

直播稻播前不同土壤火焰温度条件下杂草种子发芽率试验

周志艳^{1,2} 李鑫^{1,3} 黄俊浩^{1,3} 杨得帅^{1,4} 林键沁^{1,3} 姜锐^{1,5}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广州 510642;

3. 广东省农业人工智能重点实验室, 广州 510642; 4. 广东省农业航空应用工程技术研究中心, 广州 510642;

5. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 杂草的有效控制是降低直播稻稳产风险的重要措施,播前土壤火焰处理是以非化学方法在进行播种前抑制杂草种子萌发的有效手段。为明确土壤火焰处理中温度场对杂草种子发芽率的影响规律,采用数值模拟方法对燃料分流部件中集管结构参数进行了研究,数值模拟和验证试验结果表明,当集管内径 d 为 20 mm、气体输入流量为 $1.0 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,最大流量偏差系数 $\Delta\eta$ 在 3.0% 以内,支管间气体流量分配较均匀。基于数值模拟结果设计了火焰燃烧装置,研究 6 种输入流量 ($1.0 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$) 的液化石油气燃料对火焰高度和火焰温度分布的影响,以拖拉机行进速度、燃料输入流量和土壤深度作为试验因素,进行了全因素试验,采用稻田间常见的杂草种子研究温度场对杂草种子发芽率的影响规律。试验结果表明,在常温常压工作环境下,火焰高度和火焰温度最高值均随着燃料输入流量的增大而增大;当拖拉机行进速度为 2.36 km/h ,燃料输入流量为 $2.5, 3.0, 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,土壤温度最高值可分别达到 $92.83, 116.58, 156.83^\circ\text{C}$;相比未经火焰处理的对照组,当土壤温度达到 92.83°C 时,在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下,千金子、异型莎草种子发芽率显著降低,但马唐、鳢肠种子发芽率受影响不显著,当土壤温度达到 116.58°C 和 156.83°C 时,4 种杂草种子发芽率均显著降低;当土壤温度达到 156.83°C 时,马唐、鳢肠、千金子和异型莎草 4 种杂草种子发芽率分别降低 94.82%、87.81%、86.54% 和 84.05%。田间试验结果表明,土壤火焰处理对稗草、马唐、鳢肠和异型莎草有显著的抑制萌发作用,其相对除草率 $Y \geq 80.00\%$ 。

关键词: 直播稻; 土壤消杀; 燃烧特性; 温度场; 种子发芽率

中图分类号: S224.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0134-11

OSID:



Experiment on Weed Seed Germination Rate in Soil under Different Flame Temperature Conditions before Sowing of Direct-seeded Rice

ZHOU Zhiyan^{1,2} LI Xin^{1,3} HUANG Junhao^{1,3} YANG Deshuai^{1,4} LIN Jianqin^{1,3} JIANG Rui^{1,5}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510642, China

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence, Guangzhou 510642, China

4. Guangdong Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application, Guangzhou 510642, China

5. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Effective weed control is an important measure to reduce the risk of stable yields in direct seeded rice, and pre-sowing soil flame treatment is an effective means of suppressing weed seed germination prior to sowing by non-chemical methods. In order to clarify the law of the influence of the temperature field on the germination rate of weed seeds in soil flame treatment, the structural parameters of the header pipe in the fuel diversion component were investigated by using numerical simulation. The results of the numerical simulation and validation test showed that when the inner diameter of the header pipe d was 20 mm and the gas input flow rates were $1.0 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$, the maximum flow deviation rates $\Delta\eta$ were within 3.0%, more uniform gas flow distribution between outlet branches. Based on the numerical simulation results, a flame combustion device was designed to study the effects of six types of LPG fuels with input flow rates ($1.0 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$) on the flame height and the flame temperature

收稿日期: 2023-09-18 修回日期: 2023-10-30

基金项目: 岭南现代农业实验室科研项目 (NT2021009)、广州市重点研发计划项目 (202206010149)、广东省科技计划项目 (2021B1212040009) 和江西省井冈山农高区省级科技专项 (2022-051252-02)

作者简介: 周志艳 (1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事农业航空应用技术研究, E-mail: zyzhou@scau.edu.cn

distribution, and a full-factorial test was carried out by using the tractor traveling speed, fuel input flow rate, and soil depth as test factors, and the effect of temperature field on the germination pattern of weed seeds was studied using common weed seeds among rice fields. The test results showed that the flame height and the maximum value of flame temperature were both increased with the increase of fuel input flow rates under normal temperature and pressure operating environment; when the tractor traveled at a speed of 2.36 km/h and the fuel input flow rates were 2.5 m³/h, 3.0 m³/h and 3.5 m³/h, the soil temperature could reach 92.83℃, 116.58℃ and 156.83℃, respectively; compared with the un-flamed treatment control group, when the soil temperature reached 92.83℃, the germination rate of seeds of *Leptochloa chinensis* (L.) Nees and *Cyperus difformis* were significantly reduced at the significance level of $\alpha = 0.05$, but the germination rate of seeds of *Digitaria sanguinalis* and *Eclipta prostrata* were not significantly affected, and the germination rate of seeds of the four weeds were significantly reduced when the soil temperature reached 116.58℃ and 156.83℃. When the soil temperature reached 156.83℃, the germination of seeds of four weed species *Digitaria sanguinalis*, *Eclipta prostrata*, *Leptochloa chinensis* (L.) Nees and *Cyperus difformis* were decreased by 94.82%, 87.81%, 86.54% and 84.05%, respectively. The results of the field test showed that the soil flame treatments had significant germination inhibiting effects on *Echinochloa crusgalli*, *Digitaria sanguinalis*, *Eclipta prostrata*, and *Cyperus difformis*, and their relative weed control rates Y was greater than or equal to 80.00%.

