

## 履带自走式果园定向风送喷雾机\*

张晓辉 姜宗月 范国强 曹龙龙

(山东农业大学机械与工程学院, 泰安 271018)

**摘要:** 设计了结构紧凑、转向半径小的履带自走式果园定向风送喷雾机。对传动系统、履带行走系统和风送系统等关键部件进行了设计和计算,对定向喷雾机构进行了设计和试验验证。试验结果表明:有风送时雾滴沉积量比无风送时提高了42.9%,变异系数降低了18.5%;定向喷雾比普通喷雾雾滴个数提高了30.9%,变异系数降低了55.3%。

**关键词:** 果园喷雾机 履带自走式 定向风送喷雾 试验

**中图分类号:** S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0117-06

## 引言

病虫害防治是果园中最主要的管理作业,但目前我国仍使用手动、踏板式喷雾器和高压喷枪,采用大雾量、雨淋式喷药方法<sup>[1]</sup>。这种粗放落后的药械和施药方法容易造成:农药利用率低,约有70%~80%沉降到地面和飘移到周围环境中,不仅浪费资源,而且造成环境污染;作业效率低,劳动强度大,操作人员容易中毒;防治不及时,病虫害容易复发,造成病虫害防治的恶性循环,还导致病虫害抗药性增强等问题<sup>[2-3]</sup>。

欧美国家的果园为规模化种植模式,行距和株距统一规划,因此便于机械化作业。国外厂家以生产大中型高效喷雾机为主,多采用自走式、悬挂式或牵引式,普遍采用风送喷雾。国外植保机械多采用罩盖循环、风送式、静电喷雾、自动对靶、定向仿形控制等,实现了低喷量、精喷洒、少污染和高功效<sup>[4]</sup>。

国内果园多采用矮化密植种植模式,机械化施药器械存在入园难、伤果率高的问题,已不能适应我国果园的发展趋势。许多研究者对果园喷药机械以及静电喷雾、自动对靶、定向仿形喷雾和风送式喷雾作了大量研究并取得了一些科研成果,但研制的果园植保机械多为悬挂式、牵引式,机具尺寸偏大,并且国内大部分果园弥雾机配以轴流风机,但其环形喷头布置结构,使其雾滴在果树树冠分布不均匀,喷头与树冠距离不一,近处雾滴可能反弹,远处药液可能无法附着,并且不能对整个树冠进行定向喷雾<sup>[5-11]</sup>。每棵果树在不同的生长期,树冠生长高

度、树冠形状和冠层厚度都不尽相同,不同的果树之间差异更大,而针对这种果树差异的定向风送喷雾方法和装置具有明显的优势<sup>[12]</sup>。

自走式橡胶履带底盘具有结构紧凑、接地面积大、转弯半径小、跨沟越埂能力强等特点<sup>[13]</sup>,定向结构具有根据不同果树形状自由调节喷头达到喷药分布均匀的优势,因此本文设计一种高通过性履带自走式果园定向风送喷雾机,论述其工作原理和主要零部件的设计,并进行雾滴穿透性等试验。

## 1 整机结构与工作原理

## 1.1 整机结构

履带自走式果园定向风送喷雾机(图1)由机架、操纵系统、发动机、行走系统、传动系统、多自由度调节装置、高压喷雾系统和多路风送系统等组成,



图1 履带自走式果园定向风送喷雾机

Fig.1 Crawler self-propelled directional air-blowing orchard sprayer

1. 操纵室 2. 发动机 3. 行走机构 4. 药箱 5. 离心风机  
6. 多口分配器 7. 鸭嘴出风口 8. 褶皱管 9. 喷头 10. 多自由度调节装置

收稿日期: 2013-08-28 修回日期: 2013-10-08

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B10)和山东省科技发展计划资助项目(2011GNC11206)

作者简介: 张晓辉, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械设计及理论研究, E-mail: zhangxh@sdau.edu.cn

