

航空静电喷雾与非静电喷雾沉积效果的比较试验研究*

舒朝然¹, 周宏平², 詹敏³

(1. 国家林业局森林病虫害防治总站 沈阳 110034; 2. 南京林业大学 南京 210037; 3. 沈阳农业大学 沈阳 100161)

摘要: 利用直升机 R44 和固定翼飞机 Y5B 挂载自主研发的航空静电喷雾系统设备进行了机场和野外航空静电喷雾与非静电喷雾的比较试验。结果说明, 静电喷雾在地面和空中靶标表面、树冠中上部叶片正面的沉积效果明显优于非静电喷雾: 雾粒细小、分布均匀、沉积密度提高一倍以上, 最高达 1.75 倍; 直升机静电喷雾在叶片背面的沉积率为非静电喷雾的 2.15 倍, 是常规航空喷雾的 3.31 倍。Y5B 静电喷雾在叶片背面的沉积率为非静电喷雾的 2.38 倍, 是常规航空喷雾的 3.44 倍。与非静电喷雾或常规喷雾比较, 航空静电喷雾能大幅提高药物着靶率和沉积率, 显著提高农药有效利用率、降低用药成本和作业成本, 同时减少环境污染。

关键词: 航空静电喷雾; 非静电喷雾; 雾滴沉积

Study on Effects of Aerial Spray Deposition with and without Electrostatic Spray

Shu Chaoran¹, Zhou Hongping², Zhan Min³

(1.General Station of Forest Pest Management of China,Shenyang 110034,China; 2.Nanjing Forest University,Nanjing 210037,China; 3.Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;)

Abstract: This study was on the comparison of the aerial electrostatic spray deposit with non ones using by helicopter R44 and fixed wing aircraft Y5B equipped with the aerial electrostatic spraying system manufactured in land. The results showed that the spray deposits on the targets and the leaves of tree crowns were notable enhanced comparing with the non electrostatic and conventional aerial spray. The spray deposits were fine, even and its densities were higher for 1.0~1.75 than the non electrostatic spray. The rate of the electrostatic spray deposits on the backs of leaves using by helicopter R44 was 2.15 times of the non ones, and 3.31 times of the conventional aerial spray. The rate of the electrostatic spray deposits on the backs of leaves using

by Y5B was 2.38 times of the non ones, and 3.44 times of the conventional aerial spray.

Key words: aerial electrostatic spray; non electrostatic spray; spray deposit

航空静电喷雾过程中带电雾滴在空中向地面靶标运动时,其运动轨迹和特性很难用简单的数学方法来描述,而航空静电喷雾的沉积效果最终只能通过雾滴在靶标表面的沉积试验并与非静电喷雾或常规航空喷雾作比较来进行评判。在航空静电喷雾试验研究中,国外开展得比较早。美国的 Kirk、Hoffmann 和 Carlton, 利用同一架 Cessna 农用飞机分别挂载航空静电喷雾设备和常规航空喷雾设备,对棉花 *Gossypium* 进行了航空静电喷雾和常规喷雾防治害虫的对比试验 (Carlton, J. B.等, 1995)。结果表明,在作物冠层和中层的叶片正面,航空静电喷雾和常规航空喷雾得到的雾滴沉积覆盖率分别为 34.5 和 29.6ng/cm², 优势并不明显。但在叶片背面,前者是 3.7 ng/cm², 后者仅为 2.1 ng/cm², 航空静电喷雾的优势明显。在防治效果都达到要求的条件下,航空静电喷雾和常规航空喷雾的喷洒药液量分别为为 9.4L/ha 和 46.8 L/ha, 航空静电喷雾喷洒液量仅为常规航空喷雾的 1/5。在美国明尼苏达, Ostlie, K.和 E. Newberg (2005, 2006) 应用航空静电喷雾技术防治大豆蚜虫 *Aphis glycines* Matsumura 并与常规航空喷雾作比较,结果表明,航空静电喷雾 3.79L/ha 的喷洒液量与常规航空喷雾 3.79~18.95L/ha 的喷洒液量所得到的大豆 *Glycine max* Merrill 冠层沉积覆盖率及其对蚜虫的防治效果近似 (Ostlie K. 2005)。澳大利亚的农业专家应用航空静电喷雾防治大豆锈病 *Phakopsora pachyrhizi* Sydow, 不仅防治作业时间比常规航空喷雾大大缩短,而且发现航空静电喷雾的体积中径为 150μm 左右的雾滴防治大豆锈病的效果明显好于常规航空喷雾的 200~300μm 的大雾滴。我国在这方面的起步很晚。2005 年新疆通用航空公司从美国购进一套航空静电喷雾系统设备,安装在 Y5B-3106 飞机上试飞和农林作业试验,结果说明航空静电喷洒效果良好 (李华等, 2006)。自 2006 年以来,本文作者对国外航空静电喷雾系统技术进行了系统研究,利用国产 Y5B 和进口 R44 直升机挂载自主研发的航空静电喷雾系统设备做了一系列的机场与野外喷雾试验。本文主要就航空静电喷雾的沉积效果与非静电喷雾和常规航空喷雾作一比较研究。