Key words: direct-seeded rice; soil abatement; combustion characteristics; temperature field; seed germination rate

0 引言

水稻直播技术作为一种轻简、高效、可持续发展的栽培技术,能够有效缓解我国农村劳动力短缺问题^[1-3]。水稻田间杂草种类繁多,生长迅速,危害严重^[4]。尤其在直播稻田中存在水稻与杂草同步生长的现象,而水稻的养分竞争能力弱于杂草,促使杂草大量生长,杂草问题已成为阻碍水稻直播技术推广的重要因素^[5-6]。杂草的有效控制是降低直播稻稳产风险的重要措施,在播种前抑制杂草种子的萌发是控制草害的有效手段^[7]。随着化肥农药减量增效工作的持续推进,使用非化学方法对稻田杂草种子进行处理的需求越来越迫切^[8]。

欧美国家使用火焰处理方法对土壤中的病原孢子、虫卵和田间杂草等进行处理,燃烧装置采用拖拉机牵引,常用燃料为丙烷或液化石油气^[9-11],燃烧方式主要采用燃烧强度大、热释放率高的扩散射流火焰^[12],并通过设置燃烧器限制火焰的燃烧范围和射流方向,以形成下喷火焰对土壤进行火焰处理,达到以非化学方法对土壤进行消杀处理的目的^[13]。

近年来,已有学者对土壤火焰处理方法进行了系列研究。RAJKOVIC 等^[14]通过测量燃烧器在不同燃料输入剂量和分布位置下所产生的火焰温度,在综合考虑火焰温度及其作用范围后,确定火焰消杀装置中燃烧器的最佳布置为平行布置;MORSELLI 等^[15]研制了一种以生物质为燃料的火焰消杀装置,其相比产生同等热值的液化石油气燃料,减少 72% 的燃料成本和 118% 的二氧化碳排放量,但该装置结构复杂,造价高昂,预加热时间长,整

体工作效率较低;GUO 等^[16]通过田间试验,对比了两种自制的火焰消杀装置对田间的害虫和杂草的作用效果;MAO 等^[17]使用火焰消杀装置开展了土壤处理试验研究,该装置在行进过程中先将土壤压碎并带到燃烧室内,在 2~3 s 内将土壤温度加热至 50~70℃,但是受工作效率的影响,该装置进行土壤处理的成本较高。

综上所述,目前田间土壤火焰处理相关的研究主要集中于装置设计和田间试验,而火焰温度场及其对杂草种子发芽率的影响规律不明确。为明确土壤火焰处理中温度场对杂草种子发芽率的影响规律,本文采用数值模拟方法分析燃料分流部件中集管内径对各支管间燃料流体分配均匀性的影响规律,然后再基于数值模拟结果设计相应的火焰燃烧装置,通过测量火焰高度分布、火焰温度分布和土壤温度变化情况,探讨该装置进行土壤火焰处理中温度场对杂草种子发芽率的影响规律,最后进行田间试验验证土壤火焰处理的作业效果,以期用最低燃烧成本取得较好的早直播稻田杂草种子萌发抑制效果。

1 燃料分流部件数值模拟与验证试验

1.1 燃料分流部件设计

燃料分流部件结构示意图如图 1 所示,本文研究的燃料分流部件采用并联管组设计,其原理是将 从集管输入的燃料分配至与集管相连的多个支管,以满足作业行宽的要求。燃料入口处的集管以径向方式安装,设置 4 个支管,支管沿燃料入口处的集管等距对称分布。

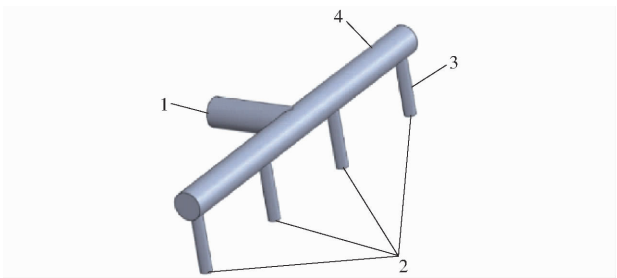


图 1 燃料分流部件结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of fuel diverter component

1. 燃料入口 2. 燃料出口 3. 支管 4. 集管

各支管间燃料流量分配均匀性是影响火焰热效率的关键。根据 TONG 等^[18]的研究,并联管组中集管与支管的内径比直接影响各支管间燃料流量分配的均匀性。本文采用控制变量法,通过数值模拟方法对不同参数的集管内径进行研究,选取集管内径 d 为 5、10、15、20、25、30 mm,燃料分流部件其他结构参数如表 1 所示。

表 1 燃料分流部件结构参数

Tab. 1 Structural dimensions of fuel diverter

components		mm
参数	数值	
入口集管长度	100	
集管总幅宽	370	
支管内径	2	
支管长度	50	
支管间距	120	

1.2 几何模型和边界条件

使用 Solidworks 创建燃料分流部件三维模型。在 ANSYS 2022 R2 Workbench 中选择 Fluid Flow (Fluent) 分析系统。整体网格尺寸设置为 0.5 mm,对支管出口处进行局部加密,其网格尺寸为 0.05 mm,采用三角形网格。在流体域中创建的网格节点为 $1.5 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^6$ 个。

在 Fluent 模块中,将气态液化石油气(主要成分为 C_3H_8 和 C_4H_{10}) 设置为传输介质,将入口边界设为速度入口 (Velocity inlet),出口边界设为压力出口 (Pressure outlet),其余边界选择为壁面 (Wall)。流体输入流量设为 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$,出口边界条件设为 1 个标准大气压,采用空气作为流体介质,湍流模型选取 $k-\varepsilon$ 湍流模型,近壁面的流动模拟采用标准壁面函数。求解采用 SIMPLEC 算法和二阶迎风格式计算,设置收敛精度为 10^{-4} ^[19]。

