doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004

矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化

程浈浈　祁力钧　吴亚垒　程一帆　杨知伦　高春花
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：针对矮化密植果园作业特点，设计了一种具有多角度变速摇摆喷头功能的电力驱动果园喷雾机。基于 Box－Behnken 原理设计四因素三水平的中心组合试验，并结合响应面分析法研究了喷雾流量、喷雾距离、喷雾机行走速度和喷头摆动速度对雾滴分布均匀性的影响；以雾滴分布变异系数为响应值创建二次多项式模型，并利用软件 Design-Expert 8.0 对模型进行分析和优化，得到喷雾参数的最佳组合。结果表明：各因素对喷雾分布变异系数的影响大小顺序依次是：喷头摆动速度、喷雾距离、喷雾流量、喷雾机行走速度；喷雾参数的最佳组合为：喷雾流量 375.20 mL/min、喷雾距离 1.72 m、喷雾机行走速度 0.14 m/s、喷头摇摆速度 16.19(°)/s，此时雾滴分布变异系数为 11.471%。

关键词：果园；喷雾机；喷雾参数；响应面法
中图分类号：S491　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2017)S0-0022-08

Parameter Optimization on Swing Variable Sprayer of Orchard Based on RSM

CHENG Zhenzhen　QI Lijun　WU Yalei　CHENG Yifan　YANG Zhilun　GAO Chunhua
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: According to modern orchard planting pattern, a new self-propelled electric sprayer with multi-angle variable speed swing nozzle function was developed to accommodate the small space and the poor traffic-ability of conventional orchards which are densely planted with dwarf plants. A 4 factors and 3 levels of test was performed according to the Box－Behnken center-united experimental design principles. To find influence factors of droplets deposition distribution, the parameters were analyzed by using response surface methodology including spraying flow rate, spraying distance, angular swing speed and sprayer forward velocity. Subsequently, a mathematical model was established by using Design-Expert software, then the effects of various parameters and their interactions were discussed. The results showed that the effects order of the four parameters on distribution of droplets deposition ranked from large to small as: sprinkler swing speed, spraying distance, spraying flow rate, and sprayer forward velocity. The optimal spraying parameters should be spraying flow rate at 375.20 mL/min, spraying distance of 1.72 m, sprayer forward velocity of 0.14 m/s and angular swing speed of 16.19 (°)/s, then the coefficient of variation of droplets distribution of 11.471% was obtained.

Key words: orchards; spray machine; spray parameters; response surface method

引言

果树矮化密植是我国现代化标准果园栽培的主要发展方向，一方面合理矮化密植可显著提高果园经济效益，但其冠层低矮稠密，导致作业环境密闭，喷雾机施药效果不佳。针对密植果园低矮稠密的冠层特点，开发专用的高效施药技术装备是广大科研工作者追求的目标[1-5]。

目前，现代化果园喷雾机械装备开发已取得较大进展。国内研究主要集中在仿形喷雾、对靶喷雾和变量喷雾等智能领域[6-8]，研制了一批新型风送式喷雾机。如姜红花等[9]设计履带自走式自动对

收稿日期：2017－07－15　修回日期：2017－11－23
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFD0701400、2016YFD0200708)
作者简介：程浈浈(1994—)，女，硕士生，主要从事图像处理与模式识别研究，E-mail：zhenzhenc1994@163.com
通信作者：祁力钧(1963—)，男，教授，主要从事农业装备与计算机测控研究，E-mail：qilijun@cau.edu.cn

靶喷雾机，研发出有效靶标的间歇性喷雾装置，节省了农药使用量；周良福等[10]将双侧气流辅助和仿形技术结合，设计了可根据冠层尺寸来调节喷雾位置的圆盘式喷雾机；李龙龙等[11]研制了可独立调节风量与喷雾量的雾化单元，并结合仿形技术，为果园植保装备提供新方法。国外研究方面，DUGA 等[12]研究不同果树树冠结构特征下果园喷雾机雾滴沉积模型，分析与树冠结构相适应的喷雾机机械特性是施药均匀性和有效性的关键。CROSS 等[13-14]优化轴流风机果园喷雾机风量以适应低矮果树喷雾，得出树型对轴流风机喷雾漂移量影响巨大。但总体上，前人所研制的喷雾机大多为柴油或汽油动力机具，采用拖拉机悬挂或牵引配套作业，维护成本较高；机具尺寸偏大，在低矮密植型果园中通过性能差；施药人员需跟随机具入园，暴露在高浓度施药环境中，易引发农药中毒。

为解决上述问题，本文研究一种适用于低矮果园的摇摆式变量电力驱动喷雾机，以雾滴分布变异系数为指标，分析各喷雾参数下不同水平及其交互作用对雾滴分布均匀性的影响，获取关键影响因素和最优喷雾参数水平组合，以期优化密植型果园喷雾机工作参数。