1. 材料与方法

1.1 喷洒液染色材料

本试验所用染色剂为两种,一种为荧光素钠,另一种为曙红,这两种染料的使用特点是:亲水,易溶;光稳定性良好;无毒无害,即对人畜无毒无害、不污染环境和水源,可用于生

物组织染色，也可用于食品加工；使用剂量为 500mg/kg 即可有效染色；粉末状固体，携带方便。

1.2 靶标材料

机场试验使用靶标材料为普通 A4 复印纸或工程复印纸，林间试验以树冠叶片为靶标。

1.3 试验设备

机种：美国进口罗宾逊 R44 直升飞机(隶属于荆州同诚通用航空有限公司)、国产 Y5B (固定翼) 农用飞机(隶属于江苏省徐州农用航空站)。

喷雾装置：自主研发的国产航空静电喷雾系统（单喷嘴航空静电喷头 28 个、双喷嘴航空静电喷头 50 套(100 个喷嘴)和 1 对正、负直流高压高频开关电源及电极连接线）、储液箱、汽油机加压液泵、风动泵。

风速仪。

雾滴沉积观察用便携式紫外灯或蓝光(如验钞票用荧光灯或蓝光灯)。

1.4 试验条件

(1)R44 直升机航空静电喷雾效果测试于 2007.12.20~26 在湖北省荆州市沙市区南航机场进行。环境温度：10~15℃；环境相对湿度：55%；风力：2~3 级；横喷管总长度：12m，左、右两翼各长 5.5 米，共安装单喷嘴静电喷头 28 个，左、右两翼各 14 个；药箱载液量：200kg/架次；喷雾压力：0.15~0.25Mpa；喷嘴流量：0.5~0.8L/ min /喷嘴；作业高度：8~10m(距地面)；飞行速度：70~80km/h。

(2)国产 Y5B 航空静电喷雾试验于 2008 年 10 月 27~30 日在江苏徐州农用航空站杨庙机场进行。环境温度：28~30℃；环境湿度：55%；风力：2~3 级；横喷管总长度：20m，左、右两翼各长 10 米，共安装双喷嘴航空静电喷头 50 套（100 个静电喷嘴），左、右两翼各 25 套；药箱载液量：800kg/架次；喷雾压力：0.15~0.2Mpa；每套喷头流量：2 × 0.6~0.9L/min；作业高度：5~8m；飞行速度：155km/h。

(3)R44 直升机航空静电喷雾林间试验于 2008.09.28~29 在湖北省嘉鱼县簰洲湾杨树 *Populus lasiocarpa*.速生丰产林中进行。天气：晴；环境温度：30~35℃；环境相对湿度：55%；风力：2~3 级。