燃料分流部件的出口流量分配均匀性评价指标用每根支管的流量分布不均匀系数 η_i 和最大流量偏差系数 $\Delta\eta$ 来表示^[20],计算公式为

$$\eta_i = \frac{nQ_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \tag{1}$$

$$\Delta\eta = \eta_{\max} - \eta_{\min} \tag{2}$$

式中 Q_i ——第 i 根支管的体积流量, m^3/h
 n ——支管数目
 $\eta_{\max}$ ——并联管组中支管的最大流量分布不均匀系数
 $\eta_{\min}$ ——并联管组中支管的最小流量分布不均匀系数

1.3 数值模拟

通过数值模拟仿真得到不同集管内径下各支管入口处速度云图,如图 2 所示。

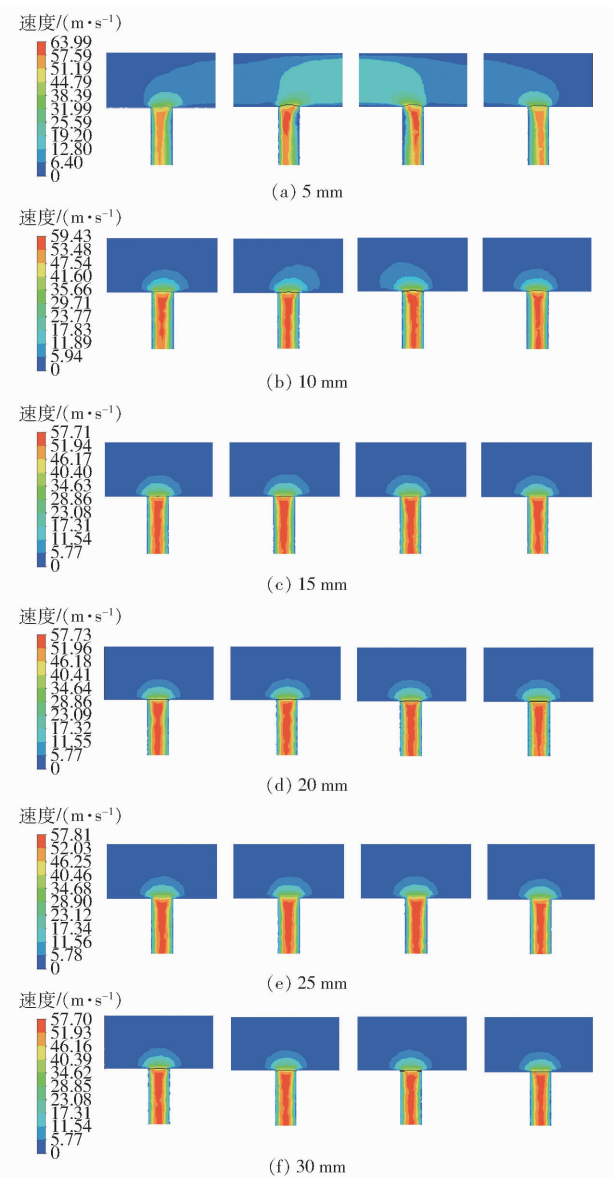


图 2 不同集管内径下各支管入口处速度云图

Fig. 2 Velocity magnitude contour at inlet of each branch with different inner diameters of header pipe's pipes

从图 2 可以看出,流体速度沿集管轴线呈两侧对称分布;当集管内径为 5 ~ 15 mm 时,集管中流

体速度分布趋于平缓,流体速度最大值减小,原因在于集管内流体速度减小,流体通过集管内的沿程阻力减小,由支管分流和汇流引起的集管内静压分布变化的作用减小,支管两端压差减小,各支管间流体速度分配均匀性提高。此外,当集管内径为 20 ~ 30 mm 时,各支管间流体速度分布较均衡,流体速度最大值趋于稳定,各支管间流体速度分配均匀性较好。

最大流量偏差系数 $\Delta\eta$ 随着集管内径 d 的数值变化规律,如图 3 所示。由图 3 可知,随着集管内径 d 增大,最大流量偏差系数 $\Delta\eta$ 减小,各支管间流量分配均匀性越好,该趋势与杨程等^[20]观察到的结果较为一致。当集管内径为 5 mm 和 10 mm 时,最大流量偏差系数 $\Delta\eta$ 分别为 5.31% 和 3.26%;当集管内径为 15 ~ 30 mm 时,最大流量偏差系数 $\Delta\eta$ 均在 3.0% 以内,此时燃料分流部件流量分配的均匀性较好。考虑到燃料分流部件的整体尺寸、质量和成本,采用集管外径 25 mm、内径 20 mm 为实际尺寸。为防止支管在田间作业过程中弯曲折断,选取支管外径为 10 mm。

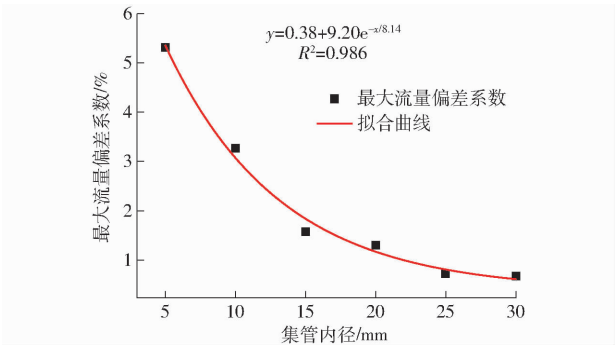


图 3 集管内径与最大流量偏差系数的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between maximum flow deviation rate and header pipe's diameters

1.4 验证试验

在前文设计的基础上,加工了一种燃料分流部件。为验证数值模拟结果的准确性,进行气体流量分配均匀性验证试验,将数值模拟结果与验证试验结果对比。由于气态的液化石油气具有易燃易爆的特点,在使用中有安全隐患,因此本文采用空气作为验证试验的介质,并在数值模拟中对比相同工况下气态液化石油气和空气之间最大流量偏差系数的差值。验证试验所选取的气体输入流量范围为 1.0 ~ 3.5 m³/h,试验在常温常压下的室内环境中进行。图 4 为现场试验图,采用空气压缩机(Outstanding 公司生产,型号为 800W-30L,输出的空气流量范围为 0 ~ 60 L/min)为燃料分流部件提供试验所需的气体,通过调节流量计(南京顺来达测控设备有限公司生产的 SLD-LBZ 型玻璃转子流量计,精度为

