doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.021

基于视觉识别的玉米病虫害检测与精准变量喷药系统研究

朱惠斌 王明鹏 白丽珍 张媛媛 刘 祺 李镕东
（昆明理工大学现代农业工程学院，昆明 650500）

摘要：针对传统无差别连续式喷药存在农药浪费、喷施低效的问题，以玉米为研究对象，设计一套基于视觉识别的病虫害检测及精准变量喷药系统。结合图像处理和机器视觉技术，对玉米田间病虫害自动、快速和准确识别，并根据识别的病虫害种类及严重程度，自动调整喷药剂量，实现精准农业管理。将自主设计的变量喷药系统集成并部署于计算机控制系统中，并对其检测性能进行验证，试验结果表明，相较于基准模型YOLO v5s，改进后模型精确率（P）、召回率（R）、mAP值分别提升1.6、1.3、0.7个百分点，降低了病虫害误检，避免对非病虫害区域的误喷，同时减少漏检确保了病虫害区域得到及时有效处理，综合反映了系统在不同病虫害类别上的整体识别能力；对于玉米螟、黏虫、灰斑病、叶斑病和锈病，模型识别准确率稳定在60%以上，而对于红蜘蛛、蚜虫识别准确率则在40%以上。于田间进行喷药性能试验，并对雾滴沉积、雾滴漂移及省药率等关键指标进行测试与分析，结果表明，最低雾滴覆盖率为52%，最低平均沉积密度为71.3滴/cm^2，均达到病虫害防治要求；省药率与地面流失率最低值分别为32.1%和22%，显著降低了农药总体消耗量和地面流失率。本文设计的玉米病虫害检测及精准变量喷药系统，显著提升了病虫害识别准确性，提高了农药利用率并降低环境污染，为病虫害防控提供科学高效的解决方案。

关键词：玉米病虫害检测；深度学习；计算机视觉；PWM变量控制；YOLO；精准变量喷药
中图分类号：S24 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S2-0210-12

Maize Pest and Disease Detection and Precise Variable Spraying System Based on Visual Recognition

ZHU Huibin WANG Mingpeng BAI Lizhen ZHANG Yuanyuan LIU Qi LI Rongdong
(*Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: A set of pest and disease detection and precise variable spraying system, based on visual recognition, was designed for maize, addressing traditional issues of pesticide waste and spraying inefficiency. Utilizing image processing and machine vision, this system automatically and accurately identified pests and diseases in maize fields, adjusting spraying doses accordingly. It was then integrated into a computer control system, with its performance verified. The system surpassed the benchmark model YOLO v5s, improving P, R, and mAP by 1.6, 1.3 and 0.7 percentage points, respectively. The high precision rate reduced false detection of pests and diseases to avoid false spraying of non-pest areas. The high recall rate reduces missed detection to ensure timely and effective treatment of pest and disease areas. The improvement of mAP value comprehensively reflected the overall identification ability of the system in different pest and disease categories. It stably identified maize stem borer, slime molds, grey spot, leaf spot, and rust diseases with over 60% accuracy, and red spider and aphid with over 40% accuracy. Field tests evaluated droplet deposition, drift, and pesticide saving rates. The system achieved a minimum droplet coverage of 52% and deposition density of 71.3 drops/cm^2, satisfying pest control needs. Pesticide saving and ground wastage rates reached lows of 32.1% and 22%, respectively, significantly reducing overall pesticide consumption and waste. This maize pest and disease detection and precision variable spraying system significantly enhanced identification accuracy, improved pesticide utilization, and reduced environmental pollution, offering a scientific and efficient approach to pest and disease management.

收稿日期：2024-08-03 修回日期：2024-09-23
基金项目：国家自然科学基金项目(52265033、51865022)和云南省自然科学基金项目(202401AS070115)
作者简介：朱惠斌(1974—)，男，教授，博士生导师，主要从事山丘区保护性耕作技术与装备研究，E-mail: hbzhu113@163.com
通信作者：白丽珍(1975—)，女，高级实验师，主要从事智慧农业生产技术与装备研究，E-mail: lzhbai@163.com

Key words：maize pest detection；deep learning；machine vision；PWM variable control；YOLO；precision variable spraying

0　引言

玉米作为三大粮食作物之一，对于保障国家粮食安全、促进农村经济发展具有重要作用。然而，病虫害会严重损害玉米叶片、茎秆、根系等器官，导致光合作用减弱、养分吸收受阻、生长发育受限等问题，进而降低玉米产量与质量。针对西南丘陵山地大豆玉米间套复种模式下玉米大豆间的病害传播，为达到玉米大豆增产提质的目的，在大豆播种前必须采取迅速高效的防治手段[1]。

在农业病虫害防控体系中，化学防治以其快速响应与短期内大范围遏制的优势，成为关键手段之一。然而，国内智能植保与喷药技术发展有限[2-4]，大田作业多依赖低效的连续喷洒模式，导致农药利用率低。同时，化学农药易飘散至非目标区，加剧资源消耗并削弱防控效果。相比之下，变量喷药技术作为病虫害防控领域的技术趋势，其根据病虫害特征实时动态调整药量，实现精准施药[5]。近年来，国内外学者在病虫害检测与防控、精准农业与变量喷药技术等方面进行了广泛而深入的研究。在变量喷药技术方面，基于无人机、地面机器人等智能装备的喷药系统逐渐应用于农业生产中[6-9]。尽管现有变量喷药系统在提高农药使用效率和减少环境污染方面取得了一定成效，但不同地区的作物种类、生长环境及病虫害情况存在差异，需要开发更加智能化、适应性强的变量喷药系统以满足实际需求。

本文以西南山地丘陵地区玉米种植带，玉米大豆间套复种模式下的7种高发病虫害为研究对象，利用深度学习网络，构建玉米病虫害识别模型，并结合玉米大田植保阶段的农艺信息研究设计变量喷药控制系统。实现对玉米田间病虫害的自动、快速和准确识别，并完成精准变量喷药，以提高田间喷药工作效率和农药利用率。

1　基于视觉识别的玉米病虫害检测及变量喷药系统总体设计

玉米喷药机器人集成了先进的视觉传感器技术，能实时捕获并分析玉米植株的病虫害信息，为变量喷药系统提供精准的数据支持。本研究聚焦于基于视觉识别的玉米病虫害检测技术及PWM占空比调控的流量优化策略，旨在构建一套高效的变量喷药控制系统，实现精准、按需的农药施用。系统架构如图1所示，其核心包括病虫害在线监测、变量喷药控制及通信3大模块。在线监测模块利用DW1600型工业相机捕捉田间数据，结合改进的YOLO v5深度学习模型，实现病虫害的精准识别与等级评估。变量喷药控制模块集成单片机、电气比例阀及电磁阀等组件，依据病虫害等级动态调整PWM占空比，进而控制电气比例阀开度，实现对喷药流量的精确调节。此机制确保了喷药系统能迅速响应病虫害变化，实现流量与病虫害严重程度的动态匹配。通信模块则通过RS232接口，将病虫害信息传递给STM32F407单片机，该单片机内置基于增量式PID算法的PWM占空比与流量映射关系。为进一步提升喷药效率与精准度，本研究依据喷药控制系统架构与玉米病虫害病情等级，构建施药量数学模型与喷头流量预测模型。

