

标准扇形雾喷头雾化过程测试分析

吕晓兰¹, 何雄奎^{1*}, 宋坚利¹, 曾爱军¹, Andreas. Herbst²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100094; 2. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, Messeweg 11/12 D-38104 Braunschweig, Germany)

摘要: 为了描述雾滴颗粒特性与飘失之间的关系, 用激光衍射粒度仪(PDPA)对植保机械标准扇形雾喷头的雾化场进行了研究, 主要描绘了雾化场雾滴特征参数, 并对雾滴尺寸空间分布和雾滴的运动进行分析, 确定了飘失区域在雾化场中的位置, 为进一步分析雾滴的沉降及漂移特性提供了理论支持。结果表明: 在逐渐远离喷头的截面上, 雾滴直径分布呈中间小边缘大的凹形椭球面, 而轴向速度则是呈中间大边缘小的山丘形分布。雾锥体外层空间区域雾滴密度小, 小雾滴能量小且易蒸发, 易受周围环境影响发生飘失, 是雾滴易飘失区域。

关键词: 雾滴尺寸; 雾滴速度; 空间分布; 飘失

中图分类号: S491+.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)9-0095-06

吕晓兰, 何雄奎, 宋坚利, 等. 标准扇形雾喷头雾化过程测试分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 95- 100.

Lü Xiaolan, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Analysis of spray process produced by agriculture flat-fan nozzles[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 95- 100. (in Chinese with English abstract)

0 引言

喷头是植保机械重要的部件, 其雾化性能直接影响农药的施用与飘失。虽然影响飘失的因素很多, 但无论是粒子飘失(*particle drift*)和蒸发飘失(*vapor drift*), 雾滴颗粒都是引起飘失的最主要因素^[1]。同时随着人们对雾滴飘失所产生问题的极大关注和对雾滴尺寸影响农药性能发挥的深入认识, 雾滴的研究与喷头的选择正日益被重视^[2, 3]。早在 1996 年 Miller. P. H 就研究得出扇形喷头的速度模型, Sidahmed 也在同年得出压力喷头形成雾滴的大小及速度的理论方程^[4], ASAE 喷头选配系统的研究, S572 标准的制定, 喷头型号选用检索表, 以及喷头选择软件系统的研制成功, 无一不是在充分研究雾滴及雾化特性的基础上, 根据不同型号喷头的抗飘性能参数对喷头分类, 用于农业生产实践中^[5- 8]。而国内在此领域的研究起步较晚, 主要集中在喷头流量分布、雾滴谱及雾滴速度等方面的研究^[9- 11]。目前还不曾见雾化场空间测量及描述的相关报道, 因此, 对农用标准扇形雾喷头雾化特性进行深入研究, 可为植保机械控制飘失的改进及配合参数的选择提供可靠的依

据^[12]。

喷头雾化是一个多相、瞬态的复杂过程, 先要消耗较大部分的雾化能量将液体在喷口处破裂成薄膜或液丝, 然后产生一个较大的速度梯度, 通过与空气高速摩擦, 将薄膜或液丝伸展至破裂点, 最后形成雾滴^[13]。雾滴具有尺寸小、范围大、数量多等特点, 随时间和空间而变化, 当前还没有有效的方法对雾滴的运动进行分析^[14]。本文采用激光衍射粒度仪(PDPA, Phase Doppler Particle Analyzer)对标准扇形雾喷头雾化场中的粒度和速度空间分布进行了测量, 数学软件 MATLAB 对获得的数据进行处理, 得到雾化场内雾滴特性的直观形象的空间分布信息, 并进一步分析其特性对飘失的影响。

1 材料与方法

试验在德国农林生物研究中心(BBA)施药技术研究部测试中心进行, 使用激光衍射粒度仪 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) 进行测定, 测试喷头为德国 Lechler 公司生产的标准扇形雾喷头 LU 120 系列的 03 型号喷头, 随机选定 10 个该型号喷头, 分别重复 3 次测流量, 并计算每个喷头流量平均值及总体平均值, 选取单体均值最接近总体均值的 3 个喷头为测试喷头。喷雾压力分别为 0. 2、0. 3、0. 4 MPa。试验介质为常温清水。

