

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.012

3YZ-80A 型履带自走式玉米行间喷雾机设计与试验

王伟伟^{1,2} 谢进杰¹ 陈黎卿^{1,2} 刘立超^{1,2} 权龙哲^{1,2} 刘路^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 合肥综合性国家科学中心人工智能研究院, 合肥 230036)

摘要: 针对玉米中后期封行后人工施药劳动强度大、作业效率低、传统喷雾机喷药穿透性差,且窄行距下机具行走稳定性差等问题,结合玉米种植农艺和冠层中部病虫害防治的要求,设计了 3YZ-80A 型履带自走式玉米行间喷雾机,该机主要由自适应仿形履带差速驱动底盘、Y 形双喷头脉冲式喷雾装置、喷药监控系统组成,能够满足 600 mm 以下的窄行距玉米冠层中部叶片喷施作业的空间要求。为了提高作业效率和喷雾效果,以喷射角、药液嘴位置、喷施距离为试验因素,雾滴体积中径 D_{50} 为喷雾系统性能评价指标,开展二次旋转正交组合试验,利用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行方差和响应面分析,建立试验因素与指标之间的数学回归模型,分析了显著因素对评价指标的影响变化规律,得到喷管最优组合参数:喷射角为 60° 、药液嘴在喷管上的位置为 610 mm、喷施距离为 2.37 m。田间试验结果表明,随着作业速度的提升有效防控区域显著降低,当作业速度在 0.6~1.1 m/s 时,雾滴覆盖率大于 10% 的有效喷施幅宽为 6~8 m;当作业速度大于 1.3 m/s 时,雾滴覆盖率大于 10% 的有效喷施幅宽不足 4 m。

关键词: 喷雾机; 夏玉米; 履带底盘; 脉冲式; 雾滴体积中径

中图分类号: S224.29 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0106-09 OSID: 

Design and Experiment of 3YZ-80A Crawler Self-propelled Corn Interrow Sprayer

WANG Weiwei^{1,2} XIE Jinjie¹ CHEN Liqing^{1,2} LIU Lichao^{1,2} QUAN Longzhe^{1,2} LIU Lu^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Institute of Artificial Intelligence, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230036, China)

Abstract: Aiming at the problems of high labor intensity, low efficiency, poor penetration of traditional plant protection machines, and poor walking stability under narrow row spacing in the middle and late stages of corn, 3YZ-80A crawler self-propelled corn interrow sprayer was designed according to the requirements of corn planting agronomy and pest control in the middle of canopy. The machine was mainly composed of an adaptive profile track differential drive chassis, a Y-type dual-nozzle pulse spray device, and a spray monitoring system, which can meet the space requirements for plant protection operations under the narrow row of corn leaves below 600 mm. In order to improve operation efficiency and spray effect, the spray angle, nozzle position, and spraying distance were taken as experiment factors, the volume median diameter D_{50} was used as the performance evaluation index of spray system, the quadratic rotation orthogonal combination experiment was carried out. the variance and response surface analysis of the data were carried out by using Design-Expert 8.0.6 software, the mathematical regression model between the experimental factors and the indicators was established, and the significant factor was analyzed. The influence change rule of the evaluation index was obtained, and the optimal combination parameters of the nozzle were obtained: the Y-type spray angle was 60° , the position of the liquid nozzle on the nozzle was 0.61 m, and the distance between the spray nozzle of the fog machine and the receiving surface was 2.37 m. Field test results showed that with the increase of operating speed, the effective prevention and control area of the self-propelled interrow sprayer was

收稿日期: 2021-05-17 修回日期: 2021-06-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(52175212)、安徽省高校协同创新项目(GXXT-2020-011)和安徽省高校合作协同攻关项目(GXXT-2019-036)
作者简介: 王伟伟(1989—),男,讲师,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: wangww0618@163.com
通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lqChen@ahau.edu.cn

significantly reduced; when the range was 0.6 ~ 1.1 m/s, the droplet coverage was more than 10% effective. The spraying width was 6 ~ 8 m; when it was greater than 1.3 m/s, the effective spraying width with a droplet coverage greater than 10% was less than 4 m. The research result can provide technical support for the development and improvement of narrow row spacing plant protection equipment applied to high-stem crops.

Key words: sprayer; summer corn; crawler chassis; pulse type; volume median diameter of droplet

0 引言

黄淮海平原小麦玉米轮作区麦秸覆盖还田负效应使得夏玉米中后期病虫害次生害加剧,影响玉米接穗质量和产量水平^[1-2]。夏玉米中后期处于8月中下旬,田间温度高,传统人工背负式喷雾施药效率低下且易造成人员中暑中毒;秸秆还田后,土壤表层、耕层秸秆覆盖量大,致使大型高地隙喷雾机行间行走困难,压苗伤苗率高^[3];乳熟期玉米植株密度大、覆盖遮挡严重,行间窄且病发多集中于冠层中部叶片下方,无人机喷药难以穿透叶面,雾滴沉积、均匀性和覆盖率等方面均难以达到满意效果,综合防治效果不佳^[4-5]。

近年来国内外诸多学者针对不同作物喷雾机械开展的研究与静电喷雾系统相结合的方法,设计了一种双气流辅助静电果园喷雾机;苑进等^[6]设计了一种基于高地隙喷杆式与隧道式一体的烟草喷雾机;李龙龙等^[7]基于变量喷雾技术设计了一种果园自动仿形喷雾机;CHEN 等^[8-9]设计一种适用高秆作物环境的履带自走式行走装置及转向控制系统;同时在喷雾机的喷头雾化、施药沉积、雾滴漂移等方面开展了性能试验^[10-13]。喷雾机械在恶劣农田地面环境下工作,履带式行走机构由于稳定性和通过性好,成为农业机器人移动平台的首选,刘路等^[14]、姜红花等^[15]均采用不同驱动形式的移动平台搭载喷药、施肥、采摘、收获等装置完成作业。针对高秆作物、林果树木等冠层高大、枝叶茂密的病虫害防治问题,目前喷雾机均采用脉冲式发动机热力雾化药液,以实现药液空间弥散喷洒^[16-19]。