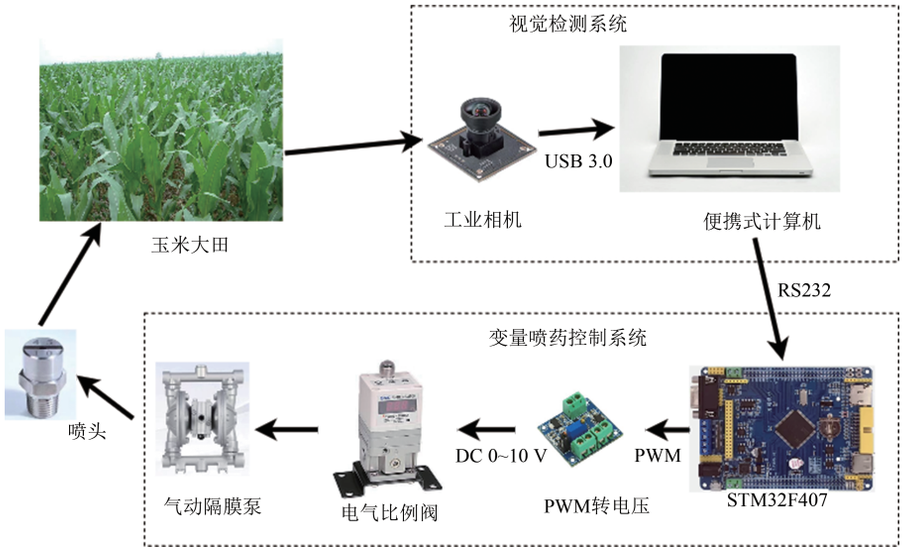


图1　变量喷药系统工作原理图

Fig. 1　Schematic of working principle of variable spraying system

2 玉米病虫害检测模型构建及优化

2.1 数据集建立

本文的图像数据集来源于昆明理工大学保护性耕作试验田，种植模式为玉米大豆间套复种。以西南丘陵大豆玉米间套复种模式下植保阶段常见的7种高发病虫害为防治对象，其分别为红蜘蛛、玉米螟、黏虫、蚜虫、灰斑病、锈病、叶斑病，如图2所示。于2023年6月中旬至8月上旬玉米病虫害高发季节，在不同天气和不同时段（13：00—17：00）的自然光条件下，利用配备6 400万像素后置广角镜头的vivos9e型手机，收集了1 300幅复杂背景中的玉米病虫害图像，分辨率为3 456像素×4 608像素。此外，为丰富数据集的多样性，还结合了网络上的IP102图像数据。本文数据集原始数据集总计2 044幅图像。其中，红蜘蛛160幅、玉米螟450幅、黏虫205幅、灰斑病125幅、锈病277幅、蚜虫431幅、叶斑病396幅。

2.2 图像数据集预处理

为尽可能地还原模型应用的实际环境，本文采取对比度增强、亮度增强、色彩增强3种方式对原始数据集进行预处理，以提高模型在不同的条件或场景的泛化能力。此外，考虑到相机在高速运动下，被拍摄物体在被拍摄的时间内有一定距离的移动，而造成图像模糊。故添加运动模糊和高斯噪声处理，降低模型对输入数据的敏感度和理解并适应输入图像中的微小变化，迫使模型学习数据的多个冗余表示，使其变得更加健壮不易过拟合，从而提高模型的鲁棒性。数据集详细数据如表1所示。

鉴于玉米病虫害的种类繁多、病害发生的时序差异和虫害生长阶段形态变化的复杂性，导致无监督学习方法在缺乏明确类别标签的情况下难以进行有效聚类。因此，本模型采用有监督学习方式。为确保模型的高效性和准确性，对扩充后的数据集进行随机划分，训练集与验证集数据量比例为8：2。在模型训练前，利用Labelimg工具对训练集数据进行精确标注，从而为模型提供准确可靠的训练依据，保障其能精准识别各类玉米病虫害。



(a) 红蜘蛛 (b) 玉米螟 (c) 黏虫 (d) 蚜虫 (e) 灰斑病 (f) 锈病 (g) 叶斑病

图2 病虫害种类

Fig. 2 Types of pests and diseases

表1 数据集详细扩充信息

Tab. 1 Detailed expansion information for dataset

病虫害种类	原始数量	对比度0.5/1.5	亮度0.5/1.5	颜色增强0.5/1.5	高斯噪声	运动模糊
红蜘蛛	160	160	160	160	160	160
玉米螟	385	385	385	385	385	385
黏　虫	205	205	205	205	205	205
蚜　虫	431	431	431	431	431	431
灰斑病	125	125	125	125	125	125
锈　病	277	277	277	277	277	277
叶斑病	396	396	396	396	396	396

2.3 病虫害特征提取与识别算法优化

鉴于田间环境的复杂性，玉米病虫害检测面临背景干扰、目标尺度多变及病虫害区域形态不规则等问题。为克服这些难题，本文以玉米病虫害图像数据为研究对象，从激活函数、主干网络和非极大值抑制后处理方面优化YOLO v5，构建玉米病虫害检测模型，通过对比选出最优模型，并设计玉米病虫害在线检测平台，实现检测过程可视化和人机交互。提出了一种基于改进YOLO v5模型的小目标检测方案，该方案专为复杂环境下的玉米病虫害检测设计，旨在显著提升检测速度与精度。优化后的模型神经网络图如图3所示，具体内容如下：

（1）通过利用Swin TransformerV2替换YOLO v5的主干网络，并在模型中添加HardSwish激活函数；将GhostNet模块引入并替换YOLO v5中的部分组件，进行轻量化，提高检测速度。

（2）为降低基于IOU的度量对小目标位置偏差的敏感性，引入非极大值抑制后处理，将期望回归之间向量角度问题纳入考虑范围，提高检测精度和推理速度。

（3）基于改进模型设计开发玉米病虫害在线检测软件，并将其部署于计算机上。

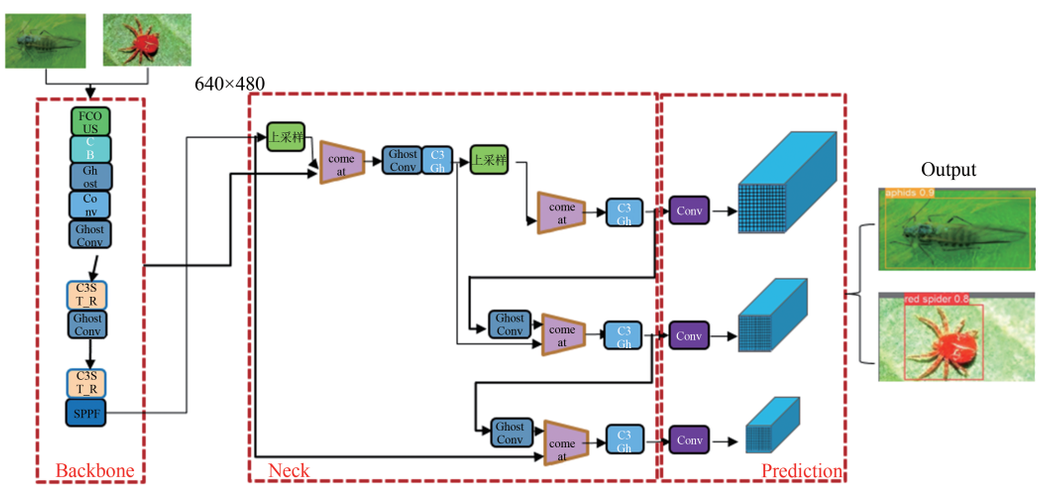
Swin TransformerV2替换YOLO v5主干网络的主要因素包括其强大的特征提取能力和对复杂场景的适应性。Swin TransformerV2结合了Transformer的全局自注意力机制和卷积神经网络的局部特征提取优势，能够在保持高效计算的同时，更好地捕捉图像中的长距离依赖关系。在田间复杂环境中，病虫害往往呈现出多变的形态和分布，需要模型具备更强的特征表示能力。因此，本研究认为Swin TransformerV2的引入能够显著提升模型对复杂病虫害特征的提取效果，进而提高检测精度。