1.1 PDPA 测试基本原理

采用激光衍射粒度仪(PDPA)来分析雾滴特性。该仪器是美国 Aerometrics 公司生产的二维相位多普勒粒子分析仪, 配备 300 mW 氩离子风冷激光器(Argon-

收稿日期: 2006-11-15 修订日期: 2007-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(30671388)

作者简介: 吕晓兰(1980-), 山东潍坊人, 博士生。北京市圆明园西路 2 号 中国农业大学农业工程教研室, 100094

*通讯作者: 何雄奎, 教授, 博士生导师, 从事植保机械的教学与研究。北京市圆明园西路 2 号 中国农业大学农业工程教研室, 100094。Email: xiongkui@cau.edu.cn

Ion Laser)、FBD240-R 激光耦合器(Fiber Driver)、RSA3100-L 信号处理器(Real-Time Signal Analyzer)、VIEW 1.1 数据处理系统以及 XRV 204-4.2 激光发射(Transmitter)和 RCV 208 接收器(Receiver)等。它基于激光相位多普勒原理,不需要粒径和粒子速度大小的标定^[15],粒径测量精度可达 0.5%,速度测量精度 0.2%。测试体由两束或两束以上的激光光束的交叉点决定,其大小为 3 mm×3 mm 的区域。当有粒子通过测试体的时候,仪器随后对这些粒子进行统计分析。光源的光束被运动的粒子所散射时,散射光的光频将不同于静止光源的光频,如果它们同时被感受器接收,将产生一个频率差值,利用这种多普勒效应可以测出粒子速度^[16]。

1.2 试验设计

1) 测量点的设置

空间坐标系的建立如图 1a 所示,水平向前为 x 轴正方向,水平向左为 y 轴正方向,垂直向下则为 z 轴正

方向。设置 5 个水平测量截面,自喷头垂直向下即沿 z 轴方向每隔 100 mm 设置一个测量水平面,如图 1c 所示。在每个水平面内,根据椭圆面的大小确定 X 方向的偏移量,本着对称平分的原则,确定 5 条测量线,如图 1a 所示。将扇形雾化垂直中心面(120°扇面)进行 16 份等角度平分,17 条等角度线与 5 水平线相交点坐标通过正切公式求出,即求出每一水平上每个测量点的 y 坐标,如图 1b 所示。求出每两点间距离,即位移偏移量,便于测量过程中喷头的精确移动。每一水平截面 x 偏移量、 y 、 z 坐标见表 1。

由于喷出的雾锥在重力和能量衰减的作用下,不能呈现标准的椭圆锥体分布,随着 z 值增加,呈现向垂直中心轴靠拢的趋势,因此在实际测量过程中,很难测到理论边界点,为得到详实的试验数据,可在相距较远的两点间适当插入测量点,使得两两测量点间大体等距离为宜。

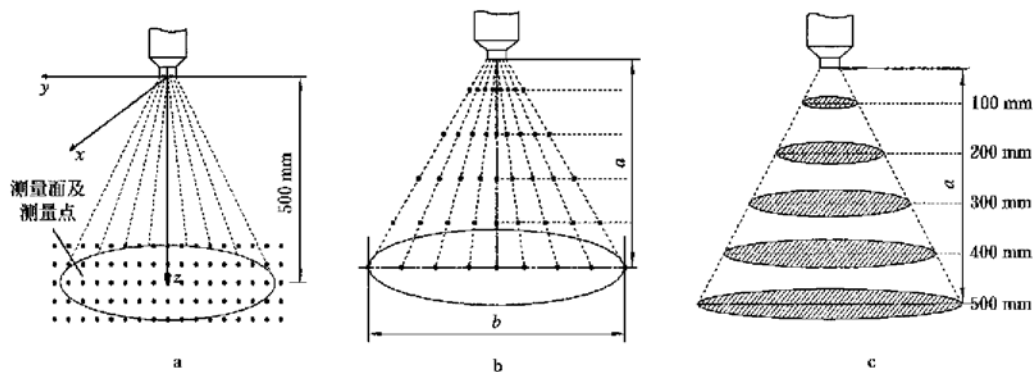


图 1 测量点分布

Fig. 1 Distribution of the test points

表 1 测量点坐标

Table 1 Coordinates of the test points

z 坐标	y 坐标									x 偏移量	
										1 倍	2 倍
100	0	±13	±27	±41	±58	±77	±100	±130	±173	±10	±20
200	0	±26	±54	±83	±116	±154	±200	±261	±346	±15	±30
300	0	±40	±80	±124	±173	±230	±300	±391	±450	±20	±40
400	0	±53	±107	±166	±231	±307	±400	±521	±693	±30	±60
500	0	±66	±134	±207	±289	±384	±500	±652	±866	±40	±80