本文针对玉米中后期封行后人工施药劳动强度大、作业效率低、传统喷雾机喷药穿透性差,且窄行距下机具行走稳定性差等问题,结合玉米种植农艺和作物冠层病虫害防治的要求,设计一种3YZ-80A型履带自走式玉米行间喷雾机,满足600 mm以下的窄行距玉米冠层中部叶片下方病虫害防治的空间要求,并对喷雾系统作业过程中喷管参数进行优化,以期高秆作物窄行距喷雾机具研发与改进提供技术支撑和借鉴。

1 整机方案确定

1.1 设计依据

针对夏玉米中后期封行后叶下病虫害防治存在的问题,结合玉米种植农艺和作物冠层病虫害防治的要求,确定了履带自走式玉米行间植保喷雾机的设计依据:

(1) 喷雾机底盘行走适应性: 目前小麦秸秆全量还田下玉米免耕直播技术得到大力的推广与应用,行间地表覆盖大量秸秆使得传统轮式底盘行走通过性差;根据种植农艺要求玉米行距600 mm为最佳,增产效果最为明显^[20]。

(2) 喷施方式: 玉米中后期病虫害主要为纹枯病、穗腐病、螟、蚜虫等,且发病区多集中玉米冠层中部叶片下方,因此选用行间热雾弥散的喷施方式,将药液喷施于冠层中部的叶面及穗部,有效提高了雾滴沉积量和作业效率。

(3) 喷施幅宽及雾滴沉积: 根据已有研究和喷雾经验,药液喷口向行间单侧喷施有效幅宽确定为3 ~ 4 m,雾滴体积中径(VMD)大于等于30 μm。

1.2 整机结构

3YZ-80A 型履带自走式玉米行间喷雾机主要由履带底盘行走系统、脉冲式热喷雾系统、控制系统组成,整机结构如图1所示。其中履带底盘行走系统由仿形履带底盘、双驱动电机、减速器等组成;脉冲式热喷雾系统由Y型喷管、电控化油器、电磁流量阀、药箱等组成;控制系统由STM32单片机、电机驱动器等组成,其控制系统操作界面如图2所示,包

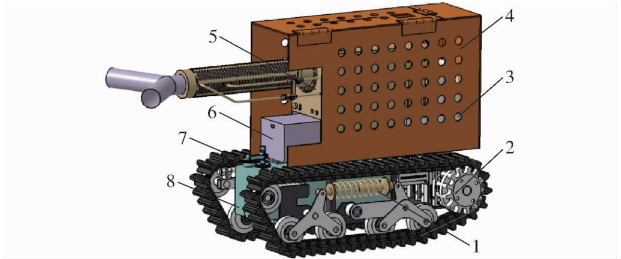


图1 履带自走式玉米行间喷雾机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of self-propelled plant protection machine

- 1. 仿形弹簧 2. 驱动轮 3. 电控化油器 4. 安全护罩 5. Y型喷管 6. 电池 7. 压力监测阀 8. 药箱

括远程遥控和行间自主行走 2 种作业模式,其中远程遥控作业模式主要以 W5500 以太网芯片为核心,采用奥维通 BreezeNET DS. 11 无线网桥构建局域网,人工通过操作控制系统界面按键完成无线路由器与网桥数据信号传输,可实现远程在线作业状态监控、点火、喷雾、熄火等功能。当履带底盘行走系统完全进入玉米行间时,通过切换操作界面自走作业模式按键,启动安装在底盘正前方的激光雷达传感器感知行间两侧玉米根茎信息,上位机实时处理、规划行走底盘作业路径并将驱动信号传输至底盘控制系统实现自主行走作业^[21],整机主要技术参数如表 1 所示。



图 2 喷雾机控制系统操作界面

Fig.2 Interface of sprayer control system

表 1 履带自走式玉米行间喷雾机主要技术参数

Tab.1 Major performance parameters of crawler self-propelled sprayer

参数	数值/型式
结构型式	自走式(履带)
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 400×380×700
整机质量/kg	80
转向类型	双电机差速转向
驱动电机额定功率/kW	0.5
最大爬坡度/(°)	30
转弯半径/m	0~0.8
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.5~1.5
配套动力型式	脉冲式汽油机+蓄电池
药箱容积/L	15
喷雾水平射程/m	≥3.0
供电电压/V	48
续航时间/h	4.0
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)	5.4

1.3 工作原理

履带自走式玉米行间喷雾机田间作业时,履带底盘行走系统根据预先规划路径自主在玉米行间喷雾,其工作原理如图 3 所示,上位机根据行间作业环境确定喷雾机航向偏差、热喷雾系统状态等信息,通过 SBUS 协议将控制指令传达至 STM32F4 单片机,控制器通过解析整机状态指令,实现对履带自走式玉米行间喷雾机驱动转向系统及热喷雾系统的控制。其中航向偏差由左右直流无刷电机的驱动器调