系统结构及组成如图2所示。

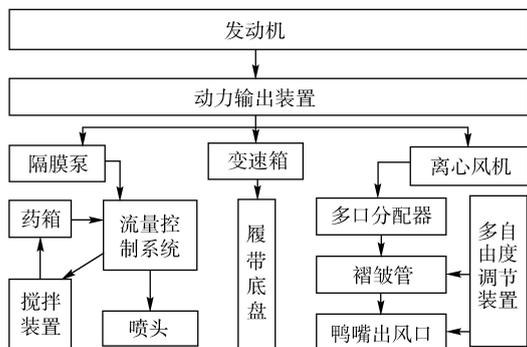


图2 履带自走式果园定向风送喷雾机系统结构框图

Fig.2 Schematic diagram of crawler self-propelled directional air-blowing orchard sprayer

主要技术参数为:整机尺寸(长×宽×高)2 600 mm×1 200 mm×2 100 mm,配套动力17 kW,最小离地间隙150 mm,药箱容积500 L,药泵流量0~80 L/min,风机风量7 419 m<sup>3</sup>/h,风机全压1 320 Pa,喷药作业速度1.1~2.7 km/h,总喷量10~12 L/min。

## 1.2 工作原理

发动机经胶带和多挡变速箱减速换向,分别驱动履带驱动轮、隔膜泵和离心风机,实现喷雾机的行走、喷药和送风。

根据果树形状,调节喷雾机后部多自由度调节装置的夹紧螺栓组,从而实现鸭嘴出风口和喷头在宽度、高度和角度方向的调整,以适应不同的果树形状达到定向喷雾。鸭嘴出风口安装在喷头的一侧,高压喷头喷出的药液被出风口高速气流二次雾化形成更细的雾滴,在气流的胁迫下吹向目标物。由于气流对枝叶的翻动作用,使得作物的叶背、叶面和上、下都可均匀着雾,提高农药受药量和均匀分布。该方法和装置提高了雾滴对靶性能、渗透性和农药利用率,减少了药液流失,保护生态环境。

## 2 传动系统和主要零部件设计

### 2.1 传动系统

传动系统主要由发动机、带轮、变速箱、换向器、传动轴和张紧轮等组成。图3为履带自走式果园定向风送喷雾机传动示意图。

根据作业要求,传动系统主要分为三路:一是履带行走传动系统,具体路线为发动机、输出胶带轮、胶带、变速箱胶带轮和多挡变速箱,通过变速箱左、右两输出轴带动驱动轮,驱动履带行走系统;二是风机动力传动系统,具体路线为发动机、输出胶带轮、胶带、换向器带轮、换向器、传动轴、离心风机胶带轮 I 和 II,带动离心风机旋转;三是隔膜泵动力传动系统,具体路线为发动机、输出胶带轮、胶带、变速箱胶

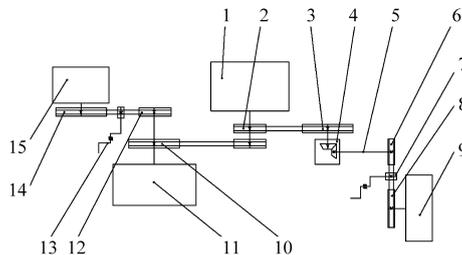


图3 履带自走式果园定向风送喷雾机传动示意图

Fig.3 Power train diagram of crawler self-propelled directional air-blowing orchard sprayer

1. 发动机 2. 发动机输出胶带轮 3. 换向器胶带轮 4. 换向器 5. 传动轴 6. 离心风机胶带轮 I 7. 张紧轮 I 8. 离心风机胶带轮 II 9. 离心风机 10. 变速箱胶带轮 11. 多挡变速箱 12. 隔膜泵胶带轮 I 13. 张紧轮 II 14. 隔膜泵胶带轮 II 15. 隔膜泵

带轮、隔膜泵胶带轮 I 和 II,带动隔膜泵旋转。在运输等非作业场合需要断开风机动力传动系统和隔膜泵传动系统,因此在传动系统中分别采用张紧轮 I 和 II,实现断开和连接。