1　试验装置与方法

1.1　喷雾机

如图 1 所示，矮化密植果园摇摆变量喷雾机装置主要由喷射机构、摇摆机构、行走机构组成。喷射机构包括轴流风机、喷头体及各输气、输液管等，其中喷头体选用气液双流喷头。摇摆机构设计为由 2 个步进电动机驱动喷头体旋转喷雾，电动机启动时带动喷头体产生某一方向的转动，行程开关的触头一旦碰触与其对应的限位挡片，将自动断开电路，沿此方向的运动将被停止，同时沿相反方向的电路启动，电动机开始反方向运转，其具体摇摆角度由 2 个限位挡片的紧固位置来控制，根据实际施药环境调节喷头摇摆角度范围以达到最佳的施药效果。行走机构包括驱动电池、行走电动机和前后 2 个红外避障传感器装置，红外探头接受信号后传达至单片机以控制行走电动机达到前进、后退和自动返回 3 种工作模式。整车采用蓄电池为动力，低碳节能，作业危险系数低。喷雾机性能参数见表 1。

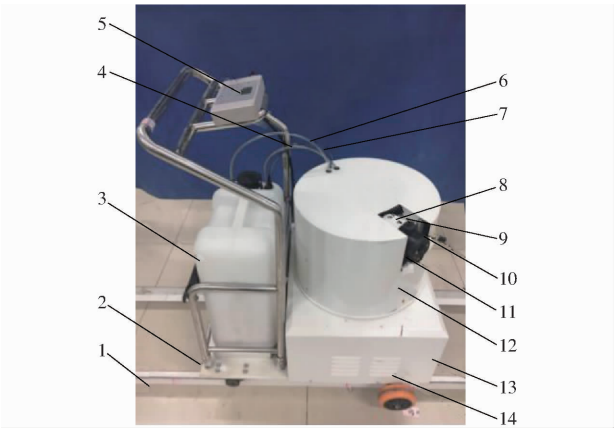


图 1　摇摆变量喷雾机

Fig. 1　Swing automatic variables sprayer

1. 轨道　2. 后避障传感器　3. 药箱　4. 进液管　5. 控制面板　6. 回流管　7. 输气管　8. 上下摇摆机构　9. 手动调节流量按钮　10. 喷头体　11. 限位开关　12. 左右摇摆机构　13. 前避障传感器　14. 电源

表 1　喷雾机性能参数

Tab. 1　Performance parameters of sprayer

参数	数值
药箱额定容量/L	10
摆药泵流量/($L\cdot min^{-1}$)	0 ~ 6.85
摆动角度范围/(°)	-15 ~ 45
喷雾流量/($mL\cdot min^{-1}$)	0 ~ 600
喷雾距离/m	0 ~ 8
喷雾机行走速度/($m\cdot s^{-1}$)	0 ~ 0.42

1.2　试验方法

雾滴在目标上的分布均匀性是影响病虫害防护的关键，通常用分布变异系数表示。由于受实际施药环境等客观条件限制，影响喷雾质量的因素错综复杂。雾滴分布均匀性受喷头类型、喷雾流量、使用参数（如喷雾压力、行走速度等）等因素制约[15-16]。因此，为验证喷雾机喷雾模型均匀性和获取最佳变量作业条件，选取喷雾参数为因素，根据中心组合设计原理优选不同水平组合试验，测试各试验条件下的雾滴布分变异系数，采用 Design-Expert 8.0 软件对试验结果进行分析，建立数学回归模型，并对响应面结果进行分析和优化。

1.3　试验布置

试验采样点布置如图 2 所示。其中 A、B、C 代表靠近喷雾机一侧的前冠层、中冠层、后冠层；a、b、c 代表沿喷雾机前进方向的前、中、后三冠层截面。

高度方向上，以果树冠径最大处（大约距树底 1.0 ~ 1.5 m 处）为基准，将果树树冠分为上、中、下 3 层，高度分别为 0.8、1.2、1.8 m；深度方向上，以树干为中心，沿冠层内风送方向，间距 0.5 m，从靠近喷雾机一侧依次将果树分为冠层前、冠层中、冠层后 3 层；宽度方向上，沿喷雾机前进方向，间距 0.5 m，在冠层内截取前、中、后 3 层截面。布样时认为树冠对称分布，把 3 层面交叉点作为布样点，在其正、反面布置直径 11 cm 的滤纸。

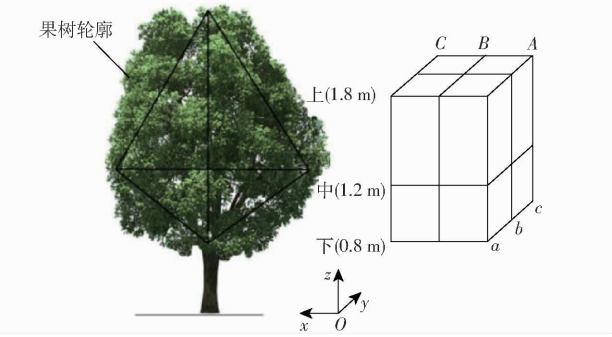


图 2 采样点布置

Fig. 2 Sampling points distribution

1.4 试验仪器

UV－2102PCS 型紫外可见分光光度计测定采集喷雾药液的浓度；Kestrel 4500 型环境测试仪和 TYQ－02 型风速计用于环境温度、相对湿度和风速的测量和记录。