节 PWM 占空比方式进行控制。通过 I/O 接口为脉冲式热喷雾系统提供控制信号,完成药液流量控制、药箱压力安全监测以及热雾机喷雾启停控制。

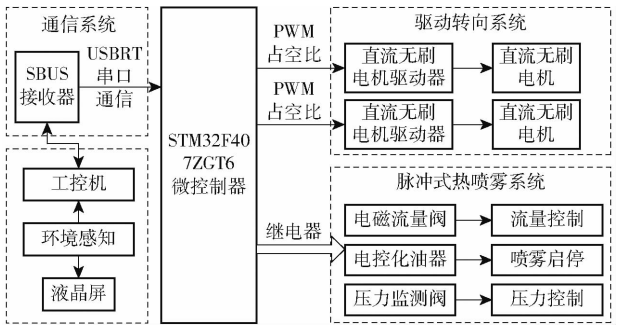


图 3 喷雾机控制系统结构框图

Fig.3 Structure diagram of sprayer system

2 喷雾机关键部件设计

2.1 履带底盘行走系统设计

2.1.1 履带自走式驱动底盘结构

履带底盘具有接地比压小、附着性能优、转弯半径小、越障能力强等优点^[22],成为玉米行间喷雾机驱动底盘首选,其底盘结构如图 4 所示,由于玉米行间地表覆盖大量秸秆,加之耕层崎岖不平,喷雾机作业过程中易出现颠簸、侧翻等情况,采用对称式承重轮、多连杆铰接支架和减震弹簧等设计了一种嵌入在履带内槽的自适应仿形减震悬架,确保单侧履带底盘的形状或姿态在遇障碍地形时迅速进行自适应调整,有效提高了喷雾机作业地形适应能力。同时,采用 2 个功率为 0.5 kW、额定扭矩 45 N·m 的直流无刷电机直联差速器作为履带底盘的驱动转向装置,两侧的张紧轮及张紧弹簧确保作业过程的脱带松动现象。根据玉米播种行距要求,确定履带底盘外形尺寸(长×宽×高)为 1 400 mm×380 mm×250 mm。

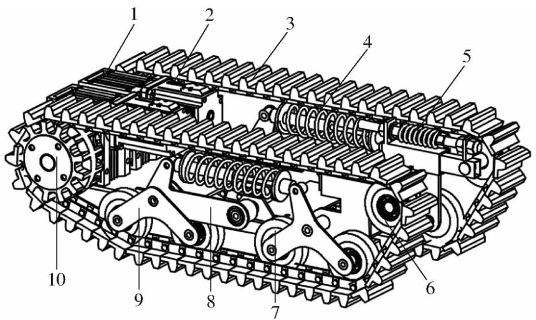


图 4 履带驱动底盘结构示意图

Fig.4 Structure diagram of crawler driven chassis

1. 减速器 2. 驱动电机 3. 履带 4. 仿形弹簧 5. 张紧弹簧
6. 张紧轮 7. 承重轮 8. 仿形支架 9. 承重支架 10. 驱动轮

2.1.2 转向系统驱动功率计算

履带自走式驱动底盘作业阻力包括作业阻力和转向阻力,其中转向时的功率消耗远远大于直线作

业功率消耗。图 5 为履带底盘接触地面核心域受力图, O 为履带底盘转向中心, 图中箭头方向表示履带底盘转动方向。

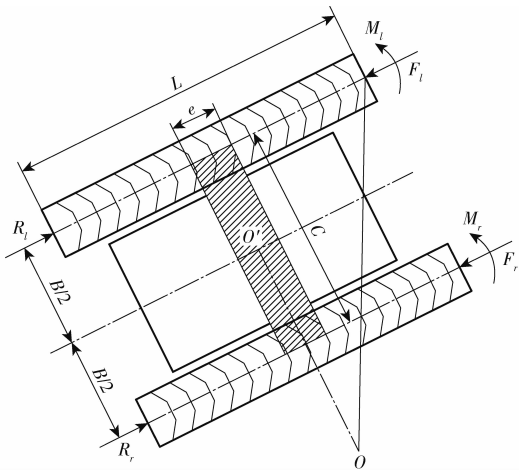


图 5 履带接地面核心域示意图

Fig. 5 Structure diagram of crawler contacting ground

假定喷雾机底盘重心位于履带底盘接地面核心区域以内, 阴影区域长、宽分别代表整机横向偏心距 C 、纵向偏心距 e , 由转向时的平衡条件可得

$$\begin{cases} F_l = \frac{fG}{2} \left(1 + \frac{2C}{B} \right) \\ F_r = \frac{fG}{2} \left(1 - \frac{2C}{B} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 B ——履带中心距, m

G ——履带质心位置总重量, N

f ——滚动阻力系数

F_l ——左侧履带转向阻力, N

F_r ——右侧履带转向阻力, N

履带驱动底盘转向阻力矩为

$$M_\mu = M_l + M_r = \frac{\mu GL}{4} \left[1 - \left(\frac{2e}{L} \right)^2 \right]^2 \quad (2)$$

其中

$$M_l = \frac{\mu GL}{8} \left(1 + \frac{2C}{B} \right) \left[1 - \left(\frac{2e}{L} \right)^2 \right]^2 \quad (3)$$

$$M_r = \frac{\mu GL}{8} \left(1 - \frac{2C}{B} \right) \left[1 - \left(\frac{2e}{L} \right)^2 \right]^2 \quad (4)$$

式中 L ——履带接地长度, m

μ ——转向阻力系数

M_μ ——履带底盘转向阻力矩, N·m

M_l ——左侧履带转向阻力矩, N·m

M_r ——右侧履带转向阻力矩, N·m

当履带驱动底盘向左侧转向时, 则左、右履带轮转向驱动力为

$$\begin{cases} F_l = \frac{fGL}{2} \left(1 + \frac{2C}{B} \right) + \frac{\mu GL}{4B} \left[1 - \left(\frac{2e}{L} \right)^2 \right]^2 \\ F_r = -\frac{fGL}{2} \left(1 - \frac{2C}{B} \right) - \frac{\mu GL}{4B} \left[1 - \left(\frac{2e}{L} \right)^2 \right]^2 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 左右驱动力随着纵向偏心距的