## 2.2 履带行走系统设计与计算

### 2.2.1 驱动功率计算

根据文献[14],计算主动轮上的最大驱动力、力矩和功率为

$$F_q = \frac{G}{2} \left( f + \frac{\mu\lambda}{2} \right) \quad (1)$$

$$M_{\max} = F_q r \quad (2)$$

$$W_{\max} = F_q v_x \quad (3)$$

式中  $F_q$ ——主动轮最大驱动力, N  
 $M_{\max}$ ——主动轮最大力矩, N·m  
 $W_{\max}$ ——主动轮所需最大功率, kW  
 $G$ ——装满药后车体质量,取 1 600 kg  
 $r$ ——驱动轮节圆半径,取 0.115 m  
 $v_x$ ——驱动轮线速度, m/s  
 $f$ ——滚动阻力系数,取 0.1  
 $\mu$ ——转向阻力系数,取 0.6  
 $\lambda$ ——摩擦阻力系数,取 0.3

计算得  $F_q = 3\,355\text{ N}$ ,  $M_{\max} = 386\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $W_{\max} = 2.5\text{ kW}$ 。

### 2.2.2 驱动轮齿弯曲强度校核

已知参数:齿高  $h_c = 1\text{ cm}$ ,齿宽  $B = 2\text{ cm}$ ,齿数为 16 齿,齿根厚度为 2 cm,驱动轮材料为 40Cr 淬火。

查手册 40Cr 淬火后屈服应力  $\sigma_s = 785\text{ MPa}$ <sup>[15]</sup>,由于作业环境较差,取安全系数为 2,得出许用安全应力  $[\sigma] = 392.5\text{ MPa}$ 。计算驱动轮根部抗弯截面系数  $W = 3.3 \times 10^{-3}$ 。计算驱动轮根部弯曲应力为  $\sigma_F = F_q h_c / W = 173\text{ MPa} < [\sigma]$ ,验算合格。

## 2.3 多自由度调节装置设计

为了适应不同的果树形状,将喷雾机后部固定鸭嘴出风口和喷头的装置设为可调式。图4为多自

由度调节装置示意图。其调节原理为:

(1) 高度调节。固定支架在两侧方管垂直方向有与 U 型夹紧螺栓配合的两排螺栓孔,通过选用不同高度的螺栓孔与 U 型夹紧螺栓配合,可以调整高度调节方管在固定支架上的高度。松开夹紧螺栓组 II,可以调整 L 形调节圆钢在垂直方向上的高度。

(2) 宽度调节。宽度调节方管的一端套接在高度调节方管里,调整好所需宽度后,通过紧固螺栓将宽度调节方管紧固在高度调节方管上。

(3) 出风口和喷嘴角度调节。松开夹紧螺栓组 I,可以调节鸭嘴出风口和扇形喷头在 L 形高度调节圆钢水平端的角度。

通过上述结构实现高度、宽度和角度方向的调节,实现鸭嘴出风口和喷头对不同树冠(如纺锤形和树篱型)的定向风送喷雾。

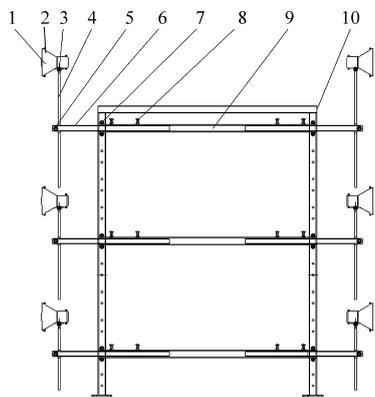


图 4 多自由度调节装置示意图

Fig. 4 Overall structure of multi-degree of freedom adjustment device

1. 鸭嘴出风口 2. 喷头 3. 夹紧螺栓组 I 4. L 形调节圆钢
5. 夹紧螺栓组 II 6. 宽度调节方管 7. U 型夹紧螺栓 8. 紧固螺栓
9. 高度调节方管 10. 固定支架