(4) 国产 Y5B 航空静电喷雾林间试验于 2009.07.19 在江苏徐州市沛县所属微山湖杨树 *Populus lasiocarpa*.防护林带进行。天气：晴；环境温度：30~35℃；环境相对湿度：65%；风力：1~2 级。

1.5 试验方法

1.5.1 曙红染色剂标记试验

1.5.1.1 有效喷幅、雾滴飘移性的测定

喷幅测定试验过程喷雾溶液用水做介质，在水中以 1.0~1.5g/L 的浓度比例加入曙红水基染料。为了能够比较准确地测定与飞机配套的静电喷洒设备的有效喷幅，先后在机场内地面设置两个面积为 10×70 m 试区，其中一个作为静电喷雾试区，另一个作为非静电喷雾试区。两个试区相距 100 米左右。试区地面上每隔 1m 放置 1 块 A4 复印纸作为靶标，并按顺序编号。同一架次先后对两个试区进行相应的航空静电喷雾和非静电喷雾，飞机飞行喷雾时飞行方向应与地面长方形试区的长边保持垂直，并且机身应限制在中间区内。喷雾后 30 分钟后再分别收集两个试区的地面靶标样品，室内直接肉眼观察、统计、记录各编号靶标上的彩色雾滴沉积情况。凡平均雾滴沉积密度 ≥ 5 个/cm² 的靶标，其所在的位置均在有效喷幅范围之内，由此可大致判定静电喷雾和非静电喷雾的有效喷幅和雾滴漂移情况；

1.5.1.2. 曙红水溶液雾滴沉积效果试验

1.5.1.2.1 地面靶标的雾滴沉积效果测试

方法同 1.5.1.1，在同一架次测定有效喷幅和雾滴飘移性的同时，观察、统计、测定和记录静电喷雾和非静电喷雾情况下靶标复印纸上彩色斑点的分布密度、大小和均匀度等；

1.5.1.2.2 空中靶标的雾滴沉积效果测试

该试验是分别在与 1.5.1.1 的静电试区和非静电试区相邻的地方建立如图 1.所示的空中靶标树木模型，一个作为航空静电喷雾试验的空中靶标树木模型，另一个作为非静电喷雾试验的空中靶标树木模型。如图 1.所示布置复印纸卡，每隔 2m 位置，一个喷幅范围（30m 宽）内立两个木杆，这样需要 10 个竹杆或木杆，在喷幅方向的两个木杆之间用细铁丝连接，在细铁丝上布置 5 个以上编号的复印纸卡，用夹子夹紧。靶标固定尽可能使其像树叶一样一面朝上。同一架次分别对两个空中靶标树木模型进行航空静电喷雾和非静电喷雾。飞机沿着图示方向飞行，航高为 5~8m，以作业速度掠过试验区，30 分钟后收集靶标样品并保存。肉眼可直接观察、测定和记录靶标上所沉积的曙红染料的彩色斑点的疏密情况，并比较静电喷雾与非静电喷雾的沉积效果的区别。