2.5 级)上的流量阀门以达到试验所需的气体流量,读取进出口各流量计的量程,计算最大流量偏差系数。

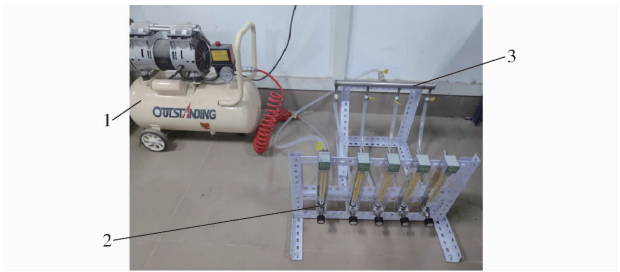


图 4 气体流量分配均匀性验证试验

Fig. 4 Gas flow distribution uniformity verification test

1. 空气压缩机 2. 流量计 3. 燃料分流部件

模拟结果与验证试验结果对比如图 5 所示, F_{af} 、 F_l 和 F_{as} 分别表示介质为空气的数值模拟结果、介质为液化石油气的仿真结果和介质为空气的试验结果。从图 5 可以看出,当集管内径为 20 mm,气体输入流量为 1.0 ~ 3.5 m³/h 时,以空气和液化石油气为介质的数值模拟结果和以空气为介质的试验结果得出的最大流量偏差系数均在 3.0% 以内,此时燃料分流部件流量分配均匀性较好。模拟结果与试验结果之间有一定误差,这主要是因为数值模拟的过程中忽略了管道、密封等机械损失和容积损失等。

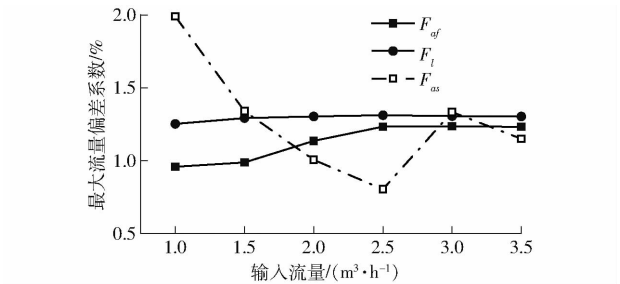


图 5 数值模拟结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of numerical simulation results with experimental results

2 火焰温度场变化特性试验

2.1 单因素火焰燃烧试验

2.1.1 试验材料与测量仪器

试验设计了一种火焰燃烧装置,主要包括火焰燃烧部件和远程控制系统。火焰燃烧部件主要由燃料分流部件、燃烧器和导热板组成,其结构如图 6 所示。为限制火焰流动方向以保证火焰的热效率,将导热板尺寸 $L_1 \times L_2$ 设置为 500 mm × 300 mm,并将导热板固接在支管上,将 L_3 设置为 200 mm。此外,在导热板设置穿线孔便于控制线远程控制。

目前田间火焰处理方法通常采用燃烧器约束火焰的宽度和射流方向,燃烧器的形状主要有圆柱形、

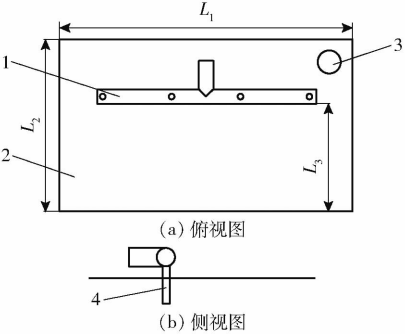


图 6 火焰燃烧部件结构示意图

Fig. 6 Structure diagrams of flame burning component

1. 集管 2. 导热板 3. 穿孔孔 4. 出口支管

扇形和方形等。本文以一种能够产生均匀火焰的圆柱形燃烧器为试验对象,该燃烧器外径为 60 mm,壁厚为 1 mm,高度为 100 mm,其剖面图如图 7a 所示。燃烧器设置有气孔,沿圆周中心阵列分布,共 8 个,直径为 6 mm,如图 7b 所示。燃烧器编号如图 7c 所示,正面视角与燃料入口方向相反,设置从左到右依此为 1 号~4 号。火焰燃烧部件各部分材质均采用 304 号不锈钢。

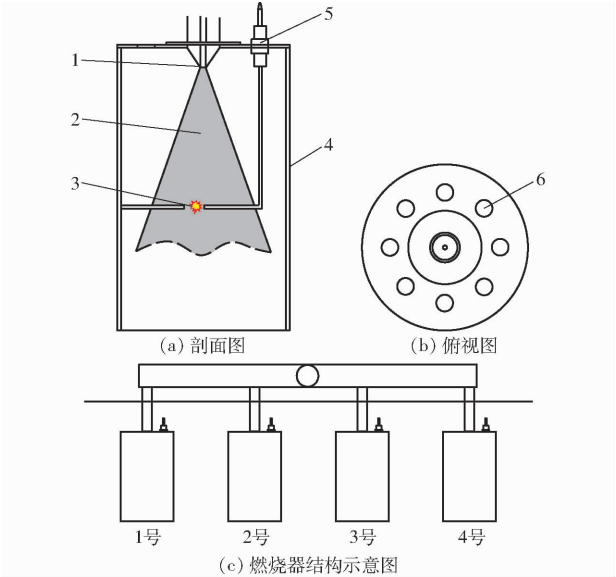


图 7 燃烧器结构示意图

Fig. 7 Structure diagrams of burner

1. 支管 2. 气体燃料 3. 电火花 4. 燃烧器外壳 5. 点火针
6. 气孔

远程控制系统通过按钮控制电动气阀和脉冲点火器的开关。将电动气阀设置于液化石油气罐出口处,用于控制燃料的流出。脉冲点火器具有正、负两端,一端连接机架,将燃烧器本身成为负极,另一端连接陶瓷点火针使其成为阳极,使陶瓷点火针在燃烧器内部形成电火花,点燃燃料。远程控制系统由 12 V 电池供电。