1.5 试验设计

通过单因素试验，确定响应面法试验设计的因素和水平。选取喷雾流量、喷雾距离、喷雾机行走速度和喷头摆动速度 4 个试验因素；选取雾滴分布变异系数为响应值 Y。根据 Box－Behnken 试验方案进行四因素三水平响应面分析试验，共 29 个试验点，其中包括 24 个分析因子，5 个零点误差。中心组合试验方案中的因素水平如表 2 所示。

表 2 响应面分析法的因素与水平

Tab. 2 Factors and levels of response surface method

水平	因素			
	喷雾流量 x_1/(mL·min^{-1})	喷雾距离 x_2/m	喷雾机行走速度 x_3/(m·s^{-1})	喷头摆动速度 x_4/((°)·s^{-1})
－1	265	1.2	0.08	14
0	395	1.8	0.14	18
1	525	2.4	0.20	22

1.6 试验流程

试验在中国农业大学植保机械实验室进行，试验树种为纺锤形型果树，其结构特点是树冠上小下大、平均冠幅约 1.5 m，树高约 2.5 m。试验过程如下：

(1)试剂配制

现场配制试剂，用 0.5 g/L 的胭脂红溶液作为模拟农药进行喷洒。

(2)确定试验条件

试验当天 10:00—18:00 室内最高温度为 27℃，最低温度为 10℃，平均温度为 20.56℃；最大相对湿度为 29.7%，最小相对湿度为 17.5%，平均相对湿度为 23.60%；实验室内密闭无自然风，喷雾机风机稳定工作风速 50 m/s。喷雾机各机构正常工作。

(3)试验和采集样品

按照图 2 所示布置采点、表 2 所示的设计表调整喷雾机试验喷雾参数。喷雾时，喷雾机沿水平直线行走，喷头朝向果树上下摆动喷雾。喷雾后 10～20 min 待雾滴沉降、滤纸变干，将滤纸收集到干燥的采样瓶中，并用 10 mL 的蒸馏水将滤纸上的胭脂红洗脱下来。

(4)计算雾滴分布变异系数

收集胭脂红溶液，采用分光光度计测定液体中胭脂红溶液的浓度，计算滤纸上的雾滴沉积量。本文采用分布变异系数[17]作为各采样区浓度分布均匀性的指标，计算公式[18]为

$$C_v = \frac{S}{\overline{X}} \times 100\% \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2}{n-1}} \tag{2}$$

式中 C_v——雾滴分布变异系数，%

S——滤纸雾滴沉积量标准差

$\overline{X}$——滤纸雾滴沉积量平均值

n——每层采样卡总数

2 试验结果与讨论

2.1 试验结果

按照试验设计方案进行试验，采用 Design-Expert 8.0 进行试验数据处理和响应面分析。表 3 为响应面法试验设计及结果，表中 X_1～X_4 表示各因素的编码值。

2.2 RSM 建模及分析

在各种响应面法中，二次多项式响应面法应用较为广泛[19]。二次多项式回归模型的一般表达式为

$$Y = \beta_o + \sum_{i=1}^{k} \beta_i \chi_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} \chi_i^2 + \sum_{i<j}^{k} \beta_i \chi_i \chi_j + \varepsilon \tag{3}$$

应用式(3)对表 3 数据进行多项式回归分析，建立喷雾机喷雾均匀性模型，得到分布变异系数对编码自变量二次多项回归方程

$$Y = 11.56 + 0.054X_1 + 0.24X_2 + 0.028X_3 + 0.31X_4 - 0.070X_1X_2 - 0.042X_1X_3 - 0.23X_1X_4 + 0.073X_2X_3 + 0.077X_2X_4 - 0.042X_3X_4 + 0.47X_1^2 + 0.89X_2^2 + 0.17X_3^2 + 0.39X_4^2 \tag{4}$$

需要对该回归模型进行方差分析以验证它的适用性[17]。回归模型的方差分析如表 4 所示。P 值表示回归模型的显著程度，当 $P < 0.05$ 时，表明该该项指标显著。从表 4 的分析结果可知，模型的 $P < 0.0001$ 说明模型极显著；模型失拟项表示模型

表 3　响应面分析及结果

Tab. 3　Results of response surface analysis

试验序号	X_1	X_2	X_3	X_4	Y/%
1	−1	−1	0	0	12.62
2	1	−1	0	0	12.80
3	−1	1	0	0	13.29
4	1	1	0	0	13.19
5	0	0	−1	−1	11.95
6	0	0	1	−1	11.87
7	0	0	−1	1	12.39
8	0	0	1	1	12.48
9	−1	0	0	−1	11.77
10	1	0	0	−1	12.40
11	−1	0	0	1	12.72
12	1	0	0	1	12.45
13	0	−1	−1	0	12.42
14	0	1	−1	0	12.52
15	0	−1	1	0	12.42
16	0	1	1	0	12.81
17	−1	0	−1	0	12.23
18	1	0	−1	0	12.25
19	−1	0	1	0	12.16
20	1	0	1	0	12.35
21	0	−1	0	−1	12.2
22	0	1	0	−1	12.71
23	0	−1	0	1	12.90
24	0	1	0	1	13.72
25	0	0	0	0	11.53
26	0	0	0	0	11.78
27	0	0	0	0	11.72
28	0	0	0	0	11.32
29	0	0	0	0	11.47

