

## 中华人民共和国民用航空行业标准

MH/T 1051—2012

---

### 喷雾飘移的风洞实验室测量方法

Methods for the measurement of spray drift in wind tunnel laboratory

2012-10-10 发布

2012-12-20 实施

---

中国民用航空局 发布

## 前 言

本标准在技术内容上与ISO 22856: 2008《植物保护机械 喷雾飘移的实验室测量方法 风洞》一致。

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中国民用航空局运输司提出。

本标准由中国民用航空局航空器适航审定司批准立项。

本标准由中国民航科学技术研究院归口。

本标准起草单位：中国民用航空局第二研究所。

本标准主要起草人：朱小波、靳军号、王秉玺、李欣、俞瑾、陈福良、杨道训。

**MH**

# 喷雾飘移的风洞实验室测量方法

## 1 范围

本标准规定了在实验室控制条件下的风洞中测量喷雾飘移程度的测量方法。  
本标准适用于喷雾发生器（如喷嘴）或喷液的相对喷雾飘移程度的比较评价或分级。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 20183.1 植物保护机械 喷雾设备 第1部分：喷雾机喷头试验方法

ISO 25358 植物保护机械 雾化器的雾滴谱宽度 测量和分级 (Crop protection equipment—Droplet-size spectra from atomizers—Measurement and classification)

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 喷雾飘移 **spray drift**

喷雾过程中由气流作用将喷液带出靶标区的现象。

### 3.2

#### 喷雾飘移程度 **spray drift potential**

空中喷雾随风飘失的量与喷雾发生器喷雾输出总量之比。

注：喷雾飘移程度用百分比表示。

### 3.3

#### 边界层 **boundary layer**

紧靠风洞平台，其局部水平气流的平均速度低于额定气流速度95%的气流层。

### 3.4

#### 额定气流速度 **nominal air speed**

$v$

边界层外部风洞水平气流（气流主方向上）的平均速度。

注1：额定气流速度的单位为米每秒（m/s）。

注2：见A.3。

3.5

紊流度 **degree of turbulence**

*T*

水平气流速度相对于额定气流速度的变化程度。

注1: 紊流度用百分比表示。

注2: 见 A.4。

3.6

气流速度的局部变化率 **local variability of air velocity**

*S*

水平气流速度（气流主方向上）相对于额定气流速度的局部变化程度。

注1: 气流速度的局部变化率用百分比表示。

注2: 见 A.5。

3.7

喷雾区 **sprayed area**

喷雾处理的目标区域。

3.8

有效风洞层 **virtual wind tunnel floor**

位于或高于边界层边缘，与风洞平台平行的平面。

3.9

采样线 **sampling line**

用于收集雾滴的一种线型采样器。

4 总则

4.1 风洞中喷雾飘移程度的测量通常采用现有或模拟的植物保护制剂作为喷施物。

4.2 喷雾雾流由设置在风洞中的喷雾发生器产生。喷雾发生器可以是固定或移动的，通常应调整其位置使其喷雾与气流方向垂直。

4.3 用于测量的风洞应具有产生和维持低紊流度的额定气流速度的能力，有足够的尺寸以便于使用喷雾发生器，以防气流因靠近内壁或喷雾发生器（或其悬挂装置）而扰动，有足够的高度和下风距离，以便设置足够的采样器评定喷雾飘移程度（见附录 A）。

4.4 通过采集由气流带到规定下风区域的雾滴测定喷雾飘移程度。喷液中通常应加入示踪物质，并由惰性材料制成的采样器（通常是标准线型采样器）进行采集。

4.5 当测量结果用于对喷雾发生器的相对喷雾飘移程度进行分级时，应提供所使用采样器相对于标准采样器的比较结果（见附录 B）。

4.6 采用相关计算方法或公式将风洞测量数据转变为近似于田间使用喷雾发生器所产生的喷雾飘移数据，并用于计算喷雾飘移程度。该结果应仅用于与参比喷雾发生器比较时对相对喷雾飘移程度进行分级，并且仅由单一静态悬挂式喷雾发生器产生的结果应用于该分级。多喷嘴喷雾飘移程度的计算结果能反映一个典型的喷雾机田间喷雾应用情况，可用于确定与敏感区域（如河道）的安全喷施距离。