增加而减小, 横向偏心距偏于一侧, 则该侧的驱动力增加, 同时另一侧的驱动力减小。

履带驱动底盘的转向驱动力矩、功率分别为

$$\begin{cases} M_{\max} = (F_{l\max} + F_{r\max})r \\ W_{\max} = (F_{l\max} + F_{r\max})v \end{cases} \quad (6)$$

式中 $M_{\max}$ ——履带驱动轮最大驱动力矩, N·m

$W_{\max}$ ——履带驱动轮最大驱动功率, kW

r ——驱动轮节圆半径, m

v ——驱动轮线速度, m/s

本文所设计的 3YZ-80A 型履带自走式玉米行间喷雾机满载质量 m 为 100 kg, 履带中心距 B 为 0.35 m, 履带接地长度 L 为 1.0 m, 驱动轮节圆半径 r 为 0.02 m, 横向偏心距 C 取 0.175 m, 纵向偏心距 e 取 0.16 m, 转向阻力系数 μ 和滚动阻力系数 f 分别取 0.6、0.11^[14]。计算可得履带驱动轮最大驱动力矩 $M_{\max}$ 为 15.68 N·m, 履带驱动轮最大驱动功率 $W_{\max}$ 为 0.94 kW。

2.2 脉冲式热喷雾系统设计

脉冲式发动机启动后喷管内的高温热能和脉冲紊流动能将进入喷管内的药液流热力雾化成细小雾滴群流向喷雾对象弥散^[23]。图 6 为脉冲式烟雾机结构示意图, 主体结构由燃烧室与喷管构成, 整个喷雾系统主要依靠脉冲发动机燃烧后管内气流的自激自吸形成脉动燃烧振荡过程, 并利用振荡过程中燃烧室内热气流的压力波动实现油箱自动吸油、化油器吸气及药箱自动泵药, 无需额外安装供油泵、供气泵及供药泵等装置。结合玉米成熟期果穗层高度为 600~1 000 mm, 整机高度确定为 780 mm, 喷管口设计成 Y 形结构, 确保有效雾化流液呈扇形向玉米行间两侧弥散。为了使喷药系统的启停、喷药量实现智能化控制, 将传统化油器节气门设计为电控开关阀, 同时主药液管道中部安装单向电磁流量阀, 通过远程端完成调控。设计容积 15 L 的长方体药箱安装于履带底盘中部, 提高整机底盘接地面重心作业稳定性。

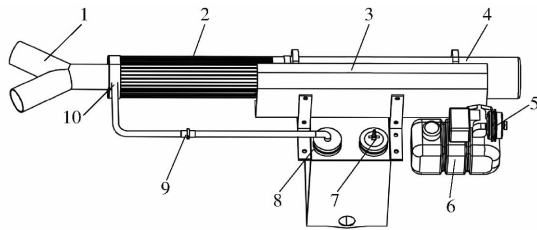


图 6 脉冲式烟雾机结构简图

Fig. 6 Schematic of pulsed fogger

1. Y 形喷头 2. 绝热防护罩 3. 固定板 4. 燃烧室 5. 电控化油器 6. 油箱 7. 压力安全阀 8. 药箱 9. 电磁流量阀 10. 药液喷嘴

药液雾滴粒径决定热喷雾系统性能评价指标,雾滴粒径越小,覆盖面积就越大,随着覆盖面积的增大,药液与病虫害接触的几率会增加。当脉冲式发动功率确定时,喷管的结构参数是影响药液雾化程度及雾滴粒径的关键因素^[24]。

3 试验设计与结果分析

3.1 试验设计与方法

为了验证所设计的 3YZ-80A 型履带自走式行间喷雾机性能的可靠性,为寻求喷雾系统作业过程中喷管参数的最优状态,选取对喷雾质量影响较大的喷射角 x_1 、药液嘴在喷管上的位置 x_2 、喷施距离 x_3 作为试验因素,以雾滴体积中径 (Volume median diameter, VMD) D_{50} 为喷雾系统性能评价指标,采用 HELOS 型激光粒度分析仪进行雾滴粒径测定,每个工况下油门开度及药液流量一致,正交试验的每组试验重复 5 次,统计后取平均值。试验因素与编码如表 2 所示,3 种不同参数的喷管组合如图 7 所示。

表 2 试验因素与编码

Tab.2 Factors and codes of experiment

编码	因素		
	喷射角 $x_1/(^{\circ})$	药液嘴位置 x_2/mm	喷施距离 x_3/m
-1	60	600	1.5
0	90	700	2.0
1	120	800	2.5