表 4　方差分析

Tab. 4　Variance analysis

来源	响应值				
	平方和	自由度	均方	F	P
X_1	0.035	1	0.035	1.16	0.299 3
X_2	0.69	1	0.69	22.81	0.000 3
X_3	9.075×10^{-3}	1	9.075×10^{-3}	0.3	0.592 9
X_4	1.18	1	1.18	38.87	<0.000 1
X_1X_2	0.02	1	0.02	0.65	0.434 7
X_1X_3	7.225×10^{-3}	1	7.225×10^{-3}	0.24	0.632 9
X_1X_4	0.2	1	0.2	6.68	0.021 6
X_2X_3	0.021	1	0.021	0.69	0.418 9
X_2X_4	0.024	1	0.024	0.79	0.388 3
X_3X_4	7.225×10^{-3}	1	7.225×10^{-3}	0.24	0.632 9
X_1^2	1.44	1	1.44	47.46	<0.000 1
X_2^2	5.16	1	5.16	170.35	<0.000 1
X_3^2	0.2	1	0.2	6.44	0.023 7
X_4^2	0.97	1	0.97	32.08	<0.000 1
模型	8.2	14	0.59	19.33	<0.000 1
误差	0.42	14	0.03		
失拟项	0.28	10	0.028	0.81	0.644 6
净误差	0.14	4	0.035		
总离差	8.63	28			

预测值与试验测量值不拟合的概率。表中失拟项 $P>0.05$，失拟项不显著，说明回归模型与实际拟合良好。

各因素对响应指标影响的显著性由 F 检验得到，P 值越小则自变量对响应值影响越显著。根据表 4 的分析结果可以看出各因素在所选取的水平范围内对喷雾变异系数的影响大小顺序依次为喷雾摇摆速度、喷雾距离、喷雾流量、喷雾机行走速度；在三因素交互作用下，它们对喷雾变异系数的影响因素大小顺序依次为：X_1X_4、X_2X_4、X_2X_3、X_1X_2、X_1X_3、X_3X_4。对雾滴分布模型影响因素极显著（$P<0.01$）的因素有 X_2、X_4、X_1^2、X_2^2、X_4^2；显著影响因素（$P<0.05$）有 X_1X_4、X_3^2；不显著影响（$P>0.05$）因素有 X_1、X_3、X_1X_2、X_1X_3、X_2X_3、X_2X_4、X_3X_4。

在保证模型极显著、失拟项不显著的基础上去掉不显著项，模型简化为

$$Y=11.56+0.054X_1+0.24X_2+0.028X_3+0.31X_4-0.23X_1X_4+0.47X_1^2+0.89X_2^2+0.17X_3^2+0.39X_4^2 \tag{5}$$

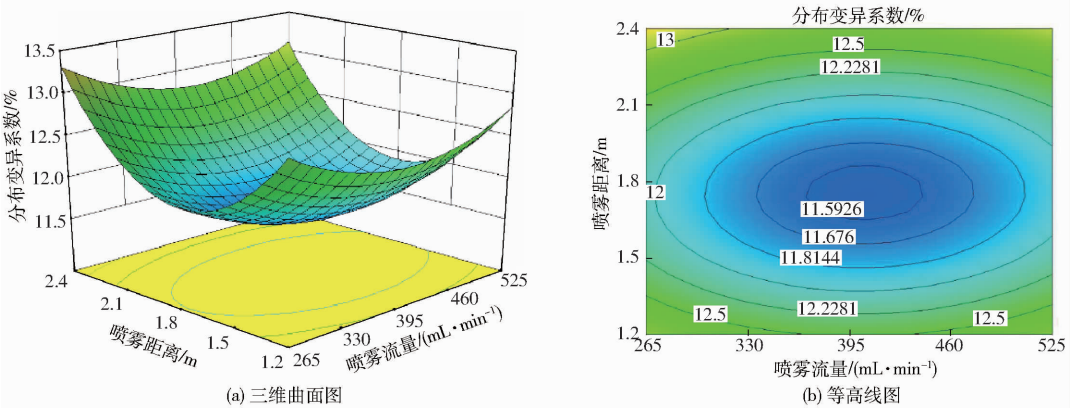
优化后模型的决定系数 R^2 为 0.950 8，反映数据拟合度较好，表明模型可以解释 95.08% 以上的响应值变化，试验误差较小，因此，可用该模型对雾滴分布均匀性进行分析和预测。

2.3　响应曲面分析

根据回归方程绘制出相应的三维响应面，研究各因数以及他们交互作用下对响应变量的影响。分别如图 3 ~ 8 所示。

图 3 为喷雾行走速度和喷头摇摆速度位于中心水平（$x_3=0.14$ m/s，$x_4=18$（°）/s）时，喷雾流量与喷雾距离对喷雾分布变异系数交互作用的响应曲面图。图 3 中的 3D 曲面图显示响应曲面为山谷型曲面，一定范围内随着喷雾流量和喷雾距离的增大，雾滴分布变异系数呈现先减小后增加的趋势。此外从图 3b 上看，等高线轮廓为椭圆形，响应面峰值处于试验因素水平范围内，即喷雾流量为 397.32 ~ 405.10 mL/min，喷雾距离为 1.74 ~ 1.8 m 时，雾滴分布均匀性最佳。