## 5 测量方法

### 5.1 风洞设计和布局

5.1.1 风洞应足够大以产生和维持额定气流速度，以便在匀速气流环境中进行测量，其气流速度的局部变化率应不大于 5%，同时整个风洞的紊流度应不大于 8%（见附录 A）。

5.1.2 用于相对喷雾飘移程度分级测量的气流速度通常为 2 m/s。应根据测量要求对风洞进行设计和布局，风洞高度应不低于 1 m，宽度应不小于 2 m，并能产生不小于 2 m/s 的额定气流速度。常用风洞布局参见附录 C。

5.1.3 风洞工作区的长度应比喷雾发生器与采样器的间距至少大 2 m（两端至少各 1 m）（参见附录 C）。

5.1.4 风洞平台的设计应最大限度地减少喷液飞溅或雾滴弹跳，例如，可采用人工草皮或方格。

5.1.5 悬挂的喷雾发生器、控制和供给线路应合理布置以最大限度降低其对气流的扰动。

### 5.2 测量设备的准备

5.2.1 为了测量喷雾发生器下风方向的雾滴分布情况，应将喷雾发生器悬挂于风洞中心，其高度应根据制造商推荐确定，并高于有效风洞层（见 A.6）。

注：为了适应一些喷雾发生器的设计、布置和使用，需要对一些测量技术进行改进。例如，有时需要试验喷雾发生器（如短式喷杆的一部分）的布置方式。需考虑测量技术的任何改进对气流速度和喷雾发生器附近紊流的影响，以及在下风方向对能影响采样技术的空中雾滴的运动和分布的扰动。

5.2.2 提供给喷雾发生器的喷液应能通过电磁阀或类似的控制设备进行快速启动和关闭。最小喷雾时间应为 5 s，但为了避免采样器处于饱和状态，尤其是考虑到采样线的液体容量（见附录 B），在测量前应确定适宜的喷雾时间。应通过预先设定的程序对供电系统和湿度调节装置进行调试。

### 5.3 采样技术

5.3.1 采样器应布置于规定的下风采样区，并确保采集到全部雾流的完整样本。由于飘移的雾滴主要是小雾滴，因此所有采样器都应具有较高的采样效率（见附录 B）。空中雾滴应由布置于风洞横断面水平和垂直方向的采样器进行采集。

5.3.2 通常采用直径为 1.98 mm 的聚乙烯（PE）或 2.00 mm 的聚四氟乙烯（PTFE）采样线作为采样器。

5.3.3 当使用采样线收集雾滴时，应通过从采样线上回收得到的示踪物数量进行定量分析。根据所用溶剂（如去离子水）的体积和适合的分析技术可计算示踪物数量，分析方法应根据喷雾发生器产生的初始雾滴的样本进行校准（见附录 B）。

5.3.4 采样器中的喷液保留时间不应过长，以减少喷液损失。

5.3.5 通常可根据检测到的喷液量与采样时间的相关性评估饱和度，二者相关性在过载点之前为线性上升。然而，喷雾时间应确保具有足够的空中雾滴取样时间，以保证空中雾流具有代表性和测量的精确度与重复性。

5.3.6 应预先研究确定采样器的位置，以便采集到典型雾流，确保测量值具有代表性。在测量前与测量后，应在风洞中进行控制性非喷雾运行，以确保相邻两次测量的采样器不会受到交叉污染。

### 5.4 测量程序

5.4.1 应测量和记录空气的温度、湿度及喷液的温度。当有必要进行重复测量时（例如当要求对喷雾发生器的喷雾飘移程度进行分级时），最高湿度应不高于 85%，喷液温度和空气温度的最大差值应为空气温度的  $\pm 10\%$ 。喷雾飘移程度分级测量的气温通常应为  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ 。