## 2.4 风送系统设计

### 2.4.1 风量的确定

风送式喷雾机中风速的确定遵循置换原理<sup>[16]</sup>,即风机吹出携带有雾滴的气流,能驱除且置换风机两侧到果树这部分空间的全部空气。此外,为了翻动枝叶、驱除果树中原有的空气,风速不能太低。如果风速太低,吹出的气流进不了树体内部,只能绕树而行,所以设计的喷雾机的风量应大于其置换的空气量。图 5 为喷雾机风量置换图,图中  $v_1$ 、 $v_2$  分别为出风口风速和气流到达植株时的风速, $v$  为喷雾机速度。根据风量置换原理,这时风机吹出的最小风量  $Q$  为图中粗线长方体的体积,即

$$Q/2 > vK(H+h)L/2 \quad (4)$$

式中  $Q$ ——风机风量,  $m^3$

$v$ ——喷雾机速度,取  $0.33 \sim 0.74 \text{ m/s}$

- $h$ ——最高和最低鸭嘴出风口高度,取  $1 \sim 2 \text{ m}$
- $H$ ——果树高低树冠之间距离,取  $1.5 \sim 2.5 \text{ m}$
- $L$ ——喷头至果树的距离,取  $0.2 \sim 0.4 \text{ m}$
- $K$ ——气流衰减和沿途损失确定的系数,一般为  $1.1 \sim 1.2$

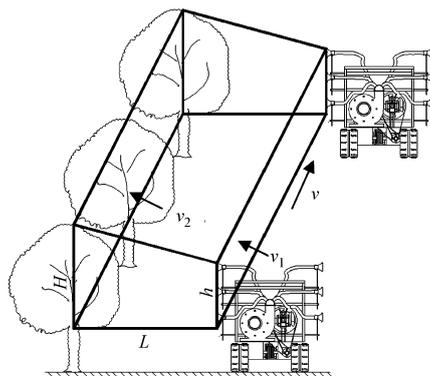


图 5 履带自走式果园定向风送喷雾机风量置换图

Fig. 5 Air displacement diagram of crawler self-propelled directional air-blowing orchard sprayer

将各参数代入式(4)得  $Q$  为  $0.2 \sim 1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,考虑到储备及褶皱管对风量的损失,最终取  $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

### 2.4.2 风压的确定

风机的全压主要包括动压损失,静压损失(摩擦压力和局部压力),计算式为:

动压损失

$$p_d = \rho v_f^2 / 2 \quad (5)$$

摩擦压力损失

$$p_m = \frac{\eta}{2R} \frac{\rho v_f^2}{2} l \quad (6)$$

局部压力损失

$$p_j = \xi \rho v_f^2 / 2 \quad (7)$$

式中  $\rho$ ——空气密度,取  $1.22 \text{ kg/m}^3$

$v_f$ ——气流速度,取  $30 \text{ m/s}$

$\eta$ ——摩擦因数,取  $0.1$

$R$ ——输送管道半径,取  $0.04 \text{ m}$

$\xi$ ——局部阻力系数,取  $0.3$

$l$ ——风管长度,取  $2 \text{ m}$

计算得总压为  $p = p_d + p_m + p_j = 1400 \text{ Pa}$ 。

风机功率计算公式<sup>[17]</sup>为

$$N = \frac{Qp}{1000\eta_i\eta_m} \quad (8)$$

式中  $N$ ——风机轴功率,  $\text{kW}$

$\eta_m$ ——机械效率,取  $0.9$

$\eta_i$ ——叶轮效率,取  $0.98$

计算得  $N = 3.2 \text{ kW}$ 。

## 3 样机性能试验

依据 NY/T992—2006《风送式果园喷雾机作业

质量》等行业标准,分别对样机进行了喷雾量测定、有无风送时雾滴沉积量测量和定向喷雾与普通喷雾雾滴沉积密度测定。试验介质为常温下不含固体悬浮物的清水或体积分数为0.01%的甲基紫溶液。试验用液体的温度和试验地点的气温为20℃,自然风速小于1 m/s,鸭嘴出风口平均风速为19 m/s,距离出风口25 cm处风速为10 m/s。

### 3.1 喷雾量测定

试验用液体为不含悬浮物杂质的清水,启动发动机,连接隔膜泵,调整喷雾压力为0.3、0.4、0.5、0.6和0.7 MPa开始喷雾。利用量筒收集各个喷头喷出的液体,测定时间为30 s,用电子秤称出各量筒收集的液体质量并记录,试验重复10次,不同压力下喷头平均喷量、总喷量、标准差、变异系数如表1所示。