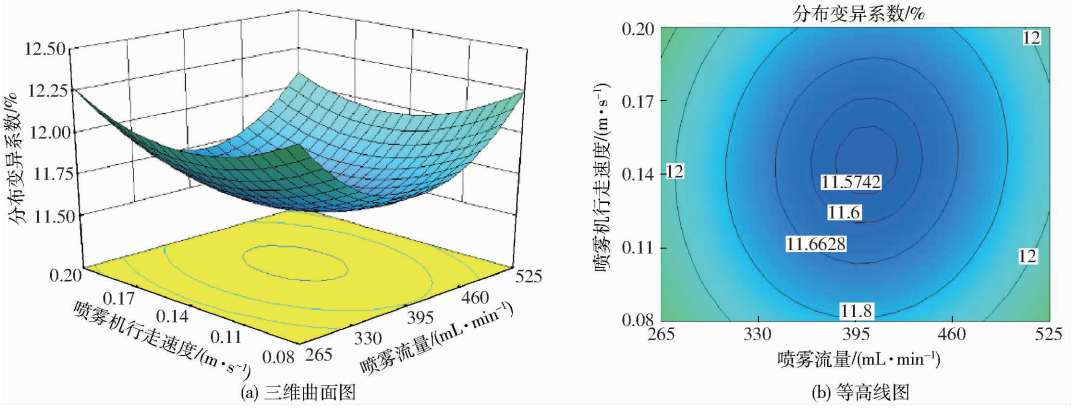
主要原因：在 X_2、X_3、X_4 因素相等水平下，随着喷雾流量的增加，雾滴分布变异系数呈现先减小后增加的趋势。原因是一方面单位时间内流量越大雾滴越大，附着性能差，易发生滚落或中途下落至地面，造成药液流失，另一方面流量过小则不易沉降，同时降低单位面积上的雾滴覆盖率。在 X_1、X_3、X_4 因素相等水平下，由于喷头设定在 0° ~ 45° 间摇摆喷雾，喷雾机要把雾滴送达树顶须使喷头处于最大上仰角（即喷雾角为 45°），此时若喷雾距离过小，喷头处于最大上仰角喷雾时，吹送雾滴多沉积在果树



(a) 三维曲面图 (b) 等高线图

图 3 喷雾距离和喷雾流量对雾滴分布变异系数的交互影响

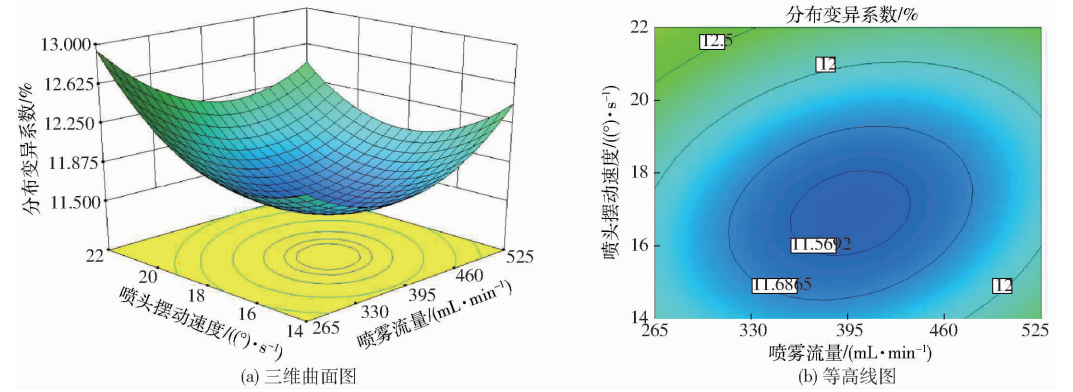
Fig. 3 Mutual-influence of spraying distance and spraying flow rate to distribution of droplets deposition



(a) 三维曲面图 (b) 等高线图

图 4 喷雾机行走速度和喷雾流量对雾滴分布变异系数的交互影响

Fig. 4 Mutual-influence of mist-sprayer forward velocity and spraying flow rate to distribution of droplets deposition



(a) 三维曲面图 (b) 等高线图

图 5 喷头摆动速度和喷雾流量对雾滴分布变异系数的交互影响

Fig. 5 Mutual-influence of nozzle swing speed and spraying flow rate to distribution of droplets deposition

冠径最大处;高度方向上冠层最厚处以上的雾滴沉积量比冠层中下部显著减少,同时伴随喷雾距离增加;深度方向上,后树冠部冠层最厚处穿透性显著降低,中靶率降低。

图 4 为喷雾距离和喷头摇摆速度位于中心水平(x_2 = 1.8 m,x_4 = 18(°)/s)时,喷雾流量与喷雾机行走速度对喷雾分布变异系数交互作用的响应曲面图。图 4 中的 3D 曲面显示增加喷雾机行走速度可改善分布均匀性,但分布变异系数总体变化缓慢,喷雾机行走速度对雾滴分布变系数影响较小,与表 4 中方差分析结果一致。此外,从图 4b 上看,当喷雾机行走速度为 0.14 ~ 0.15 m/s,喷雾流量为 402.79 ~ 405.67 mL/min时,雾滴分布均匀性最佳。