GhostNet作为一种轻量级网络结构，其核心思想是通过简单的线性变换来生成冗余特征图，从而减少计算量和参数量。在保持模型精度的同时，GhostNet能够显

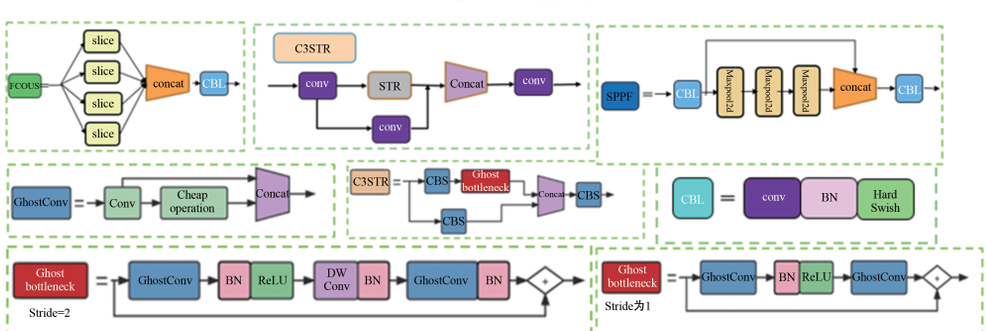
著降低模型的计算复杂度，提高检测速度。在田间病虫害检测的实际应用中，检测速度是一个非常重要的指标，因为它直接影响到农药喷洒的及时性和效率。通过引入 GhostNet 模块，能够在保证检测精度的前提下，有效减少模型的计算负担，提高检测速度，从而满足实际应用的需求。

相较于传统的 ReLU 激活函数，HardSwish 激活函数因其分段线性特性，不仅保持了非线性优势，还具有高准确性、高效计算和数值稳定性好的特点，尤其适用于资源受限的移动场景。因此，选择 HardSwish 作为基于改进 YOLO v5 的玉米病虫害检测模型的激活函数，能够在满足检测精度的同时，提高计算效率和稳定性。

在玉米病虫害检测过程中，不仅要求模型能够准确识别和分类多种病虫害，而且必须着重提升模型的实时性和准确性，以确保检测的高效性和可靠性。在模型训练过程中，针对指向同一目标物体的冗余检测框问题，本研究结合 SIoU 和非极大值抑制（NMS）后处理技术以提高检测准确性。SIoU 不仅考虑了预测框与真实框之间的面积交集与并集比例，还引入形状和方向的考量，从而更准确地评估预测框的质量。NMS 则通过排序检测到的边界框的置信度，选择最高置信度的框作为基准，并计算其与其余框的 SIoU 值。若 SIoU 超过预设阈值，则降低相应框的置信度，从而消除冗余，确保每个目标仅输出一个最准确的检测框，有效提升检测的精度和鲁棒性。



（a）改进 YOLO v5 整体结构



（b）改进 YOLO v5 基础模型

图 3　改进 YOLO v5 模型网络结构图

Fig. 3　Improved YOLO v5 model network structure diagram

2.4　病虫害在线检测平台设计

玉米病虫害在线检测系统软件基于 Python 在 PyCharm 环境中开发，旨在实现高效人机交互。系统采用 PYQT5 构建 GUI，通过 Python 脚本快速集成模型、摄像头等模块，实现检测智能化与结果即时反馈，并在检测后评估病虫害等级，为玉米病虫害管理提供高效支持，如图 4 所示。

3　变量喷药流量控制方法

3.1　精准喷药实现机制

在变量喷药系统中，压力稳定性对喷头流量控制至关重要。调整 PWM 占空比虽可调流量，但流量波动影响压力稳定，进而反制流量精准控制。因此本文基于增量式 PID 通过简化计算、避免积分饱和，设计了一种恒压喷雾系统，实现压力自动调节与喷头流量精准控

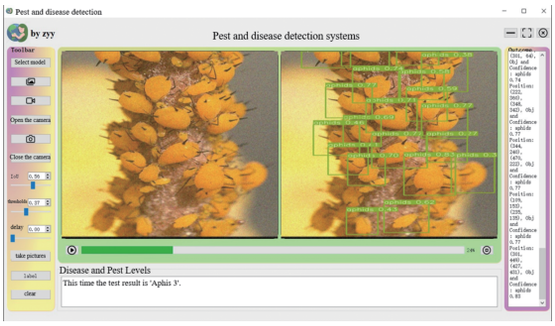


图4 玉米病虫害在线检测软件界面

Fig. 4 Online detection software for maize pests and diseases

制[10]。系统的整体结构如图5所示,该系统架构涵盖压力控制、供水及流量调节3大子系统。压力控制系统集成压力传感器、电气比例阀、PWM转换模块、气动隔膜泵、STM32F407单片机及上位机,通过闭环反馈调整PWM占空比,稳定管路压力。供水系统则包含药液桶、空气压缩机、电气比例阀、气动隔膜泵、过滤器及调压阀,确保药液经过滤、加压后稳定供给。流量调节子系统由计算机、STM32F407单片机、电磁阀、继电器及喷头构成,采用统一口径设计以减少管路压力损失。

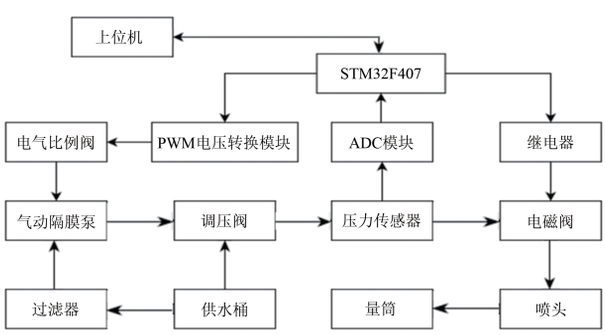


图5 恒压喷雾系统整体结构图

Fig. 5 Overall structure of constant pressure spray system

变量喷药控制系统采用电气比例阀与PWM控制技术,精确调节农药输出量。如图6所示,该系统结合压力反馈与自动调节机制,确保喷药压力稳定;双支路多喷头设计提升喷药覆盖与均匀性;病虫害检测触发动态调节,减少农药浪费;同时,防腐与密封设计保障系统稳定运行。该系统实现了农药精准喷施,提高了利用效率,降低了环境污染。

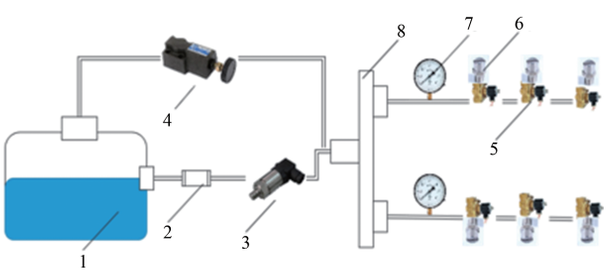


图6 喷药液压通路示意图

Fig. 6 Schematic of hydraulic pathway for spraying

1. 药箱 2. 过滤器 3. 气动隔膜泵 4. 溢流阀 5. 电磁阀 6. 喷头 7. 压力表 8. 分流器

3.2 喷头流量模型构建

3.2.1 喷头流量等级决策方法

为提高玉米大田管理效率,采用病虫害在线识别分级处理,依据《农药田间药效试验准则》[11-13]和王晓鸣的《玉米抗病虫性鉴定与调查技术》[14],将病虫害分为高抗(HR)、中抗(MR)、高感(HS)3级,如表2所示。针对2级及以上病害,推荐3%甲维盐5~8g+18.7%丙环·嘧菌酯50~70 mL或40%氯虫·噻虫嗪10~12g+17%唑醚·氟环唑40~60 mL混合喷雾,每公顷兑水750 kg。据此设定施药量:3级病害750 kg/hm^2,2级600 kg/hm^2,1级525 kg/hm^2,以实现精准控药。