表1 不同压力下喷头喷雾量

Tab.1 Volume of spray nozzle under different pressure

压力 /MPa	平均喷量/mL	总喷量/mL	标准差	变异系数/%
0.3	705.1	4230.5	13.35	0.32
0.4	757.7	4546.3	47.68	6.29
0.5	842.3	5053.8	30.02	3.56
0.6	866.5	5198.7	37.35	4.31
0.7	882.3	5293.8	48.54	5.50

为了形象地表示一定压力下各个喷头喷雾量波动趋势以及不同压力下喷雾总量变化趋势,对试验数据进行处理,得到不同压力下各个喷头喷雾量变化折线图,如图6所示。

从表1和图6看出,各喷雾压力下各个喷头喷雾量变异系数比较小,即当喷雾压力一定时各喷头喷雾量有较小波动并在误差范围内。随着喷雾压力的升高,喷雾量也相应增大,但增大幅度减缓。

### 3.2 雾滴沉积量测定

为了对比有风送和无风送时雾滴沉积量的差异,进行了如下步骤的试验:

(1) 选择试验用植株为冠层直径3.3 m,冠层高度2.1 m的连续3棵植株,株距为3.6 m。试验用液体为体积分数0.01%的甲基紫溶液。

(2) 将植株分为上、中、下3层,每层布12个点,每个固定点上用曲别针将6 cm × 8 cm的长条滤纸片紧固于植株叶片表面(图7)。

(3) 启动样机,以低速3挡2.7 km/h速度行走,同时启动隔膜泵和离心风机,进行有风送喷药。

(4) 喷药完成后,待滤纸片干燥后收集滤纸至自封袋,每个自封袋放一片滤纸且标记好。

(5) 用分光光度计对所收回的滤纸片进行吸光

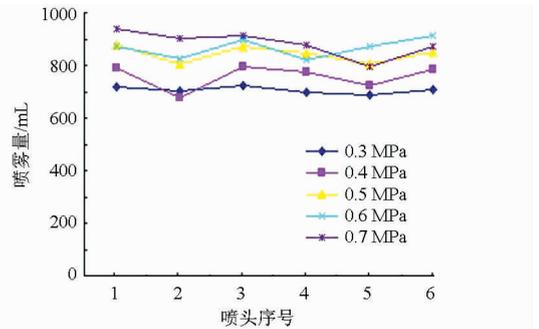


图6 不同压力下各个喷头喷雾量变化

Fig.6 Change of spray nozzle volume under different pressure



图7 雾滴沉积性能试验

Fig.7 Droplets deposition performance test

值测定,然后求出浓度,继而求出沉积量并记录。

(6) 同样试验条件下,关闭离心风机,重复以上步骤,测定无风时的沉积量。试验结果如表2所示。

表2 雾滴沉积量

Tab.2 Deposit rate of droplets

布点编号	有风送			无风送		
	上	中	下	上	中	下
	1	4.65	3.85	2.73	2.86	2.25
2	6.03	12.08	7.60	4.14	8.20	6.03
3	9.42	18.16	9.90	10.38	13.58	10.51
4	13.20	8.24	5.16	8.36	11.50	4.97
5	17.58	9.87	4.87	11.79	9.23	5.74
6	7.95	15.72	3.37	6.76	8.52	2.83
7	18.32	9.29	8.33	13.93	4.20	3.43
8	1.624	8.24	5.00	11.79	6.73	2.31
9	9.16	6.28	7.95	9.42	5.03	5.32
10	5.45	3.82	6.09	3.50	2.76	4.81
11	11.44	5.32	4.65	9.29	4.65	3.69
12	5.32	9.13	7.21	2.79	6.44	5.93
平均值	10.40	9.17	6.07	7.92	6.93	4.76
变异系数/%	4.75	4.82	3.54	4.87	4.97	4.94