5.4.2 必要时,在具有循环空气系统的风洞中,可通过安装在风洞工作区下风末端的加湿喷嘴增加空气湿度(参见附录C)。

5.4.3 应在风洞中安装相关设备测量下列参数:

——气流速度,在代表额定气流速度的位置测定(通常为风洞中心喷雾发生器的高度),最大误差为0.1 m/s;

——温度,最大误差为1℃;

——相对湿度,最大误差为5%。

5.4.4 典型的设备安装位置参见附录C。

5.4.5 应测量和记录喷液的动态表面张力(表面寿命期为20 ms)和剪切粘度,以及测量时的喷液温度。为了模拟植物保护制剂的典型物理性质,应在喷液中添加非离子表面活性剂的水溶液(浓度通常为0.1%~0.5%)。所用的示踪剂应便于收集和分析,且对人员和环境无安全风险。

注:一些示踪物质可能含有表面活性剂。

5.4.6 应从下列两个方面对测量结果进行描述:

——雾滴的空间垂直分布状况(所采集喷液单位为微升( $\mu\text{l}$ ));

——雾滴的水平沉积分布状况(所采集喷液单位为微升( $\mu\text{l}$ ))。

5.4.7 应在喷雾发生器高度所在平面和有效风洞层之间至少设置五个采样器,通过从喷雾发生器产生的雾流中取样测量雾滴垂直分布状况。当测量表明最高点上的采样器内有喷液时,应重新调节采样器的位置直到最高点的采样器中测量不到喷雾飘移。

5.4.8 采样器应水平横置于风洞中,且相邻采样器的垂直间距应不大于0.1 m。

5.4.9 应至少使用五个采样器测量雾滴水平沉积分布状况,采样器应设置在有效风洞层内,其最大水平间距应为1 m。采样器应合理布置,以便测量喷雾发生器下风方向至少2 m~5 m范围内的雾滴。

5.4.10 应根据喷雾区的下风边缘(即静止空气中雾流型的下风边缘)确定喷雾发生器的下风距离。通常集雾槽(GB/T 20183.1中指定)中收集的喷液量为最大收集量10%的位置(测量前应对该位置进行验证)为下风边缘;下风边缘与喷雾发生器中心线的距离为下风距离。对于具有较大雾流型的喷雾发生器,可采用较大的收集器或替代方法。

5.4.11 当采用扁平扇形液力喷嘴进行测量时,应在雾流型式与气流方向成直角时(以提供一个实际最坏的情况)测量喷雾飘移程度。

5.4.12 当对供试喷雾发生器进行相对喷雾飘移程度分级测量时,应同时对参比喷雾发生器进行测量。对于特殊的液力喷嘴,应按ISO 25358的相关规定(喷嘴型号及其压力参数)对其参比喷嘴进行测量。

5.4.13 在确定喷雾时间时,除应确保足够的样品采集量之外(参见附录B),还应考虑喷雾启动和关闭对建立预期喷雾特征和型式的影响。例如,通常液力喷嘴适合的最短喷雾时间为5 s,而双流体喷嘴建立预期喷雾特征和型式的时间则需要30 s。