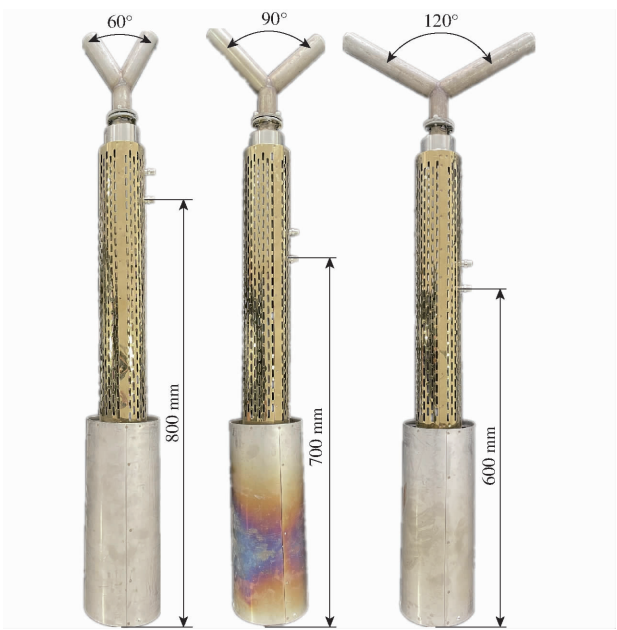


图 7 不同参数组合的喷管

Fig.7 Nozzle with different parameters

3.2 试验结果与分析

根据 Box-Behnken 中心组合设计三因素三水平分析试验,共进行 17 组试验,试验方案及结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为试验因素编码值。

表 3 Box-Behnken 试验设计及结果

Tab.3 Design and results of Box-Behnken experiment

序号	因素			$D_{50}/\mu\text{m}$
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	1	0	54.81
2	-1	0	-1	75.23
3	0	0	0	55.71
4	1	1	0	60.17
5	1	-1	0	58.11
6	0	1	1	56.45
7	-1	0	1	46.88
8	1	0	-1	59.29
9	0	0	0	55.91
10	0	-1	1	45.23
11	1	0	1	76.14
12	0	0	0	55.61
13	0	0	0	55.75
14	0	-1	-1	52.61
15	0	0	0	55.60
16	-1	-1	0	47.43
17	0	1	-1	57.85

3.3 回归模型构建与显著性分析

应用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元回归拟合分析,得雾滴体积中径 D_{50} 的回归模型为

$$D_{50}=55.74+3.67X_1+3.24X_2-2.54X_3-1.33X_1X_2+11.30X_1X_3-1.50X_2X_3+5.37X_1^2-5.98X_2^2+3.28X_3^2$$

(7)

方差分析如表 4 所示,雾滴体积中径 D_{50} 回归模型 P 小于 0.01,表明回归模型极显著;其中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 的 P 均小于 0.01; x_1x_2 、 x_2x_3 的 P 均小于 0.05,说明各个参数对雾滴体积中径 D_{50} 影响显著,表明回归模型的有效性。模型决定系数 $R^2=0.9925$ 、校正决定系数 $R^2_{adj}=0.99925$ 都趋近于 1,表明模型与实际试验拟合良好,试验误差能够

表 4 Box-Behnken 二次回归模型方差分析

Tab.4 ANOVA of modified model of Box-Behnken

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	1 072.78	9	119.20	103.56	<0.000 1
x_1	107.75	1	107.75	93.61	<0.000 1
x_2	83.85	1	83.85	72.85	<0.000 1
x_3	51.41	1	51.41	44.66	0.000 3
x_1x_2	7.08	1	7.08	6.15	0.042 3
x_1x_3	510.76	1	510.76	443.74	<0.000 1
x_2x_3	8.94	1	8.94	7.77	0.027 0
x_1^2	121.46	1	121.46	105.52	<0.000 1
x_2^2	150.52	1	150.52	130.77	<0.000 1
x_3^2	45.19	1	45.19	39.26	0.000 4
残差	8.06	7	1.15		
纯误差	0.048	4	0.012		
总和	1 080.83	16			

真实的反映实际情况,其中变异系数 $C_v = 1.88\%$,表明试验具有较高可靠性,试验精确度 $A_p = 37.736$,说明模型具有良好的精确度。

3.4 响应面分析

为了分析因素间交互作用对评价指标的影响,采用固定某一因素处于中间水平,分析其他两个因素对评价指标的交互影响,喷射角、药液嘴位置、喷施距离等交互因素对评价指标雾滴体积中径 D_{50} 影响的响应面如图 8 所示。由图 8a 可知,当喷口与受液表面的喷施距离处于中间水平,即 $x_3 = 2.0$ m,药液嘴在喷管上的位置和喷射角交互项对雾滴体积中径 D_{50} 影响显著,在同一喷头角度下, D_{50} 随着药液嘴在喷管上的位置的增大呈先增大后减小,药液嘴在

喷管上同一位置时, D_{50} 随着喷射角的增加呈先减小后增大趋势。由图 8b 可知,当药液嘴在喷管上的位置为中间水平,即 $x_2 = 700$ mm,喷射角与喷施距离对雾滴体积中径 D_{50} 的交互作用极显著,当喷施距离为较低水平时, D_{50} 随着喷射角的增大而减小,喷施距离处于较高水平时, D_{50} 随着喷射角的增大而增大。由图 8c 可知,当喷射角处于中间水平时,即 $x_1 = 90^\circ$,药液嘴位置与喷施距离对雾滴体积中径 D_{50} 的交互作用显著,当药液嘴在喷管上同一位置时, D_{50} 随着喷施距离的增加呈先减小后缓慢增加趋势,当喷雾机喷施距离处于同一水平时,雾滴体积中径 D_{50} 随着药液嘴在喷管上位置的增大呈先增大后减小趋势。