燃料输入流量的计量采用南京顺来达测控设备有限公司生产的 SLD-MFC 型质量流量计,量程为

0.15~6.0 m³/h,精度 1.0 级。红外热成像仪采用美国 FLIR 公司生产的 T1050sc 型非制冷式红外探测器,测量温度范围 -40~2 000℃,精度 ±2℃,分辨率 1 024 像素×768 像素。视频录制设定辐射率为 0.96,反射温度为 25℃,速率为 30 f/s,用于拍摄记录火焰中轴线温度分布。采用小蚁运动相机拍摄记录火焰高度,视频录制分辨率为 1 920 像素×1 080 像素,速率为 25 f/s。

2.1.2 试验设计

试验以液化石油气为燃料,设置其流量为 1.0~3.5 m³/h,共 6 个水平。液化石油气特性和试验操作条件如表 2 所示。

表 2 液化石油气特性以及试验操作条件
Tab. 2 Characteristics of liquefied petroleum gas and test operating conditions

参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	2.35
运动粘度/(Pa·s)	7.59×10 ⁻⁶
热值/(MJ·m ⁻³)	92.1~121.4
环境温度/K	293
环境压力/MPa	0.1
燃料输入流量/(m ³ ·h ⁻¹)	1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5

试验开始前,将火焰燃烧装置固定在距地面高度 1 m 处,设置火焰射流方向竖直指向地面,红外热成像仪和高清数码摄像机通过三脚架水平固定在火焰燃烧装置正面位置,使拍摄范围始终保持一致。在高清数码摄像机拍摄可见光图像时,使用标尺定标,记录标尺所对应的像素数并计算出每个像素对应的长度。为便于在图像处理时能准确将火焰与背景进行阈值分割,使用黑色背景布突出火焰的形态特征。为避免风速、光照等环境因素对试验的影响,将试验设置在室内进行,如图 8 所示。视频录制在质量流量计示数稳定后进行,每组试验采用时间不少于 40 s。每组试验结束后,待测量仪器及火焰燃烧部件充分冷却至室温(20℃)后,再继续试验。

2.1.3 图像处理方法

利用图像二值化技术批量处理可见光火焰图像,其原理为:将图像转换为二维矩阵像素点,采用 OTSU 算法(最大类间方差法)对图像阈值进行动态选择。将图像的像素分为火焰部分(像素点数为 255)和非火焰部分(像素点数为 0),确定竖直方向上像素点数为 255 的边界点,最后根据像素点数量计算火焰高度 $H^{[21]}$ 。

火焰高度 H 被定义为边界点在竖直方向上所间隔的最大的像素点数量,根据提前准备好的像素点和实际尺寸进行换算。可见光火焰图像处理过程

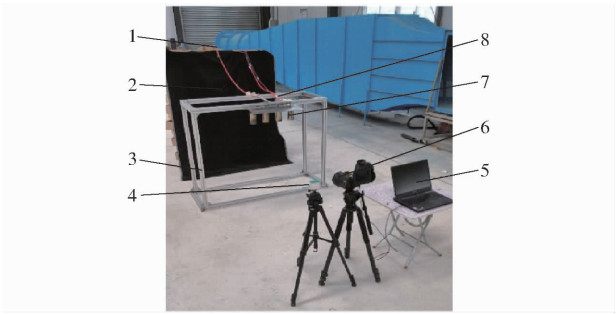


图 8 台架试验布置图

Fig. 8 Bench test

1. 燃料输送管 2. 黑色背景布 3. 铝型材台架 4. 高清数码摄像机 5. 计算机 6. 红外热成像仪 7. 火焰燃烧部件 8. 高压脉冲点火控制线

如图 9 所示,使用视频处理软件 Premiere 5.5 对原始视频进行处理,在每组试验随机选取连续的 5 s,即 125 幅火焰图像进行处理^[22]。红外热成像仪拍摄记录下热红外图像后,采用 FLIR Research Studio 工具软件从热红外图像中提取各燃烧器火焰射流方向上中轴线的平均温度 T ,并在转换成 csv 格式后进行数据处理^[23]。每个燃料输入流量选取连续的 30 幅火焰图像作为样本,确定火焰温度分布。

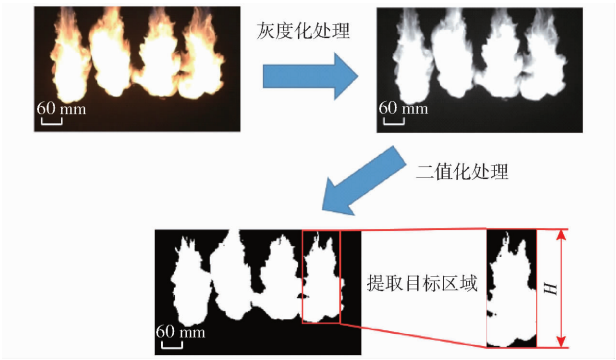


图 9 可见光火焰图像处理过程

Fig. 9 Visible flame image processing

2.2 不同深度土壤温度变化规律试验

2022 年 11 月在华南农业大学岑村校内农场进行土壤温度变化规律试验研究。试验地土壤类型为黏土,土壤平均含水率为 16.52%,选择平整的地块作为试验区。为了保证火焰的稳定性和减少外界因素对装置作业效果的影响,试验在自然风风速 2 级以下、天气晴朗的情况下进行。试验现场如图 10a 所示,试验时将火焰燃烧装置挂载到雷沃 M540 型拖拉机上,采用 K 型热电偶(东莞市立林电热制品有限公司,测量范围 0 ~ 600℃,精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)测量土壤温度,采用 MAX6675 温度检测模块(美国 MAXIM 公司,精度为 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$)读取温度数值。为了更准确地分析土壤温度变化,将热电偶热端竖直朝向火焰燃烧区域,将冷端埋入土壤深处。通过调节热电偶热端与土壤表面之间的高度 L_h 来

