhu Chuanyin<sup>2</sup> Bao Rui<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. Second Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Aerial spraying may easily lead to loss of droplets with the wind from crosswinds and influence of spray effect. This article analyzes related factors which influence spray drift behavior, and sets up the motion equations of the droplet in three-dimensional coordinate system. A prediction model of droplet drift under crosswind condition is received so that the droplet drift distance can be predicted by calculating. Spray drift experiments are done under different flow and spray conditions by using wind tunnel with the droplet concentration testing method. Actual droplet drift distance in the wind tunnel conditions are obtained through simulation of the linear regression method. Experimental results show that as the air velocity increases, spray drift distance increases significantly, and droplets with diameters less than 200  $\mu\text{m}$  under crosswind are more prone to drift. For the large droplets with diameters bigger than 250  $\mu\text{m}$ , although the drift along downwind direction of the wind tunnel still happen, the drift distance is shorter since the kinetic energy of the vertical direction is relatively larger. Through analyzing and comparing droplet drift distance from prediction model with the results of calculating and estimates, it is observed that the results meet the requirements. It is concluded that the motion model of droplet as the dominant expression of spray drift behavior is feasible.

**Key words:** Wind tunnel Droplet drift Prediction model Aerial spray

(上接第 77 页)

- 14 Yan Chuliang, Liu Kege. Theory of active reliability-based design for predetermined life of structures[J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 44-46:745-750.
- 15 刘克格, 阎楚良, 张书明. 模糊数学在疲劳寿命估算中的应用[J]. *航空学报*, 2006, 27(2):227-231.  
Liu Kege, Yan Chuliang, Zhang Shuming. Fatigue life estimation for using fuzzy mathematics [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(2):227-231. (in Chinese)
- 16 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.

## Reliability Experiment on High Clearance Boom Sprayer Chassis

Yang Fangfei Han Xiaojin Duan Yaoqi Tian Yongwei Yan Chuliang

(Beijing Aircraft Strength Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The reliability of high clearance boom sprayer chassis was studied by simulation and experiment. The stress distribution and the weak positions of the chassis were simulated by software ANSYS. According to the finite element results, the relation equations between the load of testing points and weak positions were obtained. The load spectrum measurement experiments of spray machine chassis were carried out under typical using conditions. In data statistics processing, the rain-flow method was adopted. By means of the Miner's rule, the cumulative damages of weak positions of the chassis under various typical conditions were calculated. According to the actual use of the spray machine, the real life of the chassis was calculated by a weighted average of the damage under various typical conditions. The research method and the analysis results can provide guidance for reliability design of agricultural machinery.

**Key words:** Boom sprayer chassis Finite element Load spectrum Reliability Damage