图 5 为喷雾距离和喷雾机行走速度位于中心水平(x_2 = 1.80 m,x_3 = 0.14 m/s)时,喷雾流量与喷头摇摆速度对喷雾分布变异系数交互作用的响应曲面图。图 5 中的 3D 曲面表明分布均匀性良好,说明针对低矮树型,改变喷雾摇摆角度对整个树的雾滴沉积和分布模式产生了良好影响。其中在喷头摇摆速度减小的过程中,雾滴分布变异系数先是迅速减

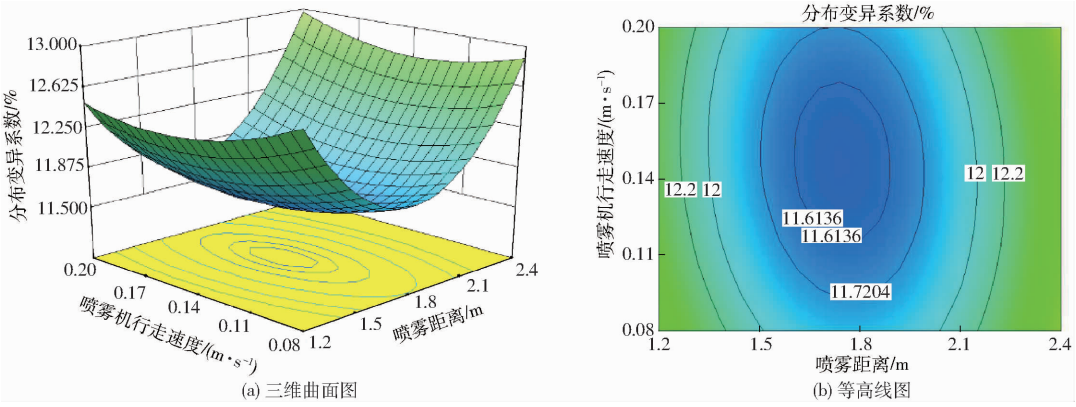


图 6　喷雾机行走速度和喷雾距离对雾滴分布变异系数的交互影响

Fig. 6　Mutual-influence of mist-sprayer forward velocity and spraying distance to distribution of droplets deposition

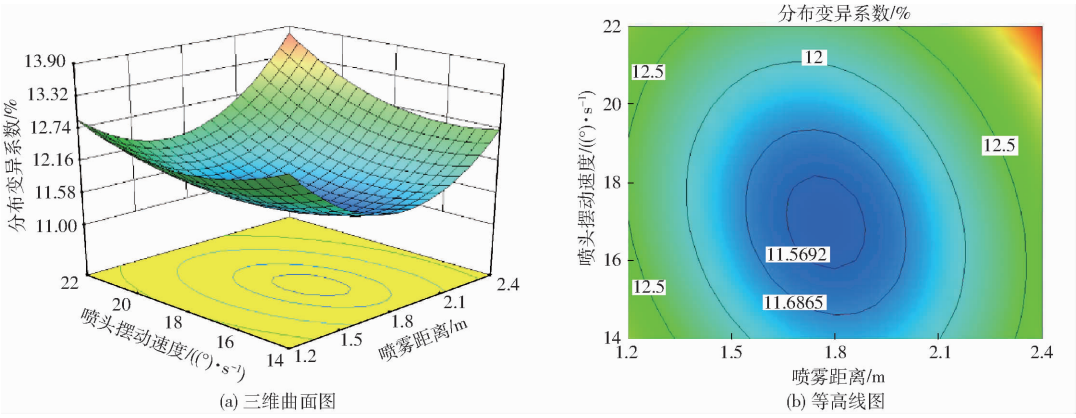


图 7　喷头摆动速度和喷雾距离对雾滴分布变异系数的交互影响

Fig. 7　Mutual-influence of nozzle swing speed and spraying distance to distribution of droplets deposition

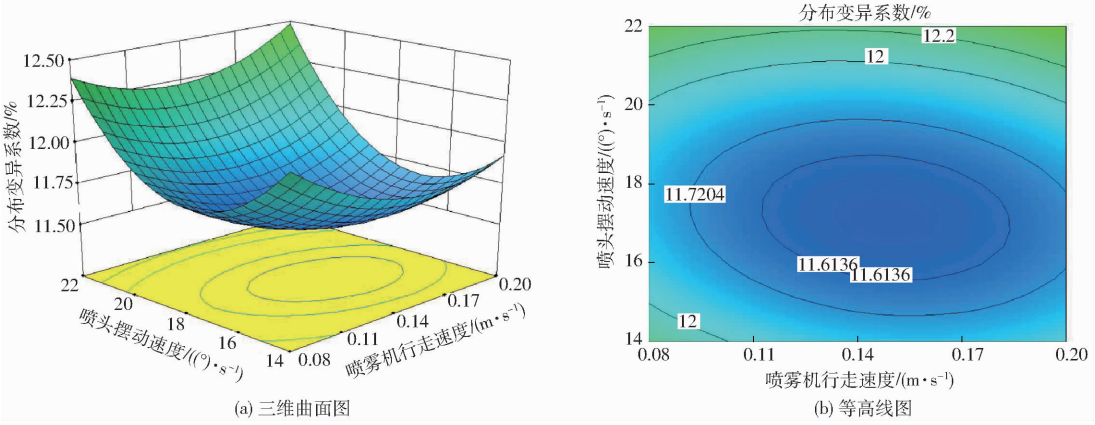


图 8　喷头摆动速度和喷雾机行走速度对雾滴分布变异系数的交互影响

Fig. 8　Mutual-influence of nozzle swing speed and mist-sprayer forward velocity to distribution of droplets deposition