5.4.14 每次测量应至少重复三次,至少记录其中两次,并用于结果计算。

## 6 测量报告

测量结果应记录于测量报告中,测量报告的内容见附录D。

## 7 测量结果计算

7.1 将测量值(单位为微升( $\mu\text{l}$ ))转化为喷液输出量的百分比,并进行记录(参见附录E)。

7.2 计算雾滴垂直分布状况和水平沉积分布状况。

注:如有必要,以上结果可用图表形式显示为在不同高度或下风距离采集到的喷雾发生器输出量的百分比。

7.3 测量值可用于计算喷雾发生器的喷雾飘移程度，并可通过相对喷雾飘移程度对不同喷雾发生器或喷液进行比较分级。

附录 A  
(规范性附录)  
风洞气流的表征

### A.1 总则

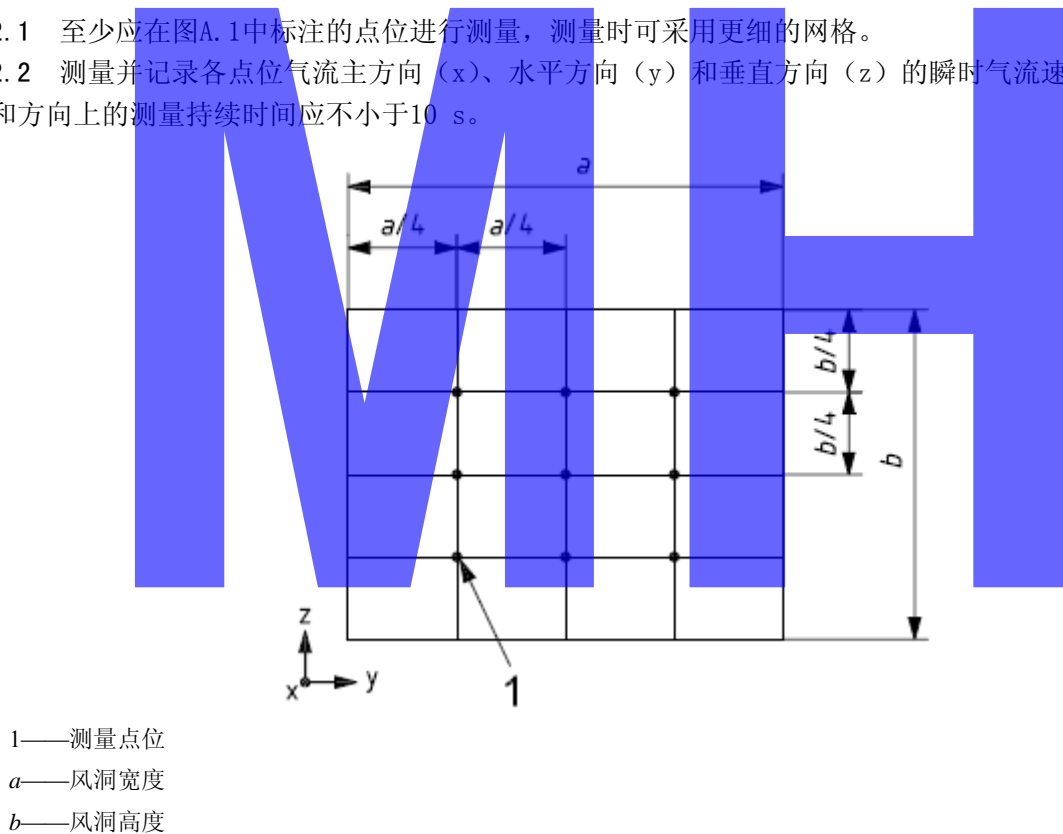
A.1.1 风洞气流应在喷雾发生器的下风方向2 m处进行测定，其额定气流速度约为2 m/s。

A.1.2 除一台风速仪及其附件之外，风洞中不应含任何附加测量设备（如喷雾发生器、采样器及配套装置）。所使用的风速仪应能进行局部测量（如采用热线风速仪），其测量误差应不大于0.1 m/s，采样频率应不小于每秒20次。

### A.2 气流参数的测量

A.2.1 至少应在图A.1中标注的点位进行测量，测量时可采用更细的网格。

A.2.2 测量并记录各点位气流主方向（x）、水平方向（y）和垂直方向（z）的瞬时气流速度值。各点位和方向上的测量持续时间应不小于10 s。



图A.1 测量平面上的测量点位

### A.3 额定气流速度

根据各点位气流主方向（x）气流速度的平均值，按公式(A.1)计算额定气流速度 $\bar{v}_x$ ：



$$\bar{v}_x = \frac{\sum v_{x,ij}}{n} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$v_x$ ——气流主方向 (i,j) 点位上气流速度的平均值;

$i=1\dots m$ ——垂直测量点位;

$j=1\dots p$ ——水平测量点位;

$n=mpk$ ——测量值的总数;