表2 玉米病害虫害评价标准

Tab. 2 Evaluation criteria for maize diseases and insect pests

平均病情等级	病害等级	虫害等级	抗性评价
1	1、2	<5	高抗(HR)
2	3~7	5~11	中抗(MR)
3	>7	>11	高感(HS)

3.2.2 喷头间距与射程的模型

本文采用的扇形喷头,其喷出的药液形成平面扇形,使得变量喷药装置的喷雾面在作业中呈矩形。因此,根据装置的横向喷药方式,将多个喷头沿两侧等间距分布,以此构建了喷头间距与射程的模型[15-16],如图7所示。

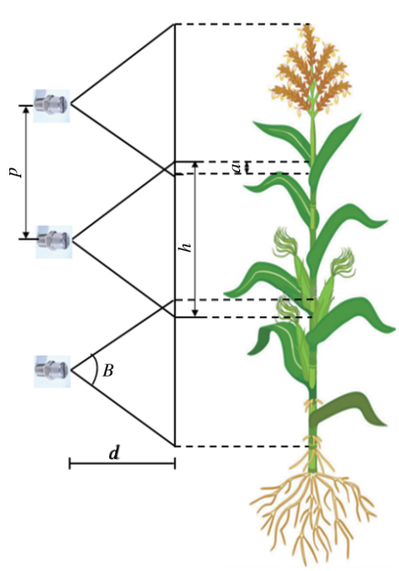


图7 喷头分布距离与喷头射程模型

Fig. 7 Distribution distance of nozzles and nozzle range modeling

参考传统喷药装置经验,喷头间的有效喷药依赖雾液重叠,建议重叠率为0.25~0.30。为全面覆盖玉米叶片,确保喷药效果,设定相邻喷头喷雾重叠距离a=0.3p。基于图7的几何关系,可推导出相关公式

$$h = 2d\tan\frac{B}{2} \tag{1}$$

$$p = h - a \tag{2}$$

式中 h——喷头喷雾面高度,cm

d——喷雾距离，cm

B——喷射角，(°)　　p——喷头间距，cm

整理可得p和d的关系式为

$$p = 1.4d\tan\frac{B}{2} \tag{3}$$

本文所用喷头喷雾角度B=110°，代入式(3)得

$$p = 2.002d \tag{4}$$

对玉米大田实地测量可知，喷头射程d为20～40 cm，将d代入式(4)得h为40～80 cm。为兼顾喷药系统的雾化效果与喷头的作业幅宽，取h=50 cm，确保喷药作业的有效性。

为优化变量喷药效果，需选择合适的喷头孔径。因此，在恒压条件下对喷头流量进行测试，为喷杆设计与喷头安装提供参考依据[17]。在实际应用中，孔径增大虽可有效提升流量，但易致农药浪费。因此，为探索适宜的喷头孔径，对5种孔径0.66、1.1、1.4、1.8、2.0 mm喷头进行标定试验。

如图8所示，孔径1.8 mm和2.0 mm的喷头随着管路压力增加，喷头流量会发生陡升似的增加趋势。究其原因可知，管路内流量变化太大会引起管路压力变化剧烈，使得基于PWM占空比的流量调节控制精度下降。而孔径0.66、1.1、1.4 mm的喷头流量随着管路压力增加，均平稳上升。考虑到管路长度增加及电磁阀摩擦导致的压力损失，本研究根据喷药系统喷头高度选用不同孔径，以确保系统的连续无级控制和喷雾均匀性[18-20]。

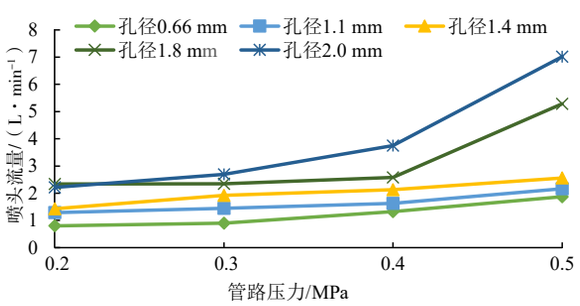


图8　不同孔径喷头流量

Fig. 8　Flow rate of different orifice nozzles

3.2.3　喷头流量占空比流量模型

为精确分析喷头流量变化趋势，于昆明理工大学保护性耕作试验田，实施喷药机喷雾系统喷头流量标定试验(图9所示R1、R2、R3表示喷药装置右侧由下至上3个喷头，L1、L2、L3表示喷药装置左侧由下至上的3个喷头)。该系统工作压力调控于0～0.5 MPa，装置两侧喷头对称分布，间距50 cm，但鉴于喷头L3与R3若保持此距会造成农药浪费，故将L2与L3间距缩短至40 cm。表3详细列出了各喷头与气动隔膜泵出水口的相对高度及出药管路长度参数。

根据《农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定》[21]的标准，农用喷雾机压力为0.3～0.5 MPa。鉴于系统长期承受最大压力(0.5 MPa)可能影响其稳定性，故本研究将喷雾系统压力设定为0.4 MPa。



图9　变量喷药系统中喷头分布

Fig. 9　Distribution of nozzles in variable spraying system

表3　喷头与出水口管路长度和距地面高度

Tab. 3　Spray nozzle and outlet line lengths and heights from floor　　cm

喷头编号	安装高度	管路长度
R1	90	80
L1	90	103
R2	140	132
L2	140	155
R3	180	182
L3	180	190

在试验阶段，通过流量调节系统实施对电气比例阀的PWM控制，通过调整占空比以实现不同的流量输出。标定流程严格遵循恒压喷雾系统喷头流量标准试验方法，利用上位机调整PWM占空比，并借助量筒和秒表记录30 s内的喷头流量，进而计算出各占空比下的标定值。如图10所示，数据分析明确指出了喷头流量与PWM占空比在10%～60%区间内存在线性关系；然而，当占空比从60%提升至90%时，该线性关系逐渐减弱，变得不再明显，这一现象与恒压喷雾系统喷头流量标定的普遍规律相吻合。此外，试验过程中一个不可忽视的因素是隔膜泵与空气压缩机的频繁启停，导致管路压力难以维持稳定状态，进而造成部分喷头流量测量值偏高，这一因素不可避免地影响了喷头流量的标定精度。因此，在后续的研究与应用中，需进一步优化试验条件，以减少此类干扰因素对标定结果的影响。