飞机飞行方向

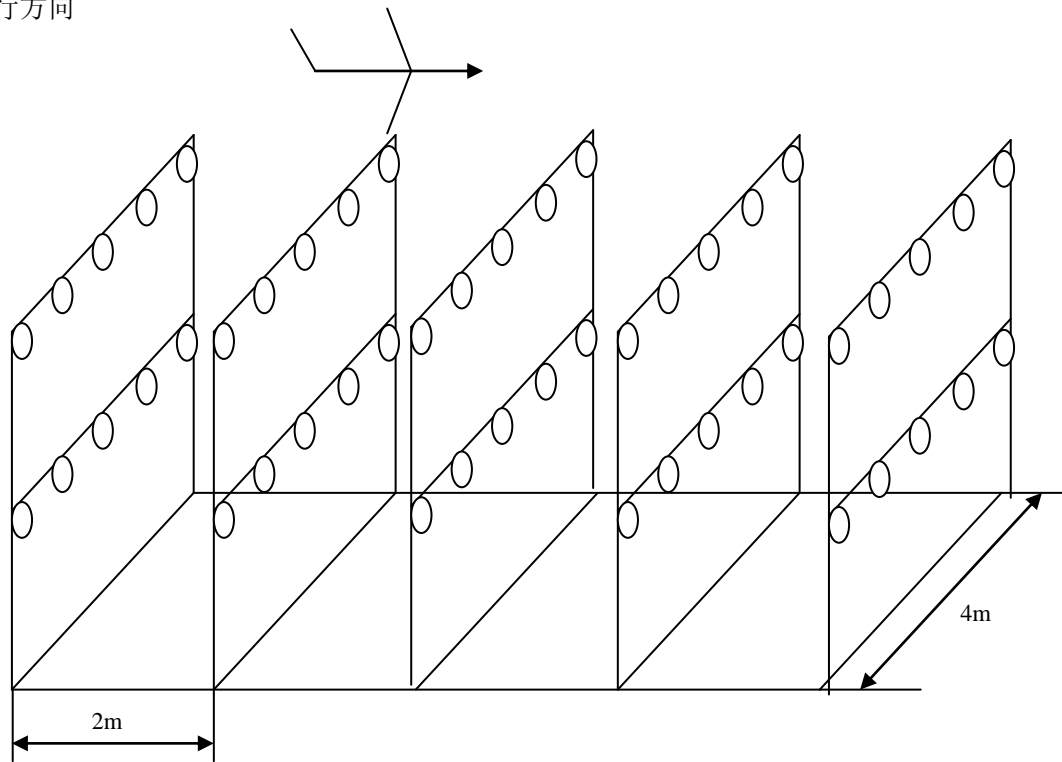


图1. 空中靶标树木模型(航空静电喷雾试验的与非静电喷雾试验的相同)

Fig1. Treessmodel of aerial targets for the aerial electrostatic spray and no-electrostatic spray

1.5.2 荧光素钠标记雾滴沉积效果试验

1.5.2.1 地面靶标沉积试验 与 1.5.1.2.1 试验相似，在 1.5.1.1 试验设置的静电试区和非静电试区，按 $1.5 \times 1.5\text{m}$ 株、行距布设 A4 复印纸。喷雾溶液用水做介质，以 $1.0 \sim 1.5\text{g/L}$ 的浓度比例加入荧光素钠。同一架次先后对两个进行相对应的静电喷雾与非静电喷雾，30 分钟后收集地面靶标样品，在室内 8w 以下便携式紫外灯或蓝光灯下观察、统计各编号的靶标上的荧光光斑的疏密程度、密度、大小和分布均匀度，从而可比较非静电喷雾与静电喷雾两种情况下的雾滴的沉积效果。

1.5.2.2 空中靶标沉积试验 与 1.5.1.2.2 试验方法相似，同一架次先后对两个空中靶标树木模型进行相对应的航空静电喷雾和非静电喷雾，30min 后收集靶标样品，样品观察、统计方法与 1.5.2.1 相同。

1.5.3 航空静电喷雾林间试验 依据当地林区图和林地勘察确定试验林区，试验林区划分为三个试验区，即静电喷雾区、非静电喷雾区和常规航空喷雾区，利用 GPS 定位分别标定这三个试验区的方位，以便飞机喷洒时准确覆盖。试验时喷洒液按千分之五的比例加入荧光素

钠。航空静电喷雾和非静电喷雾使用同一套航空静电喷雾系统设备，静电喷雾时打开静电高压电源，非静电喷雾时关闭静电高压电源。而常规航空喷雾则使用常规航空喷雾设备。飞机喷雾过后分别在三个试验区随机选取 10 株树木(高度和大小适中,以便于高枝剪采集样品),利用高枝剪随机采摘各株树冠的上、中、下部的四个方位的小枝并编号带回室内,以供采集叶片在蓝光灯下观察、统计荧光雾滴在叶片上的分布状况和沉积密度。