$k$ ——各测量点位上测量值的数量。

#### A.4 紊流度

根据各点位气流主方向 (x)、水平方向 (y) 和垂直方向 (z) 测得的气流速度相对于局部平均气流速度 ( $\bar{v}_{x,ij}$ ,  $\bar{v}_{y,ij}$  和  $\bar{v}_{z,ij}$ ) 的变化值, 按公式(A.2)~公式(A.5)计算紊流度 ( $T$ ):

$$T_{ij} = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\bar{v}_{x,ij}^2 + \bar{v}_{y,ij}^2 + \bar{v}_{z,ij}^2)}}{\bar{v}_{x,ij}} \dots\dots\dots (A.2)$$

$$\bar{v}_{x,ij}^2 = \frac{1}{K} \sum (\bar{v}_{x,ij} - v_{x,ij})^2 \dots\dots\dots (A.3)$$

$$\bar{v}_{y,ij}^2 = \frac{1}{K} \sum (\bar{v}_{y,ij} - v_{y,ij})^2 \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\bar{v}_{z,ij}^2 = \frac{1}{K} \sum (\bar{v}_{z,ij} - v_{z,ij})^2 \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

$\bar{v}_{x,ij}$  —— (i,j) 点位气流主方向 (x) 气流速度的变化值;

$\bar{v}_{y,ij}$  —— (i,j) 点位气流水平方向 (y) 气流速度的变化值;

$\bar{v}_{z,ij}$  —— (i,j) 点位气流垂直方向 (z) 气流速度的变化值;

$\bar{v}_{x,ij}$  —— (i,j) 点位气流主方向 (x) 气流速度的平均值;

$K$ ——各测量点位上测量值的数量。

#### A.5 气流速度的局部变化率

根据各点位气流主方向 (x) 测得的气流速度平均值 ( $\bar{v}_{x,ij}$ ) 相对于额定气流速度的变化值, 按公式 (A.6) 计算气流速度的局部变化程度 ( $S$ ):

$$S = \frac{\sqrt{\frac{1}{mp-1} \sum (\bar{v}_x - \bar{v}_{x,ij})^2}}{\bar{v}_{x,ij}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.6)$$

式中：

$\bar{v}_x$  —— 额定气流速度；

$\bar{v}_{x,ij}$  —— (i, j) 点位气流主方向 (x) 气流速度的平均值；

$m$  —— 垂直测量点的数量；

$p$  —— 水平测量点的数量。

### A.6 边界层边缘

A.6.1 沿测量平面中心的垂直线，以风洞平台上方 (5±0.2) cm 高度为起点，每隔 (5±0.2) cm 设置一个测量点，测量气流主方向 (x) 的平均气流速度值。

A.6.2 当局部平均气流速度为额定气流速度的95%时，该点位高度为边界层边缘。



**附 录 B**  
(规范性附录)  
**喷雾飘移采样器的选择和使用**

风洞中使用直径为1.98 mm聚乙烯 (PE) 或2.00 mm聚四氟乙烯 (PTFE) 采样线测量喷雾飘移程度与喷雾飘移的田间测量密切相关。因此, 这类采样器已为标准采样器。其他喷雾飘移采样器在使用前应进行检查, 以确保其具有与标准采样器相似的测量结果和0.1  $\mu\text{l}$ 的喷液分析水平 (或采样区喷液含量为0.001  $\mu\text{l}/\text{cm}^2$ )。当拟采用的采样器与标准采样器进行比较时, 上述检查应确保:

- a) 相同参比喷嘴在两种采样器中显示出相对一致的飘移程度等级 (见 ISO 25358);
- b) 不同参比喷嘴的相对喷雾飘移程度在两种采样器中显示出相似的差异 (见 ISO 25358);
- c) 测量结果具有可重复性。