鉴于玉米植株冠层分布特性的考量，文中已实施随高度变化的喷头孔径调整策略，并辅以PWM占空比控制电气比例阀开度，以精细调节喷药流量，故只需对药液系统出水口流量的精确控制。因此，为满足应用场景和设计需求，在明确相关使用条件后，可构建喷头流量模型为

$$q = 0.068X + 0.5664 \quad (R^2 = 0.9) \tag{5}$$

式中　q——喷头流量，L/min

X——占空比，%

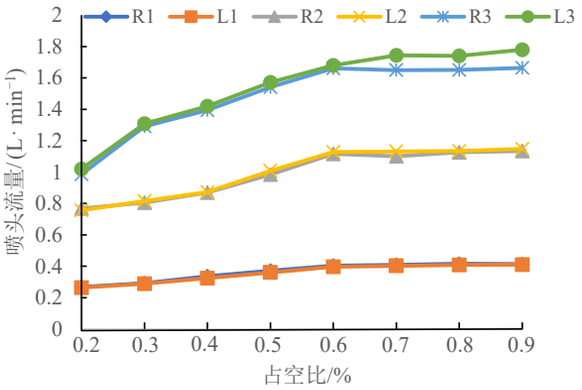


图10 0.4 MPa下喷药控制系统喷头流量标定结果

Fig. 10 Spray control system nozzle flow rate calibration results at 0.4 MPa

在液体管路系统中,压力损失主要可划分为沿程压力损失与局部压力损失两类。鉴于本研究中所有喷头均采取统一安装方式,且电磁装置与喷头直接相连,故局部压力损失可视为次要因素予以忽略,从而采用沿程压力损失作为整个液体管路压力损失的主要表征。沿程压力损失计算遵循公式

$$\Delta P_f = \frac{\lambda l \rho v^2}{2D} \tag{6}$$

式中 ΔP_f——管路压力损失值,MPa

D——管道直径,m

v——管路液体流速,m/s

λ——管路沿程压力损失系数

ρ——药液的密度,kg/m^3

l——管路长度,m

由式(6)可知,同一药液系统内,药液管路长度延伸导致管道损失值相应增大。而高位喷头出水口压力下降的现象,则可归因于液体自重、电磁阀与喷头连接处的摩擦阻力等多重因素的共同作用。为应对此压力变化,在喷头流量标定过程中,采取对较高位置喷头配置较大孔径的策略,并通过重复标定流程加以验证。试验数据表明,不同高度下的喷头流量模型展现出相似性,且与恒压喷雾系统下构建的喷头流量模型差异不显著。这一研究为变量喷药机喷头孔径的优化选择及合理间距布局提供了有力的理论支撑与实践指导。

4 试验

为验证基于视觉的变量喷药系统在大田环境下的喷雾效果,本研究于2024年3月13日在昆明理工大学保护性耕作试验田内实施了控制性试验。当日天气为西风5级、相对湿度22%、温度22 ℃,为避免风力对喷药效果造成的不利影响,并确保摄像头在监测玉米病虫害时能够准确捕捉信息(避免叶片因风动导致的重复或错误采集),试验选择在棚内进行。试验以玉米植株为对象,通过变量喷药系统实施了雾滴沉积、雾滴漂移及省药率等关键指标的测试与分析,以全面评估该系统的施药效果与性能。

4.1 玉米病虫害检测模型性能试验

为验证所提出的改进方案对提升模型性能的有效性,以YOLO v5s为基准模型,通过添加不同的模块来验证模型性能,试验结果如表4所示,其中P衡量模型检测到的正样本中真正为正样本的比例,有助于避免对非病虫害区域的误喷;R则衡量模型检测到的正样本占所有真实正样本的比例,确保了病虫害区域得到及时有效处理;mAP代表模型在所有类别上的平均检测精度,综合反映了系统在不同病虫害类别上整体识别能力;F1值是精确率和召回率调和平均,用于综合评估模型的性能。改进后的模型在各项评估指标展现出显著优越性,其适应性、精度及预测结果的准确性与可靠性均优于其他对比模型。具体而言,相较于基准模型YOLO v5s,改进后模型P、R、mAP分别提升1.6、1.3、0.7个百分点,同时损失值降低0.004 7,F1值亦提升0.9个百分点,表明其性能全面优化。这些指标的提升不仅意味着系统能够更准确地从复杂背景中区分病虫害,减少误报与漏报,还直接关联到实际农业生产中病虫害防治的效率与效果。

表4 各模块对模型性能的影响

Tab. 4 Influences of each module on model performance

编号	YOLO v5s	HardSwish	SIoU	C3STR	Ghost	NMS	mAP /%	R /%	P /%	F1值 /%
1	√						98.5	97.6	96.8	96.2
2	√			√			99.1	98.8	97.6	94.8
3	√	√		√			99.1	98.5	98.1	95.4
4	√	√	√	√			99.1	98.2	98.0	94.1
5	√	√	√	√	√		98.5	98.0	96.3	89.8
6	√	√	√	√	√	√	99.2	98.9	98.4	97.3

田间实时测试结果如图11所示,充分验证了本文所改进的YOLO v5检测模型在玉米病虫害检测领域的有效性。该模型通过引入更精细的特征提取网络和优化的锚框设计,显著提升了对玉米生长过程中常见病虫害的识别能力。对于体积较大、特征明显的病虫害目标,如玉米螟、黏虫、灰斑病、叶斑病以及锈病等,模型识别准确率稳定在60%以上。而对于红蜘蛛、蚜虫等体型微小、特征细小的病虫害识别准确率达到40%,但相较

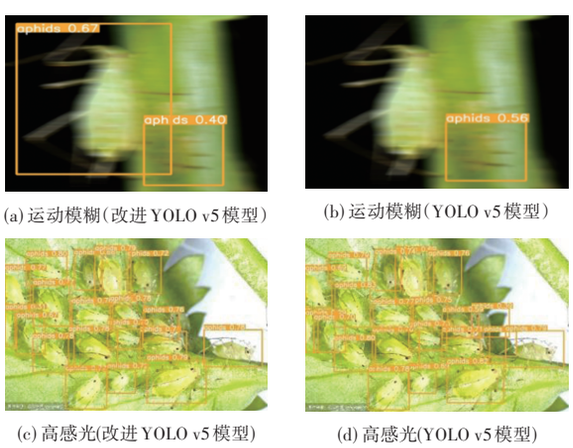


图 11　玉米病虫害在线检测软件检测结果

Fig. 11　Corn pest and disease online detection software detection results

于大目标检测仍有一定差距。深入分析此现象，可归因于以下几方面因素：①玉米螟、黏虫、灰斑病、叶斑病以及锈病，由于体积较大、特征明显准确率相对较高，但玉米螟与黏虫，灰斑病、叶斑病以及锈病，在特定生长阶段呈现出相似的形态特征，加之可能受玉米叶片等复杂背景干扰，进一步加剧了检测的难度，从而表现出类似的性能瓶颈。②红蜘蛛与蚜虫等小型害虫，由于其体积小且易于发生相互遮挡，给检测算法带来了识别上的困难，导致部分实例未被准确捕捉。针对上述原因，需针对这些类别进行特定的数据增强或模型调整，以提升整体检测性能。一方面，可通过数据增强技术，如合成遮挡样本、模拟不同光照条件下的图像等，以丰富训练数据集，提升模型对复杂场景的适应能力。另一方面，可调整模型架构或优化参数配置，以更好地捕捉细微特征差异，提高检测精度与召回率的均衡性。

由检测结果可知，改进后模型通过技术创新，有效解决了原模型在运动模糊场景下易出现的漏检问题，显著提升了检测准确性与稳定性，如图 12 所示。此外，该模型在高感光环境下对小目标和遮挡目标的识别能力得到增强。这初步验证了改进后模型在复杂场景下的检测准确性，对于提升玉米病虫害检测模型的实用性与可靠性具有重要意义。分析其原因可知，Swin TransformerV2 增强了模型捕获图像中长距离依赖关系的能力，显著提升了全局上下文感知能力，相较于传统卷积网络受限于局部感受野，有效拓宽了全局依赖的捕获范围。在 YOLO v5s 基础上引入 Swin TransformerV2 并替代 C3 模块部分组件的创新性设计，使得改进后网络架构既保持了对局部细节的敏感性，又增强了全局上下文感知，促进了更为全面和精细的特征表征，最终实现了复杂场景下目标检测准确性的提升。