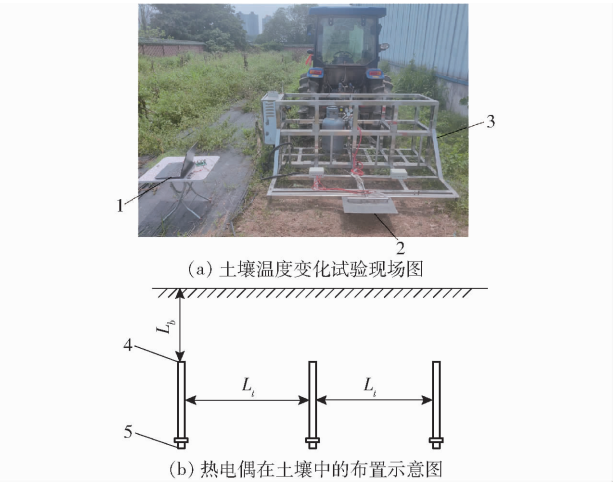


图 10 土壤温度变化试验图

Fig. 10 Experimental plots of soil temperature change

1. 信息采集系统 2. 土壤火焰处理区域 3. 燃料供应系统及远程控制系统 4. 热电偶热端 5. 热电偶冷端

模拟土壤深度的变化,热电偶放置示意图如图 10b 所示。吴竞仑等^[24]的研究表明,土壤深度 0 ~ 1.0 cm 是稗草、异型莎草、千金子和鳢肠 4 种杂草种子的主要出苗深度,因此本试验将设置在土壤深度 0 ~ 1.0 cm 下进行。试验设计如下:

(1)为确定土壤温度变化规律试验中各参数组合所能达到的最高土壤温度,以土壤温度为试验指标,以拖拉机行进速度 (2.75、2.36 km/h)、燃料输入流量 (2.5、3.0、3.5 m³/h) 和土壤深度 (0、0.5、1.0 cm) 为自变量进行全因素试验,各因素和水平见表 3。

表 3 不同深度土壤温度变化试验参数

Tab.3 Experimental parameters of soil temperature variation at different depths

处理组 编号	拖拉机行进速度/ (km·h ⁻¹)	燃料输入流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	土壤深度/ cm
1	2.36	3.5	0
2	2.36	3.0	0
3	2.36	2.5	0
4	2.36	3.5	0.5
5	2.36	3.0	0.5
6	2.36	2.5	0.5
7	2.36	3.5	1.0
8	2.36	3.0	1.0
9	2.36	2.5	1.0
10	2.75	3.5	0
11	2.75	3.0	0
12	2.75	2.5	0
13	2.75	3.5	0.5
14	2.75	3.0	0.5
15	2.75	2.5	0.5
16	2.75	3.5	1.0
17	2.75	3.0	1.0
18	2.75	2.5	1.0

(2)试验共设置有 18 个试验区,每个试验区的尺寸为 0.5 m × 0.5 m,设置燃烧器出口距地高度 200 mm,设置热电偶间距 L_t 为 200 mm。试验时设置

温度检测模块每 0.2 s 采集一次温度数据,并将温度数据存储到计算机中。

2.3 结果与分析

2.3.1 火焰高度

不同燃料输入流量下火焰高度变化示意图如图 11 所示,火焰高度随燃料输入流量的增大而增大,并且火焰的上下往复振荡加剧,火焰高度的波动范围扩大。燃料输入流量从 1.0 m³/h 增至 3.5 m³/h 时,火焰高度的增幅超过 230%。在燃料输入流量为 1.0 ~ 2.5 m³/h 时,火焰高度的最大差值小于 5%,1 号~4 号燃烧器对应的火焰高度差别较小,此时各燃烧器间火焰高度分布较均匀。当燃料输入流量为 3.0 m³/h 时,1 号至 4 号燃烧器对应的火焰高度依次为 317.99、361.43、379.18、333.68 mm;当燃料输入流量为 3.5 m³/h 时,1 号~4 号燃烧器对应的火焰高度依次为 409.30、436.44、418.17、384.19 mm。这表明当燃料输入流量被设置为 3.0 ~ 3.5 m³/h 时,火焰高度继续增大,且火焰高度出现“中间高两边低”的现象。

对于多个扩散射流火焰的相互作用而言,输入流量增大,在相同时间内燃料喷射的距离增大,火焰高度相应增大,这与 LIU 等^[25]的研究结果较为一致。而当多个火源靠近时,相互竞争有限的氧气,导致中间燃烧器(2 号和 3 号)的燃料需要扩散至距燃烧器出口更远的位置才可与氧气接触并发生燃烧,因此中间燃烧器(2 号和 3 号)的火焰高度比两边燃烧器(1 号和 4 号)的火焰高度更大。