任何有效的测量结果比较 (包括通过相对喷雾飘移程度对喷雾发生器进行分级) 应确保所有测量均使用相同的采样器。

表B.1列出了目前使用的喷雾飘移的采样器。

**表B.1 喷雾飘移采样器举例**

采样器	特征	备注
— 直径为 1.98 mm 的聚乙烯塑料线 — 直径为 2.00 mm 的聚四氟乙烯线	采样效率高, 采样面积已知。	应检验示踪物的滞留和回收特性。 用于采集空中雾滴。
— 管状收集器 — 棉线 — 羊毛线 — 盘状收集器 — 滤布	采样效率很高, 采样面积可变且未知。	通过照片确定平均采样尺寸。 用于采集空中雾滴。
— 滤纸 — 纸面 — 显微镜玻片 — 皮氏培养皿	采集空中雾滴时效率低。	仅用于测量地面上的喷雾沉积量。 应水平安装。
— 集雾槽	无现成数据	无现成数据
— 吸入式取样器和旋转棒一类的活动式采样器	采样效率高。	仅用于采集空中雾滴, 除非是等速采样, 否则采样区面积难以确定。

注: 对于垂直方向上的采样器, 其采样效率很大程度上取决于雾滴尺寸和气流速度 (该数据或测量结果用于计算不同采样器的采样效率)。

应建立空中喷雾飘移采样器的使用规程, 以最大限度地减少采样器暴露在空中喷雾飘移的前后过程中产生各种交叉污染的风险。在测量过程中, 应使用干净的采样器 (若使用示踪物, 采样器中应添加经体积测量的示踪物溶剂) 监测是否有交叉污染 (和 (或) 示踪物降解)。

应尽可能缩短采样器使用后的存放时间。需要存放时, 应存放于适合的环境下。示踪物应存放于干燥、避光、温度低于4  $^{\circ}\text{C}$ 的环境中, 并尽量避免其凝结 (因为凝结可能导致测量结果不准确)。

测量开始前, 应做下列准备工作:

- a) 检验目标采样器上示踪物的回收率和稳定性，确定检验技术的分析水平；
- b) 制定详细的分析程序；
- c) 对喷雾发生器喷雾时其喷液样品中的示踪物浓度进行标定，利用标定结果计算采样器中示踪物的沉积量。

当用荧光染料作为示踪物时：

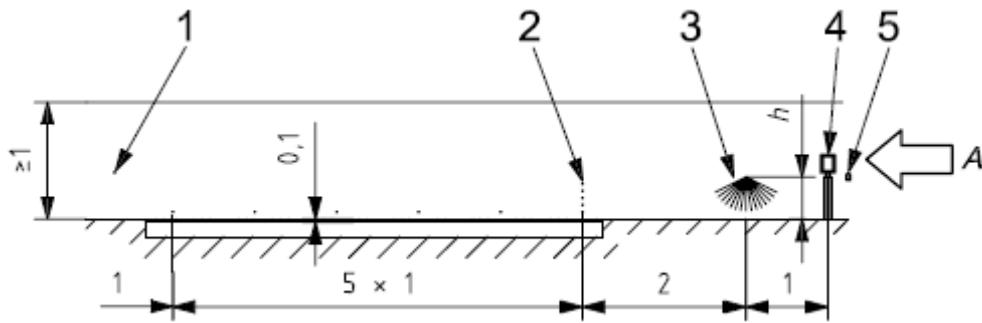
- a) 应优化荧光计或光度计对示踪物的激发和发射波长，以最大限度区分示踪物和背景。背景可能来自采样器、稀释液（例如自来水或去离子水的荧光性会随时间变化）和荧光计中毛细管测量元件的污染物；
- b) 用稀释液浸泡采样器以使示踪物溶解。为了最大限度地提高示踪物的回收率，稀释液的体积应尽可能小，但这取决于采样面积和采集到的喷液体积，同时稀释液体积和采样器中的示踪物数量也决定了采样器表面示踪物的回收率。通过向采样器中加入已知体积的喷液，然后检测其数量，以确定最佳稀释体积（其目的是当使用一定体积的稀释液洗脱采样器表面的示踪物时，所提供的染料浓度位于荧光或光度测量法实际工作区中部）；
- c) 应采用不同的荧光计或光度计分析相同的标准采样器，并比较其结果。荧光计的读数与溶液中示踪物的含量由校准曲线确立。该曲线可通过测定已知浓度的示踪物获得。