2. 结果与分析

2.1 雾滴沉积状况

2.1.1 静电喷雾有效喷幅: 对于 R44 直升机(安装 28 个单喷嘴航空静电喷头), 静电喷雾有效喷幅大约为 33 米左右。而非静电喷雾有效喷幅大约为 29 米左右; 对于 Y5B(安装 50 套电极外置式双喷嘴航空静电喷头), 静电喷雾有效喷幅大约为 42 米左右。而非静电喷雾有效喷幅大约为 39 米左右。

2.1.2 静电喷雾飘移性: 离有效喷幅中线 30 米距离之外几乎看不到有彩色雾滴沉积。而非静电喷雾条件下, 离有效喷幅中线 30 米距离之外有彩色雾滴沉积, 甚至在下风向 40~50 米之外还能看到彩色雾滴沉积; 经过实际测算, 与非静电喷雾比较, 静电喷雾可减少雾滴漂移损失 40% 以上。

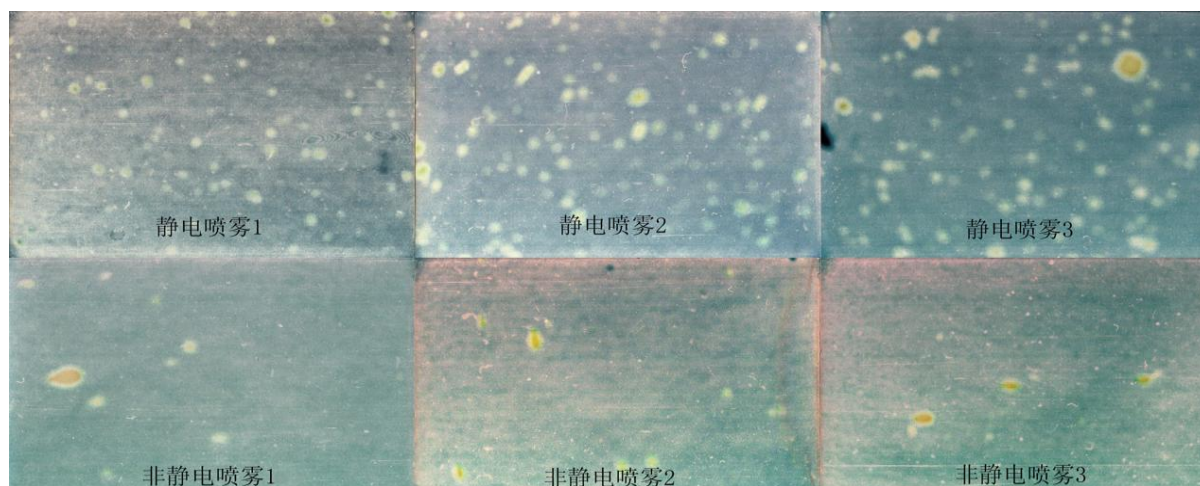


图 2 (比例尺 10:1) . 对对应位置靶标上的航空静电喷雾与非静电喷雾的荧光染色雾滴的沉积效果

Fig.2(Images,10:1). Diposit effects of the aerial electrostatic spray (stained by fluorescein sodium, upper Images 1,2,3) and the no-electrostatic spray (Images 1, 2,3 below) on the corresponding located targets



图3 (比例尺 1:1). 对应位置靶标上的航空静电喷雾与非静电喷雾的曙红染色雾滴的沉积效果

Fig.3 (scanning Images, 1:1). Deposit effects of the aial electrostatic spray (stained by eosine, upper Images 1, 2,3) and the no-electrostatic spray (Images 1, 2,3 below) on the corresponding located targets