(a) 运动模糊（改进 YOLO v5 模型）　(b) 运动模糊（YOLO v5 模型）

(c) 高感光(改进 YOLO v5 模型)　(d) 高感光(YOLO v5 模型)

图 12　运动模糊情况下检测效果对比

Fig. 12　Comparison of detection effect in case of motion blur

此外，本文结合田间拍摄的图像与网络图像建立数据集，并对其进行预处理，增加了图像数据的复杂性，降低了模型对输入数据的敏感度和理解并适应输入图像中的微小变化，迫使模型学习数据的多个冗余表示，使其变得更加健壮不易过拟合。本文还采用有监督的训练方式，有效解决了无监督学习方法针对玉米病虫害的种类繁多、病害发生的时序差异和虫害生长阶段形态变化的复杂性，而缺乏明确类别标签的情况下难以进行有效聚类的问题，提高了模型对复杂图像数据集的学习能力，从而提升模型在复杂环境下的鲁棒性和在不同的条件或场景的泛化能力。

4.2　喷药性能试验

针对视觉变量喷药控制系统装置的性能验证，本研究依据 JB-T 9782-2014《植保机械通用试验方法》标准，从雾滴分布均匀性、雾滴沉积效果及地面流失率 3 个维度综合评估其喷药效果是否满足玉米大田作业需求。试验流程设计如下：

水敏纸布置：基于前文确定的喷头间距与喷洒区

域，精确布置雾滴采样点于每株玉米植株的上、中、下部，利用透明亚克力夹子将水敏纸固定于各采样点，同时于喷药装置周边地面铺设水敏纸以测算地面流失率，具体布置如图13所示。



(a) 仿真玉米植株1、2　　(b) 仿真玉米植株3、4

图13　水敏纸布置图

Fig. 13　Water-sensitive paper layout

雾滴沉积测试：采用清水替代实际药液，在相同条件下进行变量喷药与传统喷药重复试验。每次作业后，立即收集并密封各采样点水敏纸，予以编号处理。

省药效率评估：特设试验组与对照组以量化省药效果。通过量筒精确收集各组喷头释放的药液量，并于试验结束后对比分析，以验证变量喷雾系统的省药能力。

水敏纸图像处理：运用扫描仪对水敏纸进行高清扫描，转换为数字图像保存，为后续通过图像分析技术详尽评估喷雾效果奠定数据基础。

4.2.1　雾滴沉积数据处理

将水敏纸扫描为数字图像并妥善存储后，采用ImagePy雾滴沉积分析软件对图像进行深入解析，精准输出覆盖率、沉积点数、沉积点密度及雾滴粒径等核心喷雾效果评价指标，处理流程如图14所示。为避免亚克力夹子夹持，导致的边缘数据干扰，分析过程专注于水敏纸的中心有效区。针对扫描图像可能存在的模糊与噪声问题，通过灰度化、锐化等预处理技术增强雾滴特征，降低识别误差。

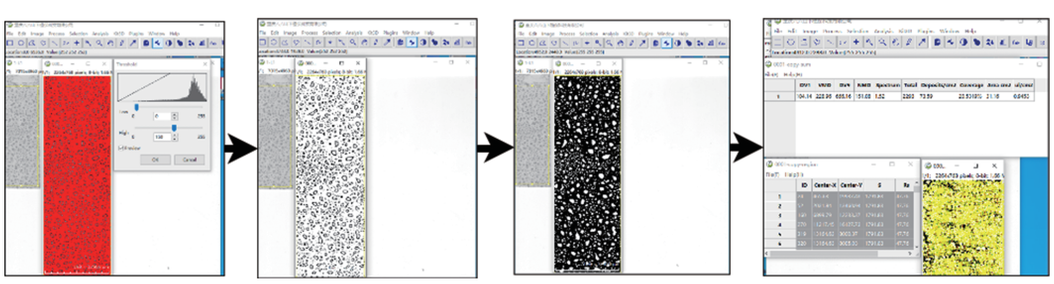


图14　雾滴沉积数据分析流程

Fig. 14　Flow of droplet deposition data analysis

4.2.2　病虫害防治效果评价

本试验以变量喷雾的雾化沉积效果为评价指标[22-23]，评估防玉米病虫害防治效能。通过设计3种病虫害程度的喷药模式，并深入分析每种模式下左右两侧玉米植株上6个特定位置的试验数据[24-26]，旨在全面揭示喷雾效果的空间分布特性。同时，为量化药液的地面流失情况，对地面的雾滴采样点数据进行分析[27]。

喷雾覆盖率作为衡量单位时间内农药施用量的重要指标，其变化趋势在不同病虫害程度的变量喷药模式下呈现出显著差异，如图15所示。1级病虫害条件下，雾滴覆盖率52%；而随病虫害等级提升至2级与3级时，覆盖率相应增长至60%与81%。分析结果表明，病虫害严重程度的增加促使控制系统提升PWM占空比，进而增大喷头流量，以实现更广泛的雾滴覆盖。对比国家农业部设定的雾化机械雾滴覆盖率阈值（大于33%），本研

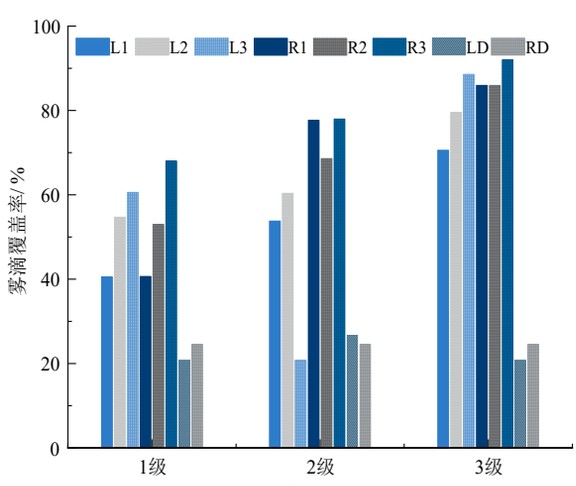


图15　不同病虫害程度下雾滴覆盖率对比

Fig. 15　Comparison of fog droplet coverage at different levels of infestation

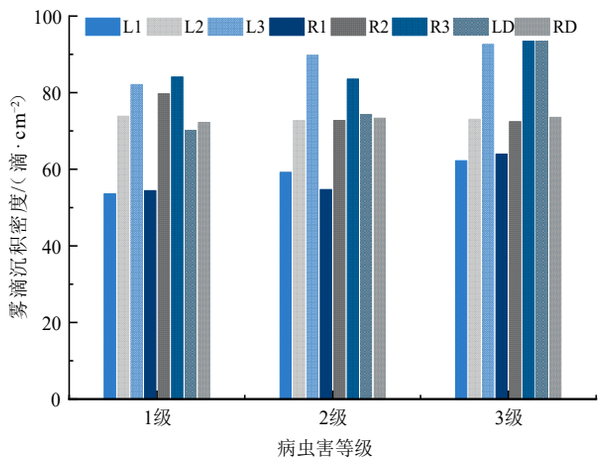


图 16　不同病虫害程度下雾滴沉积密度对比

Fig. 16　Comparison of fog droplet deposition density at different levels of infestation