小然后再缓慢增加，主要因为：一方面摇摆喷雾提高了宽度方向雾滴的左右两边沉积量，整体分布均匀性得到提高，另一方面当行走速度一定时，喷头摇摆速度过大或者过小，会出现重喷漏喷的现象，降低喷雾分布均匀性。此外，从图 5b 上看，当喷头摇摆速度为 16.95 ~ 17.79 (°)/s，喷雾流量为 402.79 ~ 405.67 mL/min 时，雾滴分布均匀性最佳，且此时喷头流量和喷头摆动速度交互作用显著，与方差分析结果一致。

图 6 为喷雾流量和喷头摇摆速度位于中心水平（x_1 = 395 mL/min，x_4 = 18 (°)/s）时，喷雾距离与喷雾机行走速度对喷雾分布变异系数交互作用的响应曲面图。图 6 中的 3D 曲面显示当喷雾距离和喷雾机行走速度过高过低时，分布变异系数都增加，因此二者因素都要适当控制水平。从图 6b 上看，当喷雾距离为 1.66 ~ 1.79 m，喷雾机行走速度为 0.142 ~

0.148 m/s 时,雾滴分布均匀性最佳。

图 7 为喷雾流量和喷雾机行走速度位于中心水平(x_1 = 395 mL/min,x_3 = 0.14 m/s)时,喷雾距离与喷头摇摆速度对喷雾分布变异系数交互作用的响应曲面图。图 7 中的 3D 曲面显示随着喷雾距离与喷头摇摆速度的增加,雾滴分布变异系数呈现先减小后增加的趋势,在特定范围内控制喷雾距离和喷头摇摆速度可以改善分布均匀性,但响应面峰值上升,整体分布均匀性下降。此外,从图 7b 上看,当喷雾距离为 1.74 ~ 1.78 m,喷头摇摆速度为 17.15 ~ 17.31(°)/s 范围内时雾滴分布均匀性最佳。

图 8 为喷雾流量和喷雾距离位于中心水平(x_1 = 395 mL/min,x_2 = 1.8 m)时,喷雾机行走速度与喷头摇摆速度对喷雾分布变异系数交互作用的响应曲面图。图 8 中的 3D 曲面显示控制喷头摇摆速度条件下,分布变异系数急剧下降,而控制喷雾机行走速度条件下则变化缓慢,说明相比喷雾机行走速度,喷头摇摆速度对雾滴分布变异系数影响更为显著,与方差分析结果相同。从图 8b 上看,当喷头摇摆速度为 17.01 ~ 17.248(°)/s,当喷雾机行走速度为 0.145 ~ 0.157 m/s 时,雾滴分布均匀性最佳。

2.4 喷雾机最优参数确定以及模型验证

利用 Design-Expert 8.0 软件对已优化的二次回归归模型求解,得到矮化密植果园摇摆变量喷雾机最优喷雾参数为:喷雾流量 375.20 mL/min、喷雾距离 1.72 m、喷雾机行走速度 0.14 m/s、喷头摇摆速度 16.19(°)/s。此条件下雾滴分布变异系数为 11.471%。

为验证模型的可靠性,采用上述最优喷雾参数调整喷雾机进行试验,试验重复 3 次,结果见表 5。由表 5 可知预测值和实际值之间具有较高的相关系,雾滴分布变异系数均值为 12.033%,相对误差仅为 4.67%。

表 5 优化模型下预测值与真实值比较

Tab. 5 Comparison of predictors and real values in optimization model

试验序号	因素				响应值		相对误差/%
	喷雾流量/($mL\cdot min^{-1}$)	喷雾距离/m	喷雾机行走速度/($m\cdot s^{-1}$)	喷头摆动速度/($(°)\cdot s^{-1}$)	预测值/%	真实值/%	
1						11.945	4.04
2	375.2	1.72	0.14	16.19	11.471	12.032	4.67
3						12.121	4.36

3 结论

(1) 应用响应面法优化喷雾机参数,得到各因素对雾滴分布变异系数影响的显著性由小到大为:喷头摇摆速度、喷雾距离、喷头流量、喷雾机行走速度。

(2) 以雾滴分布变异系数为响应指标建立了关于喷雾流量、喷雾距离、喷雾机行走速度和喷头摆速度优化模型,分析求解后得到喷雾流量 375.20 mL/min、喷雾距离 1.72 m、喷雾机行走速度 0.14 m/s、喷头摇摆速度 16.19(°)/s。此条件下雾滴分布变异系数为 11.471%。试验证明该模型可靠,可用来对试验结果进行分析和预测。

(3) 响应曲面分析表明喷雾流量和喷头摇摆速度、喷雾距离和喷头摇摆速度的交互作用、喷雾流量和喷头摇摆速度的交互作用对响应面模型有显著影响,可通过调整至上述参数优化喷雾机喷雾性能。