2) 测量

喷头垂直向下喷射,这样便于测量,BBA 中心设计的装有位移传感器的三维坐标架能根据程序指令自动控制喷头的前后左右移动,操作人员只需对软件进行操作,输入位置偏移量,喷头会自动运行到指定位置而静止,这样没有人为因素的干扰,保证了对喷雾的精确定位与测量。动态取样,同时计算机系统记录并显示出雾

滴测试数据及分布曲线,取样数据自动整理保存到指定文件夹中。运用数学软件 MATLAB 将测得的雾滴数据进行处理分析,获得雾滴特性的空间分布信息。

PDPA 测量所得为统计值,所以设计试验时,每次采样过程中,在接近边界测量点至少测量 3000 个雾滴,接近中心位置的测量点至少测量 5000 个雾滴,大多数样本均能在 3min 内采到规定数量的雾滴。

2 结果与讨论

2.1 雾滴 MVD 在 500 mm 截面的分布

图 2a 为 0.3 MPa 压力下,距出口 500 mm 截面上的 MVD(体积直径, Median Volume Diameter) 中值,图 2b 为 500 mm 截面上沿 y 方向不同测量线上雾滴 MVD 的分布。可以看出,从中心向边缘,雾滴 MVD 以 2 次幂的趋势增大,其 R^2 可达 0.9937。在中心处约

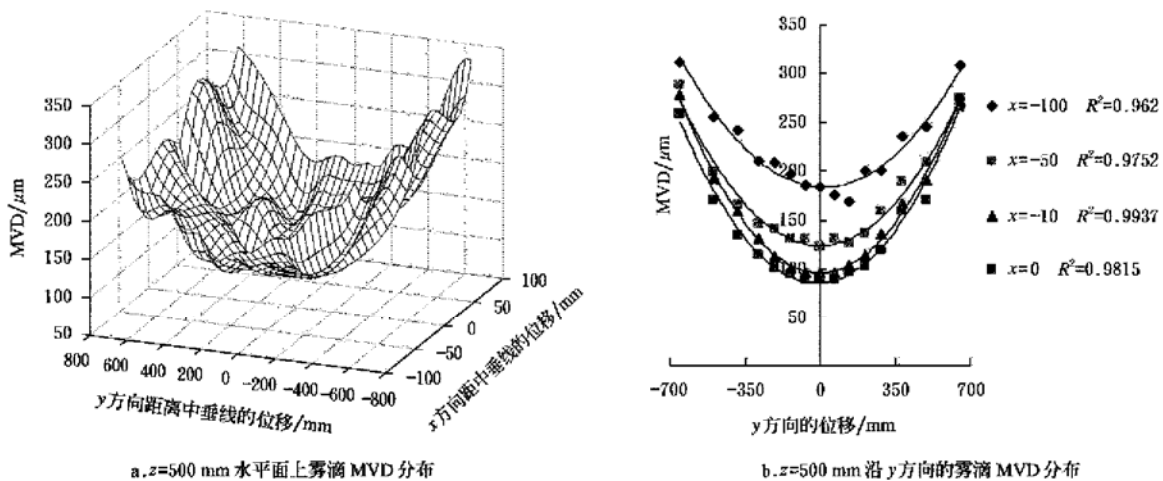


图 2 LU 120 03 0.3 MPa 雾滴体积中径在 $z = 500$ mm 水平面上的分布

Fig. 2 MVD distribution at 500 mm below the LU 120 03 nozzle with 0.3 MPa spray pressure