试验结果表明,有风送时比无风送时雾滴沉积量提高了42.9%,变异系数降低了18.5%,风送效果明显。

### 3.3 定向喷雾和普通喷雾对比试验

本样机可利用多自由度调节装置对鸭嘴出风口

和喷头进行全方位调节,以适应不同的果树形状达到定向喷雾,为此进行了普通喷雾和定向喷雾对比试验。两种喷雾形式对比如图 8 所示。普通喷雾所用试验样机为山东农业大学研制的 3MG-30 型果园弥雾机,定向喷雾所用试验样机即为本样机(图 9)。试验中的树为纺锤形,其冠层上部和下部靠

里,而中部凸出,本机具可以根据此树特点对多自由度调节装置上部和底部横杆宽度加大,中部横杆宽度减小,同时上部鸭嘴出风口和喷头适当向下旋转,下部鸭嘴出风口和喷头适当向上旋转,这样调节可实现定向喷雾。两种机具实际试验情况如图 8 所示。

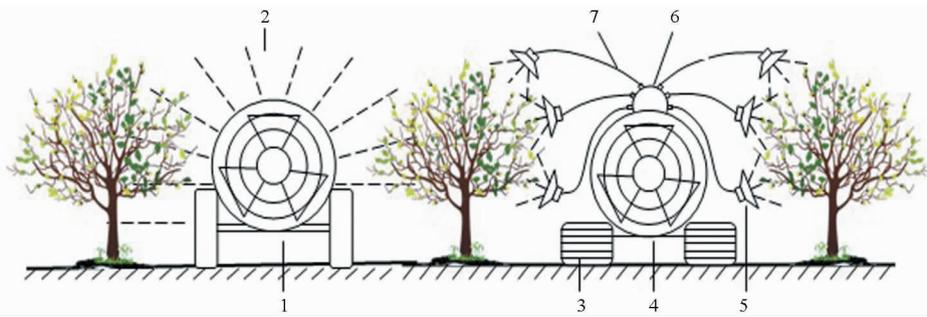


图 8 普通和定向喷雾对比示意图

Fig. 8 Diagram of two kinds of spraying comparison

1、4. 离心风机 2. 扇形喷头环形喷雾 3. 履带 5. 鸭嘴出风口和喷头 6. 多口分配器 7. 褶皱输风管和输液管



(a)



(b)

图 9 试验用样机

Fig. 9 Two kinds of experimental prototype

(a) 3MG-30 型果园弥雾机 (b) 履带自走式果园定向风送喷雾机

试验数据如表 3 所示。

表 3 定向喷雾和普通喷雾雾滴个数

Tab. 3 Number of droplets under two spraying

布点编号	普通喷雾			定向喷雾		
	上	中	下	上	中	下
1	28	32	21	19	32	35
2	40	44	39	43	59	53
3	8	39	40	49	62	38
4	12	21	21	56	37	43
5	24	23	42	58	28	60
6	52	38	35	31	62	46
7	6	49	40	21	35	48
8	48	20	51	23	37	35
9	7	16	8	15	45	51
10	49	51	47	25	51	48
平均值	27.4	33.3	34.4	34	44.8	45.7
变异系数/%	0.683	0.383	0.392	0.473	0.288	0.177

试验结果表明,与普通喷雾相比,定向喷雾雾滴个数提高了 30.9%,变异系数降低了 55.3%,多自由度调节装置设计合理,定向喷雾效果良好。

### 4 结论

(1) 根据密植果园的特点设计了窄机身的履带自走式果园定向风送喷雾机。该作业机结构紧凑,行动灵活,也可适应不同树形,作业幅度可调,单个喷头到树冠的距离可调,可根据不同树形调节喷头位置使其达到定向仿形效果,并提高了对靶性能。

(2) 试验表明,有风送时雾滴沉积量比无风送时提高了 42.9%,变异系数降低了 18.5%;定向喷雾比普通喷雾雾滴个数提高了 30.9%,变异系数降低了 55.3%。样机雾滴沉积性能和定向喷雾性能良好,提高了农药利用率。