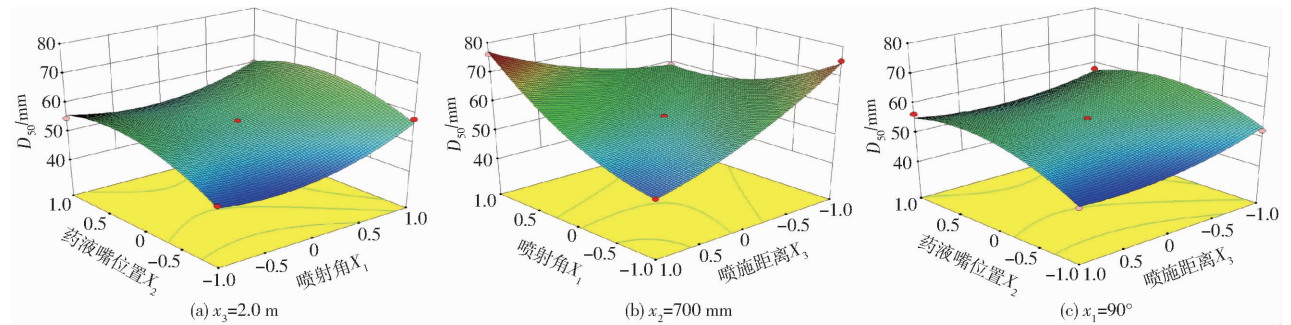


图 8 交互因素对雾滴体积中径影响的响应曲面
Fig. 8 Response surface diagrams of interactive factors to D_{50}

3.5 最优参数确定

根据方差分析和响应面分析结果,在满足玉米行间喷雾作业要求的前提下,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对回归模型进行求解,剔除弱显著项,结合热烟雾机性能试验等相关理论依据确定优化约束条件方程为

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{50} = 55.74 + 3.67X_1 + 3.24X_2 - 2.54X_3 + \\ \quad 11.30X_1X_3 + 5.37X_1^2 - 5.98X_2^2 + 3.28X_3^2 \\ \text{s. t.} \left\{ \begin{array}{l} D_{50} \geq 30 \mu\text{m} \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (8)$$

求解的最优水平组合参数为:喷射角为 60° 、药液嘴在喷管的位置为距离燃烧室末端 610 mm、烟雾机喷口与受液表面的喷施距离为 2.37 m。

4 田间试验

4.1 试验条件

试验于 2020 年 8 月 28 日在安徽省宿州市埇桥区灰古镇安徽农业大学院北试验站 ($116^\circ 97'E$ 、 $33^\circ 63'N$) 玉米种植基地进行。参照 DG/T 031—

2019《热烟雾机性能试验方法的一般规定》和 JB/T 9782—2014《喷雾机械 通用试验方法》进行 3YZ-80A 型履带自走式行间喷雾机田间作业性能测定^[25]。如图 9 所示,试验地块面积为 800 m^2 ,土壤类型为砂姜黑土,含水率为 12.8% ,坚实度为 0.75 MPa ,种植模式采用秸秆全量覆盖地免耕直播模式,试验玉米品种为安农 591,行距为 60 m ,株距为 25 cm ,株高为 1.8 m ,种植密度为 $4\,200\text{ 株/hm}^2$,玉米行间地表秸秆覆盖量均值为 1.02 kg/m^2 ,试验期间脉冲式热喷雾机油门开度为 90° ,脉冲频率为 100 Hz ,外界风速低于 0.5 m/s ,试验用介质为清水、雾加宝稳定剂。

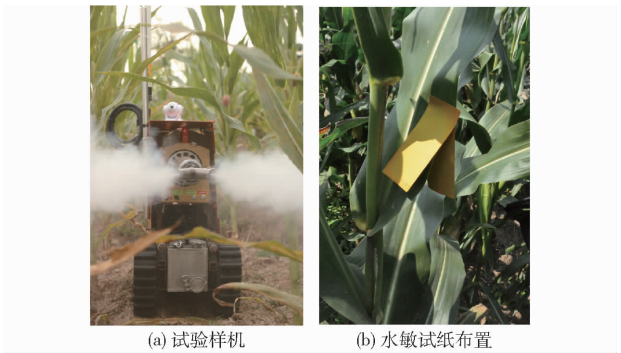


图 9 履带自走式喷雾机田间试验
Fig. 9 Testing of sprayer in field

4.2 试验指标及测量方法

田间喷雾区域雾滴沉积分布特性参数检测多利用油盘或水敏试纸^[26-27]。为检测履带自走式行间喷雾机作业速度和雾滴沉积量的关系,控制履带底盘行走系统作业速度为0.6、0.9、1.1、1.3、1.5 m/s,在玉米行间两侧由近至远每隔400 mm的方式在叶片上布置编号1~10的水敏试纸,设置布样高度为1.2 m。田间水敏试纸分布情况如图10所示。

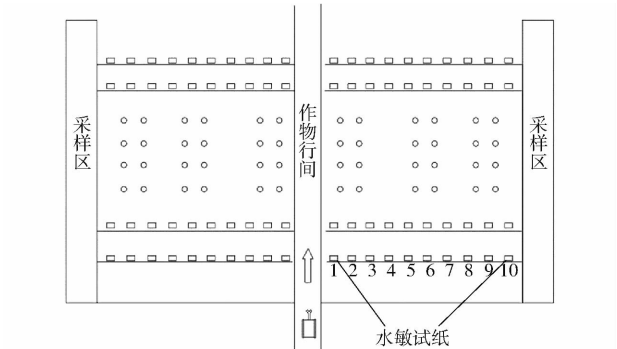


图10 水敏试纸分布

Fig.10 Distribution of water sensitive test paper

4.3 试验结果与分析

利用Deposit scan雾滴扫描软件对布样的水敏试纸进行扫描,获取单面面积雾滴个数和雾滴覆盖率;由于每个工况下履带自走式行间喷雾机作业速度恒定,玉米行两侧的每一列相同编号的水敏试纸均视为重复试验,取测量平均值。