究中各病虫害等级及采样区域的喷药覆盖率均显著超出此基本要求，验证了喷雾系统在不同病虫害情境下的有效性与适应性。

雾滴沉积密度作为评估药液分布均匀性的参数，其数值在不同病虫害程度下通过对比变量喷药与常量喷药模式得以明晰，如图 16 所示。具体而言，1 级、2 级及 3 级病虫害条件下，平均沉积密度分别为 71.3 滴/cm²、72.1 滴/cm²及 76.3 滴/cm²。参照农业喷洒作业的质量标准，即雾滴沉积密度需大于 30 滴/cm²，本研究中的各项数据均远超此标准，表明喷雾沉积密度充分满足病虫害防治的严格要求。进一步结合先前关于喷雾覆盖率分析，两者共同印证了本文所设计的变量喷药控制系统在提升病虫害防治效果方面的卓越性能与实用性。

4. 2. 3　省药量评估

为量化评估变量喷药系统的农药利用效率，设计了变量喷药和传统喷药对比试验。试验过程中，采用烧杯精确记录 30 s 内的施药量，试验重复 3 次，结果如表 5 所示。对比不同病虫害程度下变量喷药与传统喷药的喷头流量数据，结果显示，1 级病虫害时，省药率高达 60.8%；随着病虫害等级升至 2 级与 3 级，省药率依次递减至 41.8% 与 32.1%。随着病虫害加剧，变量喷药系统需增加施药量，而 PWM 占空比调节技术的应用有效实现了流量的精准控制，显著降低了农药的总体消耗量。

表 5　喷雾系统喷雾数据表

Tab. 5　Spray data of spray system

喷头编号	等级 1 喷头流量/mL		等级 2 喷头流量/mL		等级 3 喷头流量/mL	
	变量	常量	变量	常量	变量	常量
R1	240	600	313	607	402	592
L1	251	577	324	612	408	607
R2	276	730	375	732	435	723
L2	312	759	388	763	451	758
R3	324	924	606	915	672	920
L3	372	946	654	936	716	941
平均喷施量	295.8	756	443.1	760.8	514	756.8
喷施总量	1 775	4 536	2 659	4 565	3 084	4 541
省药率/%	60.8		41.8		32.1	

4. 2. 4　地面药液流失评估

为精确量化农药在田间环境中的残留与分布，进而系统评估农药使用效果及其对环境（包括土壤、水体及整体生态）的潜在影响，本研究通过检测农药地面流失率作为关键指标。进一步利用雾滴沉积测试技术，对玉米植株地表的农药沉积状况进行深入分析，结果见表 6。

表 6　地面雾滴沉积量

Tab. 6　Ground droplet deposition

μL/cm²

喷头位置	等级 1 雾滴沉积量		等级 2 雾滴沉积量		等级 3 雾滴沉积量	
	变量	常量	变量	常量	变量	常量
LD	0.953	3.06	0.976	4.37	0.947	3.68
RD	0.931	3.19	0.956	4.41	0.963	4.01
平均值	0.942	3.125	0.966	4.39	0.955	3.845

对比分析不同病虫害程度下变量喷药与传统喷药的地面采样点沉积量数据，结果显示：在 1 级、2 级及 3 级病虫害条件下，变量喷药的沉积量分别为传统喷药的 30.1%、22.0% 及 34.8%，两者之间存在显著差异，表明变量喷药策略显著降低了农药的地面流失情况。此现象可归因于以下两方面原因：①变量喷药系统根据玉米植株冠层叶片密度的差异（上层与中层密集，下层稀疏）进行了优化调整，如选用较小孔径的喷头（如 L1，R1）进行精准施药。②PWM 占空比调节技术的应用有效实现了流量的精准控制，显著降低了农药的总体消耗量。通过对地面流失情况的细致分析，不仅验证了变量喷药技术在减少农药地面流失方面的有效性，同时也证明了喷头选型与分布策略的合理性与科学性。

综上，本文提出的改进 YOLO v5 模型在病虫害检测领域展现出了显著成效，通过优化网络结构和特征提取能力，有效提升了模型在田间复杂背景下的识别精度。然而，尽管如此，模型在处理微小目标和复杂背景干扰时仍存在一定的局限性。为进一步提升模型性能，未来可探索更先进的深度学习算法、加强数据增强与扩充、以及优化硬件加速策略。同时，将改进 YOLO v5 模型与变量喷药技术结合，实现了精准施药，显著降低了农药使用量和环境污染。但实际应用中，不同地区的气候、

土壤、作物种类等条件差异显著，这会影响病虫害的发生规律和特征表现。不同作物对病虫害的抵抗能力和生长特性不同，也会影响变量喷药系统的应用效果。因此，变量喷药系统在实际应用中需要根据当地作物的具体情况进行调整和优化，以确保其有效性和准确性。

4.2.5 系统实时性与延时性分析

为全面评估系统的实时响应与延时特性，设计了变量喷药静态试验。该试验将系统细分为4个关键时段：图像数据集获取、病虫害识别与等级判定、PWM信号即时生成至喷洒系统正常工作，以及最终喷洒至目标药量的完整过程。前3个时段采用高精度的时间戳计时法，依托Python的time()函数记录程序运行的关键节点，并通过时间戳转换工具精确计算各阶段耗时。第4阶段，鉴于其涉及物理喷洒的复杂性，采用人工计时，从PWM信号触发至量杯接收至目标喷药量95%的精确点。试验在同一病虫害场景下重复3次，确保结果的可靠性，最终数据见表7。

表7 系统反应时间时间戳记录

Tab. 7 System reaction time timestamp record

阶段	开始时间戳	结束时间戳	用时/ms
获取图像数据集	1726972380000	1726972380042	42
病虫害识别及等级判定	1726972380045	1726972380061	16
生成PWM信号至均匀喷洒	1726972380064	1726972380331	267
喷洒到目标喷药量	1726972380334	1726972380963	629
总时长	1726972380000	1726972380963	963

对系统的实时性和延时性进行深入分析可知，在获取图像数据集、病虫害识别及等级划分、生成PWM信号至均匀喷洒这3个阶段表现出了较高实时性能。这些阶段是系统内部处理过程，总延时为325 ms，特别是病虫害识别及等级判定阶段，仅用16 ms，显示出算法的高效性。其中生成PWM信号至均匀喷洒阶段用时较长的原因可能是电磁阀、气泵等硬件设备的启动具有一定延时性，它更多地反映了机械与流体动力学特性的固有局限，而非系统控制逻辑的直接结果。第4阶段时间不应完全视为系统的延时，因为其主要包括了机械动作和液体流动时间。尽管本系统物理喷洒环节的延时较长，达到629 ms，但这主要受限于机械和流体力学的物理特性，而非系统本身的控制能力。在未来改进中，可以考虑优化喷洒设备的硬件设计，以缩短该环节的延时。实际应用中环境因素（如光照、温度、相对湿度等）的变化也可能影响系统的性能和稳定性。因此，在未来研究中，系统应进行动态环境和多场景测试，增强系统的环境适应性和鲁棒性，以应对各种复杂场景。

5 结论

（1）玉米病虫害检测模型性能试验结果显示，对比多个模型发现，模型6（HardSwish + Swim Transformer V2 + Ghost + SIoU+非极大值抑制后处理）在综合性能方面优于其他模型。相较于基准模型YOLO v5s，改进后的模型P、R、mAP分别提升1.6、1.3、0.7个百分点，同时损失值降低0.004 7，F1值亦提升0.9个百分点，表明其性能全面优化。

（2）病虫害防治效果评估试验结果显示，就农药施用量而言，不同病虫害等级下雾滴覆盖率分别为：1级病虫害52%，2级病虫害60%，3级病虫害81%，均超过雾化机械雾滴覆盖率33%的基准要求。在农药施用均匀性方面，各病虫害等级的平均沉积密度分别为：1级病虫害71.3滴/cm^2，2级病虫害72.1滴/cm^2，3级病虫害76.3滴/cm^2，均满足雾化机械雾滴沉积密度大于30滴/cm^{2}的标准。