注：在刻度限值范围内，该校准曲线是一条直线（例如，在0~1 000范围内的 $10 < x < 950$ ）。

**MRA**

附 录 C  
(资料性附录)  
风洞典型设计和布局

图C.1给出了采样线、喷雾发生器和测量仪器的典型设计和布局(图中数量单位为米(m))。



- 1——加湿喷嘴
- 2——采样线(垂直间距为0.1 m)
- 3——喷雾发生器
- 4——风速计
- 5——相对湿度和温度传感器
- h——有效风洞层以上喷雾发生器的高度(由喷雾发生器的制造商规定)
- A——气流

图C.1 风洞工作区图示

附录 D  
(规范性附录)  
测量报告的内容

测量报告的内容包括:

- 风洞工作区尺寸, 单位为米 (m);
- 喷雾发生器的类型、尺寸、角度、方向和材质;
- 气流速度, 单位为米每秒 (m/s);
- 最大紊流度 (%);
- 采样器;
- 空气温度, 单位为摄氏度 (°C);
- 相对湿度 (%);
- 喷液类型;
- 喷液动态表面张力, 单位为达因每平方米 ( $\text{dyn}/\text{cm}^2$ );
- 喷液剪切粘度;
- 喷液温度, 单位为摄氏度 (°C);
- 喷雾发生器的高度, 单位为米 (m);
- 喷液流速, 单位为毫升每秒 (ml/s);
- 喷雾发生器的移动距离, 单位为米 (m); 移动速度, 单位为米每秒 (m/s);
- 喷雾压力, 单位为千帕 (kPa);
- 喷雾时间, 单位为秒 (s);
- 单个采样器与平均值相比较时的最大测量偏差 (%)。

附 录 E  
(资料性附录)  
结果计算示例

当使用直径为1.98 mm采样线测定水平方向上的喷雾飘移沉积物时，应测量沉积物的量，并将其累积后转化为占喷雾发生器输出量的百分比。

当喷雾发生器的流量为850 ml/min，喷雾运行10 s时，风洞层中气流主方向（x）存在喷雾飘移。如果气流水平方向（y）采样线上的喷雾总沉积量为2.5 μl，则1.98 mm直径采样线经放大后的1 m宽条带（表示下风采样器中心点的水平间距为1 m）的沉积量可由此得出：

宽度为1 m，采样时间为10 s的沉积量（微升）

$$= 2.5 \times \frac{1000}{1.98} = 1262 \text{ } \mu\text{l}$$

采样时间为1 min的沉积量（毫升）

$$= 2.5 \times \frac{1000}{1.98} \times \frac{60}{10} \times \frac{1}{1000} \text{ ml/m/min} = 7.57 \text{ ml/m/min}$$

当喷嘴流量测量值为850 ml/min时，喷雾飘移程度

$$= \frac{7.57}{850} \times 100\% (\text{喷嘴输出量}) = 0.89\%$$

对于所有不同的采样器，在合并测量值之前需填写三个重复内的至少两个表格。计算结果通常以图表的形式来表示所采集的喷雾占总输出量的百分比，以提供一个反映空间垂直喷雾飘移状况或水平沉积喷雾飘移状况的图示。

参 考 文 献

- [1] ISO 22369 (all parts) Crop protection equipment — Drift classification of spraying equipment
- [2] ISO 22866 Equipment for crop protection — Methods for field measurement of spray drift
- [3] ASAE S572 Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra
- [4] SOUTHCOMBE, E. S. E. et al. (1997) The International (BCPC) Spray Classification System Including a Drift Potential Factor. Proc. BCPC Conf. - Weeds, pp. 371-380
- [5] DOBLE, S. J. et al. (1985) A System for Classifying Hydraulic and Other Atomizers Into Categories of Spray Quality. Proc. BCPC Conf. - Weeds, pp. 1125-1133

---

**M M H**