如图11所示,当速度为0.6 m/s时,1~3列的叶片上雾滴覆盖率维持于较高水平,当喷施幅宽大于2 m时雾滴覆盖率下降增快;其中7~9列的雾滴覆盖率维持于一个较低水平,药液弥散至第10列时,雾滴覆盖率不足10%。根据检测的雾滴粒径,前3列雾滴覆盖率较高,雾滴粒径散度较大,所测得均值粒径误差较大。随后随着距离增加,雾滴体积中径 D_{50} 逐步减小。当距离到喷雾有效区域边缘时,雾滴粒径较小,可能受空气影响较大。

结果表明作业速度在0.6~1.1 m/s范围内,前3列的同一冠层高度的雾滴覆盖率基本相同,喷施较远区域的雾滴覆盖率随着作业速度增加而降低,雾滴覆盖率大于10%的有效喷施幅宽为6~8 m;作

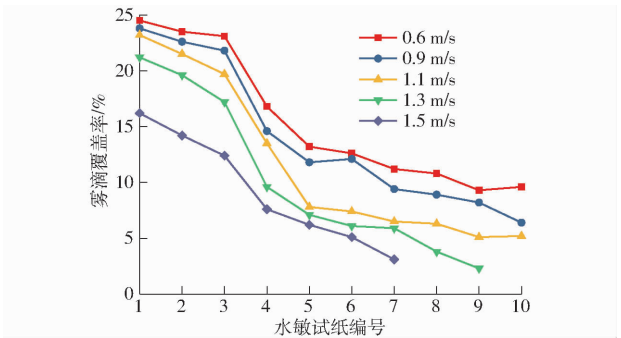


图11 不同作业速度下雾滴覆盖率分布

Fig.11 Droplet distribution coverage at different speeds

业速度为1.5 m/s时,雾滴覆盖率逐步降低,雾滴覆盖率大于10%的有效喷施幅宽不足4 m。由此可得,随着作业速度提高,3YZ-80A型履带自走式行间喷雾机有效防控作业面积明显下降。

5 结论

(1)针对夏玉米中后期封行后叶下病虫害防治难的问题,结合玉米种植农艺和作物冠层病虫害防治的要求,设计了3YZ-80A型履带自走式玉米行间植保喷雾机,整机设计紧凑,能够满足于600 mm的窄行距玉米冠层中部作业的空间要求,操作简便,智能化程度高。

(2)设计了自适应地表的仿形履带驱动底盘,有效提升喷雾机在大秸秆量地表的越障能力;设计了Y形喷头,有效提高行间作业幅宽,并通过三因素三水平二次旋转正交组合试验,建立了喷管评价指标与各影响因素的数学回归模型,分析了显著因素对评价指标的影响变化规律,得到喷管最优组合参数:喷射角60°、药液嘴在喷管的位置为距离燃烧室末端610 mm、烟雾机喷口与受液表面的喷施距离为2.37 m。

(3)田间试验表明随着作业速度提高,3YZ-80A型履带自走式行间喷雾机有效防控区域显著降低。当作业速度在0.6~1.1 m/s范围内,雾滴覆盖率大于10%的有效喷施幅宽为6~8 m;当作业速度为1.5 m/s时,雾滴覆盖率大于10%的有效喷施幅宽不足4 m。

参 考 文 献

[1] 李少昆, 赖军臣, 明博. 玉米病虫害草害诊断专家系统[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009.

[2] 陈黎卿, 王韦韦, 杨洋, 等. 小麦秸秆还田下玉米机械智能装备设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

[3] 陈黎卿, 许鸣, 柏仁贵, 等. 高地隙植保机辅助驾驶系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 25-32. CHEN Liqing, XU Ming, BAI Rengui, et al. Design and test of auxiliary driving system for high-gap plant protection machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 25-32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190903&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.003. (in Chinese)

[4] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 植保无人机航空喷施作业有效喷幅的评定与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 82-90. CHEN Shengde, LAN Yubin, LI Jiuyu, et al. Evaluation and test of effective spraying width of aerial spraying on plant protection

- UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 82-90. (in Chinese)
- [5] 高圆圆, 张玉涛, 赵西城, 等. 小型无人机低空喷洒在玉米田的雾滴沉积分布及对玉米螟的防治效果初探[J]. 植物保护, 2013, 39(2): 152-157.
GAO Yuanyuan, ZHANG Yutao, ZHAO Youcheng, et al. Primary studies on spray droplet distribution and control effects of aerial spraying using unmanned aerial vehicle (UAV) against the corn borer[J]. Plant Protection, 2013, 39(2): 152-157. (in Chinese)
- [6] 苑进, 赵新学, 李明, 等. 高地隙喷杆式与隧道式一体喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2): 60-68.
YUAN Jin, ZHAO Xinxue, LI Ming, et al. Design and experiment of highland gap sprayer and tunnel type sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 60-68. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] CHEN L Q, WANG P P, ZHANG P, et al. Performance analysis and test of a maize inter-row self-propelled thermal fogger chassis[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(5): 100-107.
- [9] 陈黎卿, 许泽镇, 解彬彬, 等. 无人驾驶喷雾机电控系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 122-128.
CHEN Liqing, XU Zezhen, XIE Binbin, et al. Design and test of electronic control system for unmanned drive sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 122-128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190113&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2019. 01. 013. (in Chinese)
- [10] PETEINATOS GERASSIMOS G, BENJAMIN K, et al. A new logarithmic sprayer for dose-response studies in the field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157(1): 166-172.
- [11] 田志伟, 薛新宇, 徐阳, 等. 植保无人机下洗气流对作物冠层作用规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 40-48.
TIAN Zhiwei, XUE Xinyu, XU Yang, et al. Effect of plant protection UAVs downwash on crop canopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 40-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210105&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2021. 01. 005. (in Chinese)
- [12] 权龙哲, 郦亚军, 王旗, 等. 考虑风扰的对靶喷雾机械臂药液喷洒动力学建模与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 48-59.
QUAN Longzhe, LI Yajun, WANG Qi, et al. Modeling and testing on liquid pesticide spray of serial manipulator target weeding robot considering wind disturbance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 48-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180606&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2018. 06. 006. (in Chinese)
- [13] 张慧春, DORR Gary, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 53-57.
ZHANG Huichun, DORR Gary, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribution of flat fan nozzles[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2012, 43(6): 53-57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120610&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2012. 06. 010. (in Chinese)
- [14] 刘路, 杨路, 高观光, 等. 小型烟草植保机移动平台结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 156-162.
LIU Lu, YANG Lu, GAO Guanguang, et al. Structural design and test of wheeled tobacco plant protection mobile platform[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 156-162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190417&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2019. 04. 017. (in Chinese)
- [15] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 189-195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s029&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2016. S0. 029. (in Chinese)
- [16] 汪东, 陈青, 许林云, 等. 脉冲式烟雾水雾机热力雾化水剂农药效果分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 113-122, 130.
WANG Dong, CHEN Qing, XU Linyun, et al. Analysis on atomization effect of thermal atomization pesticide for pulsed smoker/fogger[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 113-122, 130. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201112&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2020. 11. 012. (in Chinese)
- [17] 蒋雪松, 周杰, 许林云, 等. 脉冲式烟雾水雾机工作频率影响因素研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 85-91.
JIANG Xuesong, ZHOU Jie, XU Linyun, et al. Influence factors of working frequency of pulsed smoker/fogger[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 85-91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2019. 11. 009. (in Chinese)