2.2 雾滴 MVD 在 5 个水平截面的空间分布

图 3a 是雾滴 MVD 在 5 个水平面上的空间分布,由等距离 5 截面的 MVD 分布曲面叠加得到。由于不同截面雾滴 MVD 的不同,叠加后的曲面间距发生变化,300 mm 截面和 400 mm 截面距离很小,这说明 400 mm 截面上的雾滴要大于 300 mm 截面上的雾滴。400 mm 截面与 500 mm 截面间距很大,说明两截面之间的区域是雾滴又明显减小的区域。在 100 mm 截面上,由于此处的雾滴刚离开喷头,具有很大的能量,在气流的作用下表现出不规则的波动变化, MVD 的分布没有呈现规律性,随后雾滴在每一截面的分布呈现较规则的凹形椭圆面。图 3b 是每一截面上雾滴 MVD 沿 y 方向中心线距离变化的曲线,发现雾滴直径有一个先减小后增大再减小的过程,喷雾锥体中心区域最为明显, MVD 在 200 mm 和 300 mm 截面处达到最小,与图 3a 空间分布显示一致,分析其原因为:液体的雾化过程主要依靠气流对液体的挤压和撕裂作用,在雾滴离开喷头出口以后,雾滴的速度依然很大,与不断卷吸进来的空气继续发生剪切摩擦作用,进一步雾化产生更小的雾滴。随着雾滴速度的不断降低,以及雾化椭圆锥体内部紊流作用的影响,雾滴发生非弹性碰撞的机会大大增加,造成了一部

MVD 为 $91.2 \mu\text{m}$,在边缘处约 MVD 为 $323.7 \mu\text{m}$,增大幅度约 255%。这是因为喷雾此时已完全散开,液体射流对空气的卷吸作用使空气充分被卷吸进入喷雾内部,细小雾滴因为跟随性好,易于跟随气流集中到喷雾中心部分,所以越靠近喷雾中心,雾滴 MVD 越小。大雾滴具有较大的动量和较强的贯穿能力,使之能够比小雾滴扩散的更快,飞行的距离更远。

分较大雾滴的产生。最后雾锥体不断扩展,卷吸进的空气越来越多,雾滴的分布密度减小,由于雾滴表面蒸发,尺寸开始慢慢减小。

2.3 $150 \mu\text{m}$ 雾滴轴向速度分布

雾滴越小,顺风飘移就越远,飘失的危险性越大^[17]。小雾滴由于质量轻,在空气阻力下,下降速度不断降低,常常没有足够的向下动量到达靶标,更易受温度和相对湿度的影响,蒸发后更小,可随风飘移很远。由于蒸发,在 25°C 、相对湿度 30% 的状况下, $100 \mu\text{m}$ 的雾滴移动 75 cm 后,直径会减小一半^[18]。显然,同样的气候条件,小于 $100 \mu\text{m}$ 的雾滴未到达靶标前,就已挥发变成烟雾悬浮在大气中,最终落在非靶标区。大于 $200 \mu\text{m}$ 的雾滴相对表面积较大,不易挥发,下降速度快,抗飘失性要好于小雾滴^[19]。因此,着重对小雾滴进行分析,以期充分揭示飘失的内在机理。

图 4a 表示 0.3 MPa 压力下中垂线上不同尺寸雾滴的轴向速度。自喷嘴至 200 mm 的过程中,直径在 $150 \mu\text{m}$ 以下的雾滴速度衰减很快,最大衰减率可达 57%,之后衰减速度趋于平缓;而 $150 \mu\text{m}$ 以上的雾滴其速度衰减一直处于平缓状态。这是因为在喷雾椭圆锥体的中心部分,直径小的雾滴质量相对较轻,容易受到

空气湍流的影响。小于 150 μm 的雾滴均容易飘移至非施药目标, 因此对 150 μm 的雾滴进行了速度分析。

图 4b 表示在 0.3 MPa 压力下, 150 μm 的雾滴在 500 mm 截面上轴向速度分布。从中心位置到边缘, 垂直向下的速度呈降幂下降趋势。在中心处约为 5.9 m/s, 在边缘处约为 0, 急剧衰减了 100%。这是因为喷出的连续水流与外界空气相互作用形成不连续的浓密雾团, 使垂直向下的速度不断减小, 喷雾场向外扩张的区域越大, 卷吸的空气越多, 垂直速度衰减的也越快, 直到与外界空气动力之间保持着一个动态的平衡关系, 不再有扩张能力时, 也就达到喷雾锥的边缘。