2.3.2 火焰温度

不同燃料输入流量下火焰温度分布如图 12 所

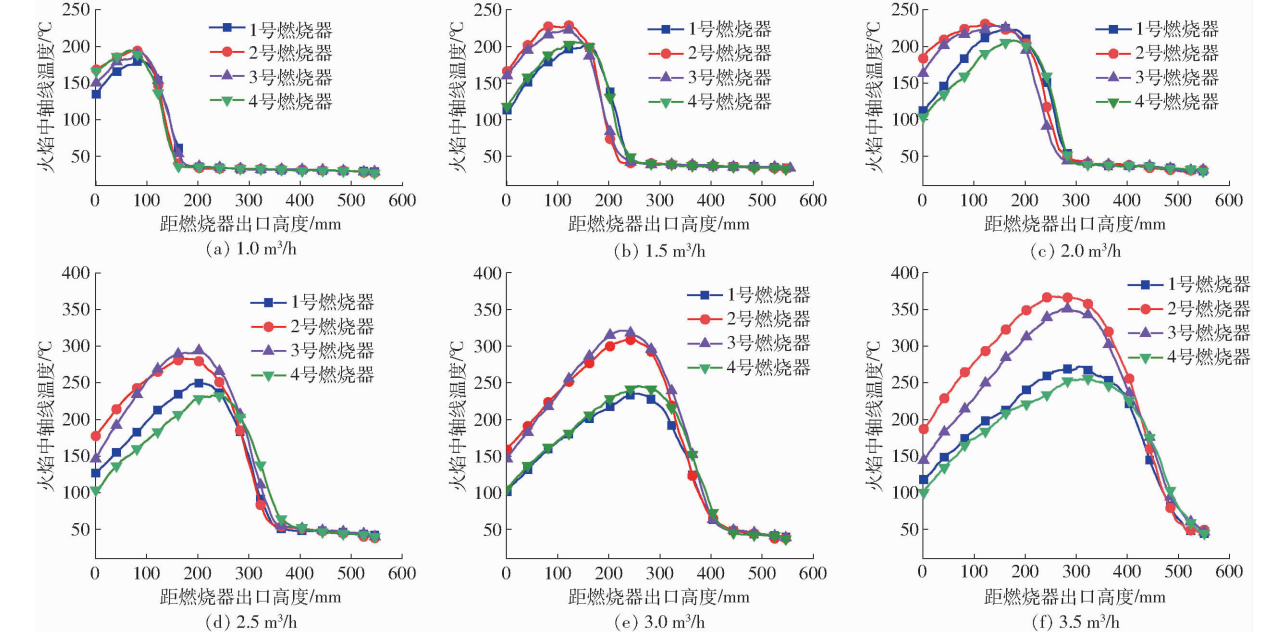


图 12 不同燃料输入流量下火焰温度分布

Fig. 12 Flame temperature distributions at different fuel input flow rates

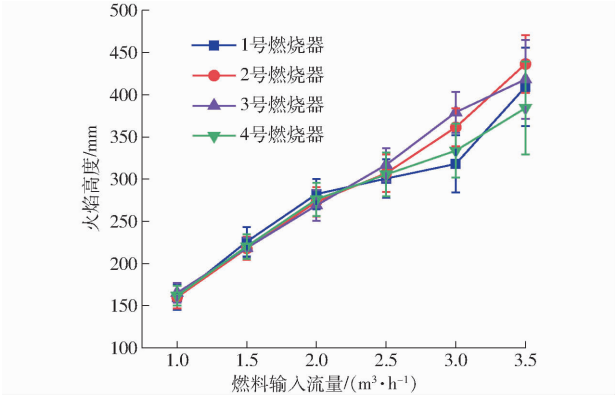


图 11 不同燃料输入流量下火焰高度变化

Fig. 11 Flame height with different fuel input flow rates

示。由图 12 可知,火焰温度分布的曲线呈现单驼峰形状,在燃烧器出口处,温度较低,随着与燃烧器出口距离的增大,温度先增大后快速减小。这是因为处于湍流状态下的燃料在发生放热反应前发生裂解,因而主要的放热反应并不在燃烧器出口处进行,而是在距离出口一定高度处进行。然后,火焰对外界进行热辐射并不断卷吸周围冷空气,致使火焰温度逐渐减小。

随着燃料输入流量的增大,对应的火焰温度最大值逐渐增大,温度最高点逐渐远离燃烧器出口;火焰温度最高点位于燃烧器出口位置 1/2 ~ 2/3 火焰高度之间,整体处于火焰高度中线偏下的位置。在田间火焰处理过程中,燃烧器与土壤表面的距离一般不低于 200 mm,若燃烧器出口距地高度过小则可能导致碰撞和损坏^[26]。为保证火焰温度最高点能够贴合土壤表面,提高加热效率,因此要求燃烧器出口处距火焰温度最高点处的高度 H_1 和燃烧器出口

处距地高度 H_f 之间的关系为 $H_i \geq H_f \geq 200\text{ mm}$ ，并以此为限制条件，可选取燃料输入流量为 2.5、3.0、3.5 m^3/h 共 3 个水平。在 3 个水平下，各燃烧器对应的火焰温度分布主要为中间高两边低，即火焰温度最高点出现在中间两个燃烧器的火焰中。3 个水平下，中间燃烧器的火焰温度最高值 T_m 分别为 293.33、319.38、366.44 $^{\circ}\text{C}$ ，两边燃烧器火焰温度最高值 T_n 分别为 249.63、245.73、271.33 $^{\circ}\text{C}$ ，相同条件下 T_m 与 T_n 之间的差值呈逐渐增大的趋势。这是由于在燃料输入流量增大的过程中，中间燃烧器对应的火焰燃烧更加剧烈，卷吸了更多空气，使得中间火焰的火力更集中，温度更高。综上所述，在燃烧器出口距地高度为 200 mm 时，燃料输入流量选择 2.5 ~ 3.5 m^3/h 较合适。

2.3.3 土壤温度

不同试验参数下土壤温度随时间变化规律如图 13 所示，其中括号内为试验因素水平。随着时间的推移，土壤温度变化表现为先快速增大、后缓慢减小的趋势，这是由于火焰释放的大量热量在经过土壤表面时，可使土壤温度在短时间内快速增大，火焰远离后，土壤不断与周围环境进行热交换，土壤温度缓慢减小。在相同燃料输入流量下，土壤温度最高值随着土壤深度的增大而减小，这是由于随着土壤深度增大，更多的土壤能够吸收热量，削弱了火焰对一定深度内土壤的影响。在相同土壤深度下，拖拉机行进速度 2.36 km/h 对应的温度最高值比行进速度 2.75 km/h 时大，可以看出，土壤深度和拖拉机行进速度一定时，土壤温度随着燃料输入流量的增大