- [18] DORR G J, HEWITT A J, ADKINS S W, et al. A comparison of initial spray characteristics produced by agricultural nozzles [J]. *Crop Protection*, 2013, 53: 109 – 117.
- [19] 许林云,周宏平,高绍岩. 稳态烟雾机烟化管结构参数对烟化效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 40 – 46.
XU Linyun, ZHOU Hongping, GAO Shaoyan. Effect of structure parameters of exhausted tube in steady fogger on thermalatomizing effect of hot fogging concentrate[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(1): 40 – 46. (in Chinese)
- [20] 胡红,李洪文,王庆杰,等. 玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 26 – 35.
HU Hong, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between corn rows[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(24): 26 – 35. (in Chinese)
- [21] LI Z Q, CHEN L Q, ZHEN Q, et al. Control of a path following caterpillar robot based on a sliding mode variable structure algorithm[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 186(11): 293 – 306.
- [22] 宋树杰,瞿济伟,李靖宁,等. 农用车底盘偏置转向轴驱动轮运动与动力特性试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 28 – 34.
SONG Shujie, QU Jiwei, LI Yining, et al. Test on motion and dynamic characteristics of driving wheel of steering shaft with offset chassis of agricultural vehicle[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(23): 28 – 34. (in Chinese)
- [23] 陈莉,丁克坚,程备久,等. 沉降剂控制热雾机热雾滴扩散范围及防效的研究[J]. *植物保护*, 2011, 37(3): 157 – 160.
CHEN Li, DING Kejian, CHENG Beijiu, et al. Application of sedimentation agent to controlling the droplet spread of thermal fogger and control effect to crop diseases[J]. *Plant Protection*, 2011, 37(3): 157 – 160. (in Chinese)
- [24] 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 83 – 90.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 83 – 90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012. (in Chinese)
- [25] JB/T 9782—2014 植物保护机械 通用试验方法[S]. 2014.
- [26] 蒋焕煜,周鸣川,李华融,等. PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性实验[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 73 – 77.
JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, LI Huarong, et al. Experiment on dynamic droplet distribution uniformity for PWM variable spray system [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 73 – 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150310&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.010. (in Chinese)
- [27] 郭娜,刘思瑶,须晖,等. 雾滴沉积特性参数的图像检测算法改进[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 176 – 182.
GUO Na, LIU Siyao, XU Hui, et al. Improvement on image detection algorithm of droplets deposition characteristics[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(17): 176 – 182. (in Chinese)

(上接第 155 页)

- [18] TIAN Y, YANG G, WANG Z, et al. Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO – V3 model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157: 417 – 426.
- [19] 李寒. 基于机器视觉的目标检测在精细农业中的关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
LI Han. Study on target detection technology applied on precision agriculture based on machine learning[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [20] 张恩宇,成云玲,胡广锐,等. 基于 SSD 算法的自然条件下青苹果识别[J]. *中国科技论文*, 2020, 15(3): 274 – 281.
ZHANG Enyu, CHENG Yunling, HU Guangrui, et al. Recognition of green apple in natural scenes based on SSD algorithm [J]. *China Sciencepaper*, 2020, 15(3): 274 – 281. (in Chinese)
- [21] REN S, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R – CNN: towards real-time object detection with region proposal net-works[C] // *Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems*. Montreal, Quebec, Canada: NIPS, 2015: 91 – 99.
- [22] 樊湘鹏,周建平,许燕,等. 基于优化 Faster R – CNN 的棉花苗期杂草识别与定位[J/OL]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 26 – 34.
FAN Xiangpeng, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Identification and localization of weeds based on optimized Faster R – CNN in cotton seedling stage[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 26 – 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210503&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.05.003. (in Chinese)
- [23] HE K M, GKIOXARI G, DOLL Á R P, et al. Mask R – CNN[C] // *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venice, Italy: IEEE, 2017: 2980 – 2988.
- [24] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization[C] // *In the 4th International Conference on Learning Representations (ICLR) 2015*. arXiv preprint arXiv:1412.6980v9.