2.4 500 mm 截面处不同压力下 150 μm 雾滴速度分布

图 5 显示了 500 mm 截面 150 μm 雾滴在不同压力下轴向和径向速度的变化。0~ 200 mm 区域, 雾滴轴向速度处于稳定状态, 压力变化对轴线速度大小影响不

大, 随着压力的增大, 该稳定区域略有增加; 200~ 400 mm 区域呈直线下下降趋势, 随着压力的增大, 速度增大, 在 0.4 MPa 压力下尤为明显; 400~ 500 mm 区域又处于一个小的平台期, 之后慢慢减小, 压力的增大, 延缓了该区域的轴向速度衰减。径向速度则是经历一个直线增大, 缓慢减小, 趋于平稳, 逐渐减小的过程。增大压力, 使得径向速度的整个变化区域增大, 0.4 MPa 压力下的变化最为明显。这是因为喷雾压力越大, 喷雾圆锥体内部湍流强度越大, 产生的雾滴越小。小雾滴容易受到气流影响, 轴向速度增大的同时也增强了径向扩散能力。当雾锥体外层区域的小雾滴径向速度和轴向速度几乎趋于平衡时, 雾滴在此时处于动态平衡状态, 易受周围环境影响, 容易发生飘失。因此增大喷雾压力使得小雾滴径向速度增加较轴向速度明显, 径向扩散能力明显增强, 易飘失。