参 考 文 献

1 张玲, 薛新宇, 丁素明,等. 我国密植型果园病虫害防治方法与技术对策[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6):184 - 187.
ZHANG Ling, XUE Xinyu, DING Suming, et al. Methods and technical countermeasures of planting orchard about pest control in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6):184 - 187. (in Chinese)

2 傅锡敏, 吕晓兰, 丁为民,等. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 中国农机化学报, 2009,30(6):61 - 63.
FU Ximin, LÜ Xiaolan, DING Weimin, et al. Present state and technical requirement about orchard plant protection machinery in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2009, 30(6): 61 - 63. (in Chinese)

3 丁素明,傅锡敏,薛新宇,等. 低矮果园自走式风送喷雾机研制与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(15):18 - 25.
DING Suming, FU Ximin, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of self-propelled air-assisted sprayer in orchard with dwarf culture[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15):18 - 25. (in Chinese)

4 邱威, 丁为民, 汪小旵,等. 3WZ - 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. 3WZ - 700 self-propelled air-blowing orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 43(4): 26 - 30. (in Chinese)

5 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 Tiansheng，LI Jie，et al. Review of the pesticide precision orchard spraying technologies[J]. Transactions of the CSAE，2004，20(6)：98－101.(in Chinese)

6 张富贵，洪添胜，王锦坚，等. 现代农药喷施技术及装备研究进展[J]. 农机化研究，2011，33(2)：209－213.
ZHANG Fugui，HONG Tiansheng，WANG Jinjian，et al. Development of modern pesticide spray technique and equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization，2011，33(2)：209－213.(in Chinese)

7 邱白晶，闫润，马靖，等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 农业机械学报，2015，46(3)：59－72.
QIU Baijing，YAN Run，MA Jing，et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，46(3)：59－72.(in Chinese)

8 遇宝俊，徐幼林. 果树仿形对靶喷雾关键技术研究现状和发展[C]//2012 中国农业机械学会国际学术年会，2012.
YU Baojun，XU Youlin. Fruit tree imitation of the key technology of the target spray research and development[C]//2012 China Agricultural Machinery Society International Academic Annual Meeting，2012.(in Chinese)

9 姜红花，白鹏，刘理民，等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：189－195.
JIANG Honghua，BAI Peng，LIU Limin，et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(Supp.)：189－195.(in Chinese)

10 周良富，张晓辛，吕晓兰，等. 圆盘雾化器风力性能数值模拟与试验[J]. 农业机械学报，2012，43(10)：101－105.
ZHOU Liangfu，ZHANG Xiaoxin，LÜ Xiaolan，et al. Numerical simulation and exerimental study on the wind performance of the disc atomizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2012，43(10)：101－105.(in Chinese)

11 李龙龙，何雄奎，宋坚利，等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(1)：70－76.
LI Longlong，HE Xiongkui，SONG Jianli，et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate[J]. Transactions of the CSAE，2017，33(1)：70－76.(in Chinese)

12 DUGA A T，RUYSEN K，DEKEYSER D，et al. Spray deposition profiles in pome fruit trees：effects of sprayer design，training system and tree canopy characteristics[J]. Crop Protection，2015，67(67)：200－213.

13 CROSS J V，WALKLATE P J，MURRAY R A，et al. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer：3. Effects of air volumetric flow rate[J]. Crop Protection，2003，22(2)：381－394.

14 CROSS J V，WALKLATE P J，MURRAY R A，et al. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer：1. Effects of spray liquid flow rate[J]. Crop Protection，2001，20(1)：13－30.

15 祁力钧，胡锦蓉，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 Chinese Society of Agricultural Engineering，2004，20(5)：122－125.(in Chinese)

16 傅泽田，祁力钧，王俊红. 精准施药技术研究进展与对策[J]. 农业机械学报，2007，38(1)：189－192.
FU Zetian，QI Lijun，WANG Junhong. Developmental tendency and strategies of precision pesticide application techniques[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2007，38(1)：189－192.(in Chinese)

17 袁雪，祁力钧，王虎，等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J]. 农业机械学报，2012，43(4)：45－50.
YUAN Xue，QI Lijun，WANG Hu，et al. Spraying parameters optimization of swing，automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2012，43(4)：45－50.(in Chinese)

18 邱白晶，王立伟，蔡东林，等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. 农业工程学报，2013，29(24)：25－32.
QIU Baijing，WANG Liwei，CAI Donglin，et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2013，29(24)：26－32.(in Chinese)

19 王永菲，王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报：自然科学版，2005，14(3)：236－240.
WANG Yongfei，WANG Chengguo. The application of response surface methodology[J]. Journal of the CUN：Natural Sciences Edition，2005，14(3)：236－240.(in Chinese)

20 周良富，张玲，丁为民，等. 风送静电喷雾覆盖率响应面模型与影响因素分析[J]. 农业工程学报，2015，31(增刊 2)：52－59.
ZHOU Liangfu，ZHANG Ling，DING Weimin，et al. Droplet coverage response surface models and influencing factors of air-assisted electrostatic spray[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2015，31(Supp.2)：52－59.(in Chinese)