## 参 考 文 献

- 1 何雄奎,严荷荣,储金宇,等.果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究[J].农业工程学报,2003,19(6):78-80.  
He Xiongkui, Yan Herong, Chu Jinyu, et al. Design and testing of the automatic target detecting, electrostatic, air assisted, orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(6):78-80. (in Chinese)
- 2 宋坚利,何雄奎,曾爱军,等.三种果园施药机械施药效果研究[J].中国农机化,2006(5):79-82.  
Song Jianli, He Xiongkui, Zeng Aijun, et al. Spraying quality of three kinds of orchard plant protection equipments[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2006(5):79-82. (in Chinese)
- 3 傅泽田,祁力钧.国内外农药使用状况及解决农药过量使用问题的途径[J].农业工程学报,1998,14(2):7-12.  
Fu Zetian, Qi Lijun. Over-use of pesticide and approaches to reduce pesticide dosage[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2):7-12. (in Chinese)
- 4 杨学军,严荷荣,徐赛章,等.植保机械的研究现状及发展趋势[J].农业机械学报,2002,33(6):129-131.  
Yang Xuejun, Yan Herong, Xu Saizhang, et al. Current situation and development trend of equipment for crop protection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002,33(6):129-131. (in Chinese)
- 5 张晓辉,郭清南,李法德,等.G-30型果园弥雾机的研制与试验[J].农业机械学报,2002,33(3):30-33.  
Zhang Xiaohui, Guo Qingnan, Li Fade, et al. Development of G-30 orchard mist sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002,33(3):30-33. (in Chinese)
- 6 王万章,洪添胜,李捷,等.果树农药精确喷雾技术[J].农业工程学报,2004,20(6):98-101.  
Wang Wanzhang, Hong Tianshen, Li Jie, et al. Review of the pesticide precision orchard spraying technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(6):98-101. (in Chinese)
- 7 陶雷.弧型罩盖减少药液雾滴飘失的理论与试验研究[D].北京:中国农业大学,2004.  
Tao Lei. Theory and trial research on the arc shield in reducing spray drift[D]. Beijing: China Agricultural University,2004. (in Chinese)
- 8 李丽,宋坚利,何雄奎.农作物喷雾靶标自动探测器设计与应用[J].农业机械学报,2010,41(7):54-56.  
Li Li, Song Jianli, He Xiongkui. Design and application of crop automatic target detection device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):54-56. (in Chinese)
- 9 张建瓴,陈树军,可欣荣,等.仿形喷雾装置的设计及分析[J].现代制造工程,2006(1):120-122.
- 10 邱威,丁为民,汪小崑,等.Z-700型自走式果园风送定向喷雾机[J].农业机械学报,2012,43(4):26-30.  
Qiu Wei, Ding Weimin, Wang Xiaochan, et al. Z-700 self-propelled air-blowing orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(4):26-30. (in Chinese)
- 11 李超,张晓辉,姜建辉,等.葡萄园立管风送式喷雾机的研制与试验[J].农业工程学报,2013,29(4):71-78.  
Li Chao, Zhan Xiaohui, Jiang Jianhui, et al. Development and experiment of riser air-blowing sprayer in vineyard[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(4):71-78. (in Chinese)
- 12 张晓辛,吕晓兰,丁素明,等.果园风送式喷雾机仿形喷雾试验研究[J].中国农机化,2011(3):68-72.  
Zhang Xiaoxin, Lü Xiaolan, Ding Suming, et al. Experimental research on profiling spray of air-assisted orchard sprayer[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(3):68-72. (in Chinese)
- 13 王家胜,尚书旗.自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验[J].农业工程学报,2012,28(12):38-43.  
Wang Jiasheng, Shang Shuqi. Development and experiment of double-row self-propelled carrots combine[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(12):38-43. (in Chinese)
- 14 Merhof W, Hackbarth E M. 履带车辆行驶力学[M].韩雪海,译.北京:国防工业出版社,1989:71-77,86-87.
- 15 闻邦椿.机械设计手册:第5册[M].北京:机械工业出版社,2010.
- 16 戴奋奋.风送喷雾机风量的选择与计算[J].植物保护,2008,34(6):124-127.  
Dai Fenfen. Selection and calculation of the blowing rate of air-assisted sprayer[J]. Plant Protection, 2008,34(6):124-127. (in Chinese)
- 17 机械工程手册编辑委员会.机械工程手册——机械产品(四)[M].北京:机械工业出版社,1982.
- 18 Jones K M, Boundl S A, Oakford M J. Spray application technology[J]. Plant Growth Regulation, 2000,31(3):173-181.
- 19 Sumner P E. Experiences with pecan air blast sprayers[C]// ASAE/CSAE 2004 Annual International Meeting, 2004.
- 20 Paul E Sumner. Experiences with pecan air blast sprayers[R]. 2004 SAE Annual Meeting, 2004.
- 21 Tsay J R, Liang L S, Lu L H. Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a non-canopy condition using CFD simulation[J]. Transactions of the ASAE, 2004,47(6):1887-1897.