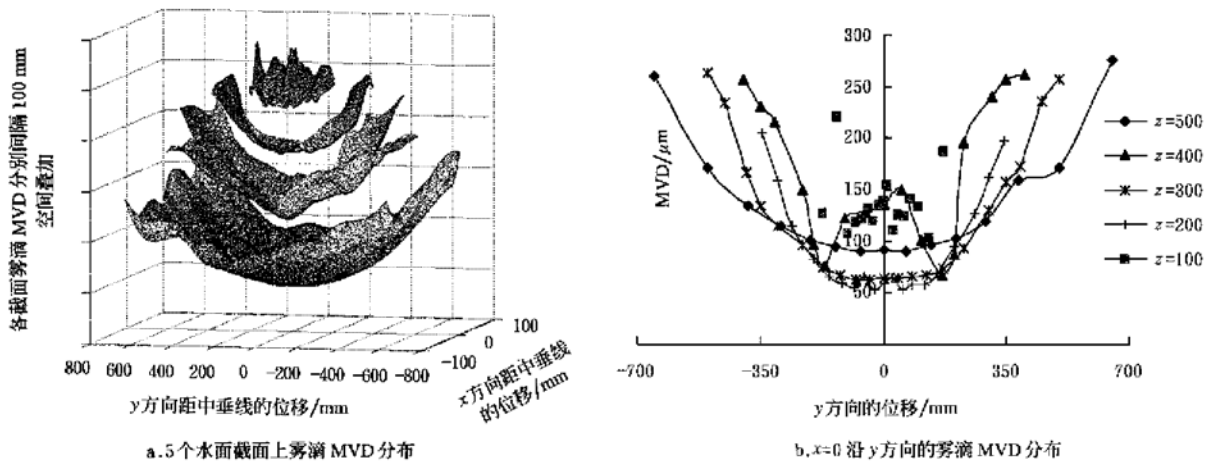


图 3 雾滴 MVD 在空间圆锥体内的分布
Fig. 3 MVD spatial distribution in the spray

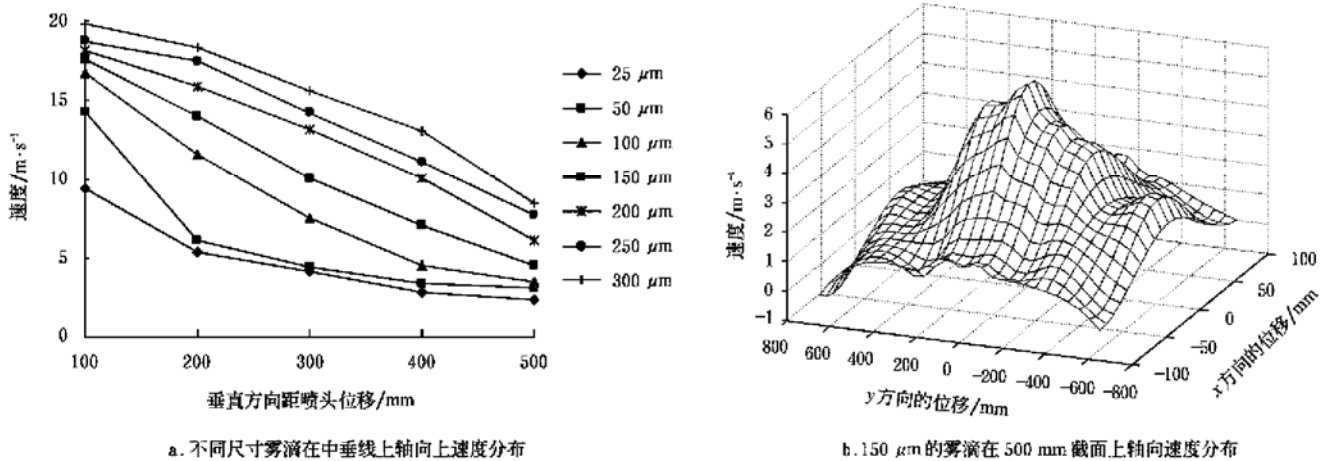


图 4 雾滴轴向速度分布
Fig. 4 Distribution of vertical velocity of droplet

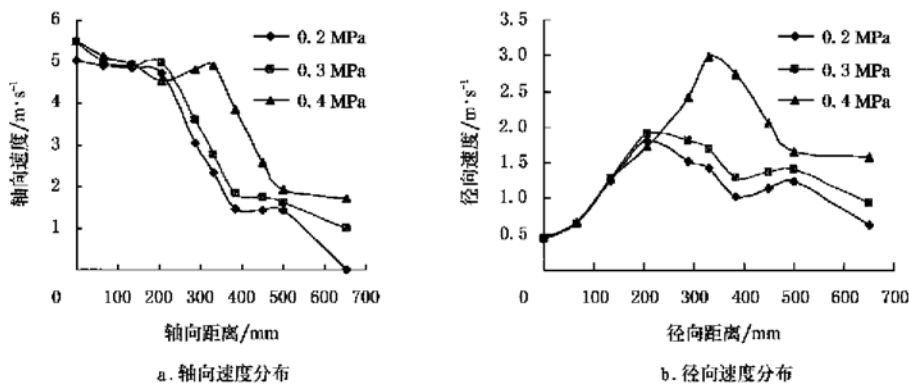


图5 500 mm 截面处不同压力下 150 μm 雾滴速度分布

Fig. 5 Velocity distribution at 500 mm below the nozzle with different spray pressures

3 结 论

1) 在远离喷头的每个截面上雾滴尺寸分布是中心小边缘大,且随着喷雾能量的稳定,在每一截面上雾滴尺寸沿轴向逐步呈现较规则的凹形椭球面分布。

2) 150 μm 雾滴速度在 500 mm 截面处分布是中心大边缘小,呈山丘形空间分布。其轴向速度在中心处约为 5.9 m/s,至边缘处约为 0,急剧衰减了 100%,因为小雾滴易受到空气湍流的影响,发生飘移。

3) 喷雾压力越大,产生的雾滴越小,径向速度增加较轴向速度明显,增强了小雾滴径向扩散能力,同时受到湍流的影响,易飘失。

4) 雾锥体外层空间区域是雾滴易飘失区域。该区域的小雾滴易蒸发,且径向速度和轴向速度几乎趋于平衡,此时雾滴处于动态平衡状态,易受周围环境影响,容易发生飘失。

[参 考 文 献]