（3）省药量评估试验结果显示，1级病虫害时，省药率高达60.8%；随着病虫害等级升至2级与3级，省药率依次递减至41.8%与32.1%。随着病虫害加剧，变量喷药系统需增加施药量，而PWM占空比调节技术的应用有效实现了流量的精准控制，显著降低了农药总体消耗量。

（4）地面药液流失试验结果表明：相较于常量喷药，变量喷药在1级、2级及3级病虫害条件下的地面采集点雾滴沉积量分别减少69.9%、78.0%及65.2%。结果证明，变量喷药系统根据玉米植株冠层叶片密度的差异进行了喷头布置优化调整和通过精准调控农药施用量，有效降低了药液在土壤和水体中的残留，从而减轻了对生态系统的负面影响。

（5）系统实时性与延时性结果表明，本研究设计的玉米病虫害检测及变量施肥系统，内部延时仅为325 ms，其中病虫害识别与等级判定仅为16 ms，显示了系统的实时性。

参 考 文 献

[1] 刘英杰，邢瑞梅. 玉米大豆带状复合种植及病虫害防治技术[J]. 种子科技，2024，42（03）：113－115.

[2] 孙文峰，刘海洋，王润涛，等. 基于神经网络整定的PID控制变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51（12）：55－64，94.
SUN Wenfeng，LIU Haiyang，WANG Runtao，et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51（12）：55－64，94.（in Chinese）

[3] 王旭，杨欣，刘丽星，等. 果园仿形喷雾机的电控系统设计与试验[J]. 农机化研究，2022，53（18）：67－69.
WANG Xu，YANG Xin，LIU Lixing，et al. Design and experiment of electrical control system for orchard sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2022，53（18）：67－69.（in Chinese）

[4] 杨文超，何进，周靖凯，等. 基于机器视觉和北斗定位的小麦变量喷雾系统研究[J]. 农业机械学报，2022，53（7）：150－161.

YANG Wenchao, HE Jin, ZHOU Jingkai, et al. Design of wheat variable spray system based on machine vision and Beidou positioning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):150 - 161. (in Chinese)

[5] 刘路. 大田环境下智能移动喷药机器人系统研究[D]. 北京:中国科学技术大学, 2017.
LIU Lu. Research on intelligent mobile spray robotic system for field crops[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)

[6] 尹东富,陈树人,毛罕平,等. 基于模糊控制的棉田变量对靶喷药除草系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 179 - 183.
YIN Dongfu, CHEN Shuren, MAO Hanping, et al. Weed control system for variable target spraying based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 179 - 183. (in Chinese)

[7] 李龙龙, 陈立平, 张瑞瑞,等. 可控风洞环境PWM脉宽调制变量喷雾飘移特性分析[J]. 农业工程技术, 2023, 43(23): 159.
LI Longlong, CHEN Liping, ZHANG Ruirui, et al. Spray drift characteristics of pulse-width modulation sprays in wind tunnel. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2023, 43(23): 159. (in Chinese)

[8] FESSLER L, FULCHER A, SCHNEIDRER L, et al. Reducing the nursery pesticide footprint with laser-guided, variable-rate spray application technology[J]. Hort Science, 2021, 56(12): 1572 - 1584.

[9] NACKLEY L L, WARNEKE B, FESSLER L, et al. Variable-rate spray technology optimizes pesticide application by adjusting for seasonal shifts in deciduous perennial crops[J]. Hort technology, 2021, 31(4): 479 - 489.

[10] SALCEDO R, ZHU H, OZKAN E, et al. Reducing ground and airborne drift losses in young apple orchards with PWM-controlled spray systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 189: 106389.

[11] 中华人民共和国农业农村部,全国农药标准化技术委员会. GB/T 17980. 24-2000 农药田间药效试验准则(一)杀菌剂防治梨黑星病[S]. 北京:中国标准出版社,2000.

[12] 中华人民共和国农业农村部,全国农药标准化技术委员会. GB/T 17980. 61-2004 农药田间药效试验准则(二)第61部分:杀虫剂防治甘蔗螟虫[S]. 北京:中国标准出版社,2004.

[13] 中华人民共和国农业农村部,全国农药标准化技术委员会. GB/T 17980. 74-2004 农药田间药效试验准则(二)第74部分:杀虫剂防治棉花红蜘蛛[S]. 北京:中国标准出版社,2004.

[14] 王晓鸣.玉米抗病虫性鉴定与调查技术[J].作物杂志, 2005(6): 53 - 55.

[15] SUN F, XIE G, PENG Z, et al. Irrigation uniformity affected by spatial arrangement of sprinklers[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 66 - 72, 98.

[16] 邓巍,丁为民. 基于PWM技术的连续式变量喷雾装置设计与特性分析[J].农业机械学报, 2008,39(6): 77 - 80.
DENG Wei, DING Weimin. Variable-rate continuous spray equipment based on PWM technology and its spray characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6): 77 - 80. (in Chinese)

[17] 韩文霆,姚小敏,朱冰钦,等.变量喷洒喷头组合喷灌试验[J].农业机械学报,2013,44(7):121 - 126,112.
HAN Wenting, YAO Xiaomin, ZHU Bingqing, et al. Test and evaluation on variable-rate irrigation sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 121 - 126, 112. (in Chinese)

[18] 赵航,赵纯清,李善军,等. 山地柑橘园固定喷药装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44 (4): 91 - 95.
ZHAO Hang, ZHAO Chunqing, LI Shanjun,et al. Design and experiment of fixed spraying device in mountain citrus orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44 (4): 91 - 95. (in Chinese)

[19] 高飞,朱德兰,闫婧歆,等. 安装高度和工作压力对育苗喷头水力性能影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 119 - 125.
GAO Fei, ZHU Delan, YAN Jingxin, et al. Impact of mounting height and working water pressure on the performance of micro-sprinkler irrigation system for seedling beds[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 119 - 125. (in Chinese)

[20] 郭一鸣,张瑞瑞,陈立平,等. PWM变量控制喷头雾化特性研究 [J]. 农机化研究, 2019, 41 (12): 145 - 150.
GUO Yiming, ZHANG Ruirui, CHEN Liping, et al. Research on the atomization characteristics of the nozzle controlled by PWM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41 (12): 145 - 150. (in Chinese)

[21] 中国机械工业联合会,全国农业机械标准化技术委员会. GB/T 17997—2008, 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[22] STOREY G, MENG Q, LI B. Leaf disease segmentation and detection in apple orchards for precise smart spraying in sustainable agriculture[J]. Sustainability, 2022, 14(3) :1458.

[23] OSTERMAN A, GODESA T, HOCEVAR M, et al. Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer[J]. Computers and electronics in agriculture, 2013, 98: 175 - 182.

[24] PATEL M K, SAHOO H K, NAYAK M K, et al. Plausibility of variable coverage high range spraying: Experimental studies of an externally air-assisted electrostatic nozzle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 641 - 651.

[25] FULCHER A, LOCKWOOD D W, FESSLER L, et al. Reduced pesticide volume and off-target loss across a range of apple phenological stages with variable-rate spray technology[J]. Hort Science, 2020, 55(9): S373.

[26] HUSSAIN N, FAROOQUE A A, SCHUMANN A W, et al. Design and development of a smart variable rate sprayer using deep learning [J]. Remote Sensing, 2020, 12(24):4091.

[27] 中华人民共和国农业农村部. 风送式果园喷雾机作业质量: NYT 992-2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.