[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 4081–4086.

- 21 Jiang Z M, Wang L Z, Wu W, et al. Biological activities and physicochemical properties of Maillard reaction products in sugar-bovine casein peptide model systems[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3837–3845.
- 22 Gu F L, Kim J M, Hayat K, et al. Characteristics and antioxidant activity of ultrafiltrated Maillard reaction products from a casein-glucose model system[J]. Food Chemistry, 2009, 117(1): 48–54.
- 23 Fu L, Xu B T, Xu X R, et al. Antioxidant capacities and total phenolic contents of 62 fruits[J]. Food Chemistry, 2011, 129(2): 345–350.
- 24 Adhikari K, Heymann H, Huff H. Textural characteristics of low fat, full fat and smoked cheeses: sensory and instrumental approaches[J]. Food Quality and Preference, 2003, 14(3): 211–218.
- 25 Mao X Y, Ni J R, Sun W L, et al. Value-added utilization of yak milk casein for the production of angiotensin-I-converting enzyme inhibitory peptides: a review [J]. Food Chemistry, 2007, 103(4): 1282–1287.

## Optimization of Combined Fermentation Starter of Milk Dried Residue in Pastoral Areas by Response Surface Methodology

Wen Pengcheng<sup>1</sup> Wang Jun<sup>1</sup> Ren Fazheng<sup>2</sup> Han Ling<sup>1</sup> Wang Linlin<sup>1</sup> Ji Yinli<sup>3</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Gansu Hualing Bio-technical Research Center, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Skimmed yak milk was selected for this research and the titratable acidity at 3.5 h as the test indicator. Box – Behnken central composite experiment was designed based on optimal combination of fermentation starters to research the effect of *Lactobacillus delbrueckii subsp bulgaricus* (MGD1 – 3), *Streptococcus thermophilus* (MGB39 – 5), *Streptococcus thermophilus* (G81 – 1), and *Lactobacillus plantarum* (BM5152), which were screened from pastoral areas to the titratable acidity. The result showed that the optimal combination of fermentation starters was MGD1 – 3 3.06%, MGB39 – 5 0.64%, G81 – 1 0.55%, and BM5152 2.04% and the titratable acidity was 75.87°T. In order to facilitate the practical operation, the proportion of MGD1 – 3: MGB39 – 5: G81 – 1: BM5152 = 30: 6: 5: 20 and 6.0% of inoculum size based on volume fraction were selected. Under these conditions, the average titratable acidity was 74.21°T of three parallel trials. Compared with the sensory and physical and chemical indicators of milk dried residue came from optimized combination of fermentation starters and pastoral areas, the result showed that the optimized combination of fermentation starters was reliable.

**Key words:** Milk dried residue Lactic acid bacteria Response surface design Titratable acidity

(上接第 122 页)

## Self-propelled Crawler Directional Air-blowing Orchard Sprayer

Zhang Xiaohui Jiang Zongyue Fan Guoqiang Cao Longlong

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

**Abstract:** A kind of self-propelled crawler directional air-blowing orchard sprayer was developed. The working principle and transmission line of the machine were introduced firstly. Adopting theoretical calculation, the design of whole structure and the technical parameters of the key components were determined. In order to achieve the directional spraying, the multi-degree of freedom framework was designed. The experiment showed that, compared with no wind spraying, the deposit rate of droplets increased by 42.9% and the coefficient of variation decreased by 18.5%. Compared with ordinary spraying, the number of droplets increased by 30.9% and the coefficient of variation decreased by 55.3%.

**Key words:** Orchard sprayer Crawler self-propelled Directional air-blowing spraying Experiment