2.1.3 航空静电喷雾沉积: 如图 2 和图 3 所示, 静电喷雾与非静电喷雾条件下的雾滴沉积的状况有明显的差异, 静电喷雾条件下靶标上沉积的雾滴彩色斑点的大小和分布都比较均匀, 而分布密度较大; 非静电喷雾条件下靶标上沉积的雾滴彩色斑点的大小和分布不均匀, 分布密度较小。表 1、表 2 及表 3 的比较说明, 静电喷雾条件下的雾滴在靶标表面的沉积比较均匀, 雾粒较小, 沉积密度提高一倍以上, 最高达 1.75 倍。这说明航空静电喷雾过程中, 静电引力作用导致大量雾滴作定向沉积运动, 大量减少了雾滴漂移损失, 从而大幅提高了雾滴在靶标表面的沉积量(闻建龙等,2000)。这与室内和地面简单静电喷雾效果试验所得出的结果和规律是吻合的。

表 1. R44 直升机航空静电喷雾与非静电喷雾对地靶标沉积效果之比较

Table 1 The comparison of the deposit effects on the horizontal targets between the aerial electrostatic spray and the non ones using by helicopter R44

喷雾方法 Methods of the spray	架次 Order of the sortie	喷液成分 Compositions of the spray liquid	靶标材料 kinds of the Target	有效喷幅(m) Effective width of spray	平均雾滴密度 (个/cm ²) Everage density of the droplet	雾滴大小(μm) Diameter of the droplet	平均粒径(μm) Everage diameter of the droplet	雾粒均匀度 Homogeneity of the droplets
非静电喷雾 Non	第 1	曙红 eosine	复印纸 Xerography paper	32.0	4.0	87~155	121.5	0.75
	第 2	曙红 eosine	复印纸 Xerography	33.5	6.4	80~167	118.7	0.7

electrostatic spraying			paper					
	第 3	荧光素钠 Fluoresceim Sodium	复印纸 Xerography paper	31.0	6.9	85~158	109.3	0.72
静电喷雾	第 1	曙红 eosine	复印纸 Xerography paper	31.5	11.0	80~130	91.4	0.85
	第 2	曙红 eosine	复印纸 Xerography paper	32.0	10.2	70~142	86.1	0.88
Electrostatic spraying	第 3	荧光素钠 Fluoresceim Sodium	复印纸 Xerography paper	32.5	16.5	68~138	80.6	0.9

注：平均粒径为加权平均值。

表 2.R44 直升机航空静电喷雾与非静电喷雾对空中靶标雾滴沉积效果之比较

Tab 2. The comparison of the deposit densities on the space targets between the aerial electrostatic spray and the non ones using by helicopter R44

喷雾方法 Methods of the spray	架次 Order of the sortie	喷液染色剂 Colouring agent for spray	靶标种类 Kinds of the Target	有效喷幅(m) Effective width of spray	平均雾滴密度(个/cm ²) Everage density of the droplet	雾滴大小(μm) Diameter of the droplet	平均粒径(μm) Everage diameter of the droplet	雾粒均匀度 Homogeneity of droplets diameter
非静电喷雾 Non electrostatic spraying	第 1	曙红 eosine	复印纸 Xerography paper	32.0	6.6	80~165	123.4	0.75
	第 2	曙红 eosine	复印纸 Xerography paper	33.5	7.4	80~158	118.1	0.7
	第 3	荧光素钠 Fluoresceim Sodium	复印纸 Xerography paper	31.0	8.9	100~160	113.1	0.72
静电喷雾 Electrostatic spraying	第 1	曙红 eosine	复印纸 Xerography paper	33.5	13.8	68~149	88.5	0.85
	第 2	曙红 eosine	复印纸 Xerography paper	34.0	16.2	71~146	91.2	0.88
	第 3	荧光素钠 Fluoresceim Sodium	复印纸 Xerography paper	32.5	20.5	78~151	93.0	0.9

注：平均粒径为加权平均值。

表 3.Y5B 航空静电喷雾与非静电喷雾有效喷幅范围和雾滴沉积密度的比较

Table 3 The comparison of the deposit densities and effective widths on the horizontal targets between the aerial electrostatic spray and the non ones using by Y5B