- [1] Wixted D, Boerboom C. Managing pesticide drift in Wisconsin [M]. Field Sprayers. Extension Document, 1999.
- [2] Robert N Klein, Jeffrey A Golus. The effect of spray particle size and distribution on drift and efficacy of herbicides [J]. Aspects of Applied Biology 71, International advances in pesticide application, 2004, 71: 44- 51.
- [3] Miller P C H, Butler Ellis M C, Gilber A J. Extended the international (BCPC) spray classification [J]. Aspects of Applied Biology 66, International advances in pesticide application, 2002, 66: 17- 24.
- [4] Miller P C H, Butler Ellis M C, Tuck C R. Entrained air and droplet velocities produced by agricultural flat fan nozzle [J]. Atomization and Sprays, 1996, 6: 693- 707.
- [5] ASAE 1999. Spray nozzle classification by droplet spectra [M]. American Society of Agricultural Engineers, ASAE S572 AUG99, St. Joseph, 1999.
- [6] Womac A R, Maynard II R A, Kirk I W. Measurement variations in reference sprays for nozzle classification [J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(3): 609- 616.
- [7] HGCA. Nozzle selection chart [M]. HGCA, Caledonia House, 223 Pentonville Road, London N19HJ. 2002.
- [8] Milne A E, Finnan A P, Miller P C H. A spray nozzle selection support system for herbicide applications [J]. Aspects of Applied Biology 71, International advances in pesticide application, 2004, 71: 201- 207.
- [9] 万培芬, 卢宁馨. 扇形喷头的试验研究 [J]. 农机情报资料, 1981(5): 19- 26.
- [10] 马承伟, 严荷荣, 袁冬顺, 等. 液力式雾化喷头雾滴直径的分布规律 [J]. 农业机械学报, 1999, (30) 1: 33- 39.
- [11] 邱白晶, 史春建, 吴春笃, 等. 植保机械雾化场雾滴特征分析与二维重建 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 7- 10.
- [12] Ronbert N Klein, Jeffrey A Golus. The effect of spray particle size and distribution on drift and efficiency of herbicides [J]. Aspects of Applied Biology 71, International advances in pesticide application, 2004, 71: 169- 174.
- [13] Chapple A C, Hall F R. A description of the droplet spectra produced by a flat-fan nozzle [J]. Trans of the ASAE, 1993, 37: 51- 58.
- [14] Sidahmed M M. A theory for predicting the size and velocity of droplets from pressure nozzles [J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(2): 385- 496.
- [15] Parkin C S. Methods for measuring spray droplet sizes [J]. In Application Technology for Crop Protection, 1993, 23: 57- 84.
- [16] Nilars M S, Spragge P, Tuck C. In-flight measurements of droplet sizes from agricultural nozzles, a comparison of two commonly used laser system [J]. Eight International Conference on Liquid Atomization and Spray System, Pasadena, CA, USA. 2000, 23: 163- 167.

- [17] Smith D B, Bode L E, Gerard P D. Predicting ground boom spray drift[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(3): 547- 553.
- [18] Ross, Merrill A, Carole A, et al. Applied Weed Science [M]. Burgess Publishing Company, Minneapolis, MN. 1985.
- [19] Bouse L F, Kirk I W, Bode L E. Effect of spray mixture on droplet size[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3): 783- 788.

Analysis of spray process produced by agriculture flat-fan nozzles

Lü Xiaolan¹, He Xiongkui^{1*}, Song Jianli¹, Zeng Aijun¹, Andreas. Herbst²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, Messeweg 11/12 D-38104 Braunschweig, Germany)

Abstract: In order to study the relationship between the droplet and drift, the characteristics and performance of sprays produced by agriculture flat-fan nozzles were measured with Phase Doppler Particle Analyzer(PDPA). Additionally the spatial distribution of droplet size and velocity were investigated, and the highly driftable area was ascertained. The results provide a reliable basis for the analysis of droplet deposition and drift. It is found that on sections below the nozzle, the droplet size distribution is like the inner surface of a rugby. The Median Volume Diameter(MVD) is the smallest at the centerline and increases with the distance from the centerline. But the distribution of vertical velocity is like a small hill, and declines toward the edge of the spray. The outer spatial region of the spray where the droplet density is low, and small droplets with little energy are easy to be vaporized because of the environmental factors, is the highly driftable region.

Key words: droplet size; droplet velocity; spatial distribution; drift