有效喷幅范围与雾滴沉积密度 Effective width of spray(m) and Everage density of the droplet (droplets / cm ²)												雾滴大小(μm) Diameter of the droplet	平均粒径(μm) Average diameter of the droplet	雾粒均匀度 Homogeneity of droplets diameter
距 离 Distance (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50			
静电喷雾 Electrostatic spraying	0	11	33	41	49	35	25	53	39	23	4	70~160	117.3	0.89
非静电喷雾 Non electrostatic spraying	0	3	18	24	22	16	14	27	20	13	6	90~200	131.5	0.69

2.1.4 航空静电喷雾与非静电喷雾对树木冠层的覆盖率的比较

按照 1.5.3 所述的方法于 2008 年的 8 月 29-30 日在湖北省嘉鱼市簪洲湾杨树速生丰产林利用直升机施药防治杨小舟蛾 *Micromelalopha troglodyte* Graeser 时测试了叶片表面静电喷雾雾滴沉积率,并与非静电喷雾和常规航空喷雾作了比较试验。同样方法于 2009 年 7 月 18~20 日在江苏省徐州市沛县微山湖防护林利用 Y5B 施药防治杨小舟蛾时测试了叶片表面静电喷雾雾滴沉积率,并与非静电喷雾和常规航空喷雾作了比较试验。结果如表 4 所示。

表 4.林间航空静电喷雾与非静电喷雾、常规航空喷雾雾滴的平均沉积密度之比较^①

Table4. The comparison of the average deposit densities on the leaves between the aerial electrostatic spray, non ones and conventional spray with R44 and Y5B

机型 Types of aircrafts	树冠部位 Positons of the canopy	雾滴平均沉积密度 (个 / cm ²) Everage density of the droplet (droplets / cm ²)		
		静电喷雾 Electrostatic spraying	非静电喷雾 Non electrostatic spraying	常规喷雾 Conventional spraying
R44 直升机 Helicopter	上部 over	24.4±1.3a	13.8±1.1b	7.6±0.9c
	中部 middle	19.7±2.0a	8.4±1.2b	5.4±0.5c
	下部 under	6.1±0.7a	4.6±0.6b	3.0±0.4b
	叶片背面 back of	5.3±0.5a	2.0±0.3b	1.3±0.2b

		leave		
Y5B Aircraft	上部 over	14.7±1.6a	6.8±1.0b	5.5±0.8b
	中部 middle	8.3±1.0a	5.1±0.6 b	4.3±0.5b
	下部 under	4.4±0.5a	3.5±0.3b	2.7±0.3b
	叶片背面 back of	3.1±0.4a	1.3±0.2b	0.9±0.2b
	leave			

①数据经新复极差法检验，同行数据不同字母者表示在 0.05 水平上差异显著。

由表 4 结果可知，无论直升机或是 Y5B，其静电喷雾在树冠上部和中部的叶片正面的雾滴沉积率显著高于非静电喷雾，特别是静电喷雾在叶片背面上的沉积率成倍高于非静电喷雾，如直升机静电喷雾在叶片背面的沉积率为非静电喷雾的 2.15 倍，是常规航空喷雾的 3.31 倍。Y5B 静电喷雾在叶片背面的沉积率为非静电喷雾的 2.38 倍，是常规航空喷雾的 3.44 倍。此外，直升机航空静电喷雾沉积效果又明显好于 Y5B，其原因可能是直升机喷雾作业时产生巨大的旋涡风对树冠有明显的翻动作用，使雾滴沉积覆盖面积更大(黄向东等，1998)。

3. 结论与讨论

3.1 与非静电喷雾效果比较，航空静电喷雾能明显减少雾滴的漂移损失，使有效喷幅范围扩大，并在有效喷幅范围内大幅提高雾滴在靶标表面的沉积密度；在航空静电喷雾过程中，荷电雾滴的降落和沉积过程，不同于普通雾滴的自由落体运动。除了重力作用因素外，在荷电雾滴与靶标表面的反向电荷之间还形成了一种静电引力，这种静电引力和重力的共同作用导致雾滴向靶标作定向运动，其结果减少了漂移损失，显著增加了雾滴在靶标表面的沉积率，同时由于荷电雾滴所带电荷相同，使其在靶标表面沉积时不会聚集，其分布的均匀性显著提高（舒朝然等，2007）。

3.2 与常规航空喷雾或非静电喷雾比较，航空静电喷雾在靶标表面的沉积率的成倍增加取决于两个方面，一是荷电雾滴由于静电引力作用作定向运动而减少了漂移损失，二是喷嘴周围附加的高压静电场使喷出液体破碎得更细小均匀，雾粒数量大幅增加，也明显增加了静电喷雾对靶标的覆盖面积。

3.3 航空静电喷雾雾滴在植物隐蔽部位如树叶背面的沉积密度成倍高于非静电喷雾，这在一定程度上解决了非静电喷雾或常规喷雾时植物叶背面、冠内冠外雾滴沉积不均匀的问题（舒朝然等，2002）。这对提高杀虫杀菌效果很有意义，因为附着在植物叶片背面的害虫和病原微生物往往多于叶片正面，一般施药方法难以触及它们。

3.4 近20年来，航空喷雾在我国森林病虫害防治中发挥了巨大作用。但常规航空喷雾的最大缺点是受气候影响大造成喷雾漂移，使喷洒的大量药物不能沉积到标靶植物上。喷雾漂移是

影响航空喷洒效果和造成环境污染、农药流失、农药有效利用率低的一个重要原因（宋强等 2008）（吕晓兰等，2011），这就造成大量的农药浪费和严重的环境污染(舒朝然等,2002)。而航空静电喷雾能较好地克服常规航空喷雾存在的缺点，大幅提高药物着靶率和沉积率，显著提高农药有效利用率、提高防治效果、降低用药成本和作业成本，同时减少环境污染。因此，航空静电喷雾应是我国航空喷洒技术发展的主要方向之一，值得开发和大力推广应用。

参考文献：

- Carlton, J. B. L.F.Bouse,andI.W.Kirk.1995a. Electrostatic charging of aerial spray over cotton. Trans. ASAE 38(6):1641-1645.
- Ostlie, K. 2005. Soybean aphid: A comparison of Spary technologies. Presented as part of workshop on Electrostatic Sprayers —A Progress Report organized by Dave Eby, AgriFlite Services. Notional Agricultural Aircraft Association annual meeting. Phoenix, AZ. Nov. 29. 2005.
- 李华, 张青, 王稳祥. 2006. Z03K000B 静电频谱喷雾系统加装改装与飞行试验. 新疆农垦科技. 2006 年第 5 期,46-47.
- 梁成杰, 赵玲, 黄金义等. 1998. 航空喷洒设备及监测技术的研究. 林业科学研究, 11(6): 607-611.
- 闻建龙,王军锋,陈松山等. 2000. 荷电改善喷雾均匀性的实验研究. 排灌机械, 第 18 卷第 5 期:45-47.
- 黄向东,方志荣. 1998. 超轻型直升机与固定翼飞机在森林病虫害防治应用中的比较研究. 长沙电力学院学报(自然科学版), 第 14 卷第 3 期: 279-281.
- 舒朝然,詹敏,盛茂领等.2007. 果树树冠静电喷雾的空间电荷效应分析. 沈阳农业大学学报, 第 38 卷第 1 期:59-64.
- 宋强, 邓贵民.航空喷雾漂移控制仿真器的设计.系统仿真学报,第 20 卷第 1 期:-264-266.
- 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.农业机械学报, 第 42 卷第 1 期: 59-63。
- 舒朝然,熊惠龙,陈国发等.2002. 静电喷药技术应用研究的现状与发展. 沈阳农业大学学报,第 33 卷第 3 期:211-214.