而增大，这是由于火焰温度随着燃料输入流量增大而增大，导致处理后的土壤在单位时间内所受的热量增大，其温度也相应增大。

根据现有研究，绝大多数杂草种子的致死温度在 80 $^{\circ}\text{C}$ 以上^[27-28]，结合土壤温度变化规律试验研究结果可以看出，处理 1、10、11、12 的土壤温度最高值可分别达到 91.67、92.83、116.58、156.83 $^{\circ}\text{C}$ ，土壤温度最高值均高于 80 $^{\circ}\text{C}$ ，此时土壤深度均为 0 cm，能够满足土壤火焰处理的温度要求。而当土壤深度在 0.5 cm 以下时，土壤温度最高值均低于 80 $^{\circ}\text{C}$ ，不能满足土壤火焰处理的温度要求，这可能是由于土壤的导热系数较大，有限的火焰热量不能对土壤表面以下的土壤进行有效的加热处理，而土壤表面处能够直接接触火焰，因此能对其进行较为有效的加热处理。由于处理 1 和处理 10 的土壤温度最高值仅相差 1.16 $^{\circ}\text{C}$ ，数值较为接近，为方便后续试验，选择处理 10、11、12 作为后续的试验参数。

3 温度场对杂草种子发芽率影响试验

3.1 试验方法

选择稻田中常见的杂草：马唐、鳢肠、千金子和异型莎草作为研究对象。2022 年 8 月在华南农业大学增城试验教学基地的稻田收集群落中常见杂草种子，每个品种的种子均来自不少于 30 株大小相近的个体。将收集的种子风干并分拣以去除小枝、叶或花序，每个品种选取 1 000 粒籽粒均匀、饱满的种子。将采集好的杂草种子存放在 -5 $^{\circ}\text{C}$ 低温环境中保存 4 个月后进行试验。试验设计如下：

(1) 对杂草种子品种和燃料输入流量进行全因素试验，杂草种子包括马唐、鳢肠、千金子和异型莎草，共 4 个品种；根据前文优选的试验参数，设置为未经火焰处理以及处理 10、11、12 共 4 个水平。

(2) 设置燃烧器出口距土壤表面高度为 200 mm。每组试验均在尺寸为 0.5 m × 0.5 m 的土壤表面均匀撒 250 粒对应的杂草种子，在火焰处理后回收杂草种子，使用蒸馏水洗净，放置在自然环境中风干。

(3) 每组试验随机选取 50 粒风干后的种子，放入玻璃培养皿并使用培养箱培养（QHX-250 型，常州金坛良友仪器有限公司），重复 4 次。试验时将培养箱的温度设置为 30 $^{\circ}\text{C}$ ，并将光照模式设置为“12 h 有光和 12 h 无光交替”模式。

3.2 评价指标

以杂草种子发芽后 14 d 内的发芽特性为试验指标，以种子露出幼苗为标志，每天检查种子的出苗情况，记录后将幼苗及时拔除。计算公式为^[29]

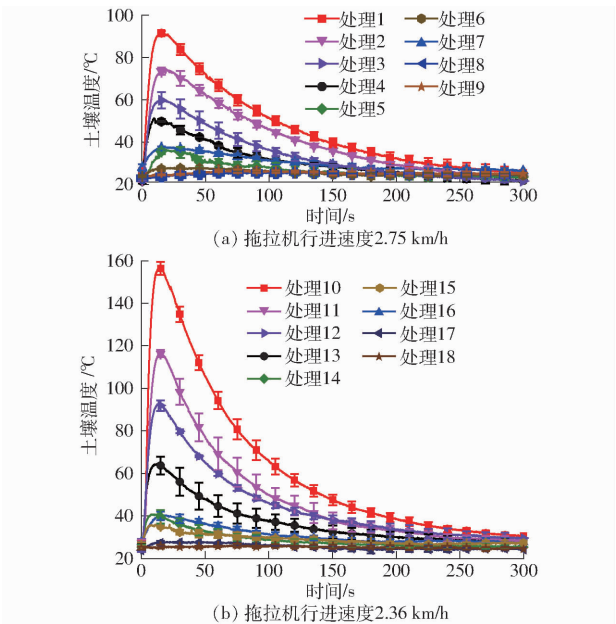


图 13 不同试验参数下土壤温度随时间变化曲线
Fig. 13 Change curves of soil temperature values with time under different experimental parameters

$$G_p = \sum G_i / N \times 100\%$$

(3)

$$G_e = \sum G_s / N \times 100\%$$

(4)

$$G_i = \sum G_i / D_i$$

(5)

$$T = \sum (G_i D_i) / N$$

(6)

式中 G_p ——发芽率,%
 N ——供试种子数
 G_e ——发芽势,%
 G_i ——发芽指数
 T ——平均发芽时间,d
 G_t ——第 t 天发芽种子数
 D_t ——第 t 天发芽时间,d
杂草种子平均发芽时间越长,越有利于水稻吸

收养分;杂草种子发芽指数、发芽势和发芽率越小,说明杂草种子活性越差,越有利于水稻生长。

3.3 结果与分析

不同燃料输入流量对应的杂草种子发芽特性如表 4 所示。从表 4 可以看出,处理组 10 中马唐种子、鳢肠种子发芽指数和发芽率与未经火焰处理对照组没有显著差异,其余处理组中杂草种子的发芽指数和发芽率对比未经火焰处理对照组均有显著差异,且随着土壤温度的增加而逐渐降低。处理组 10 中马唐种子的发芽势与未经火焰处理对照组没有显著差异,其余处理组中杂草种子的发芽势对比未经火焰处理对照组均有显著差异,且随着土壤温度的增加而逐渐降低。

表 4 不同燃料输入流量处理下杂草种子发芽特性变化

Tab.4 Weed seed germination characteristics with different fuel input flow treatments

种子品种	处理组编号	平均发芽时间/d	发芽指数	发芽势/%	发芽率/%
马唐		4.57±0.37	21.23±1.82	20.00±1.47	29.00±1.66
	10	3.19±0.22	19.50±1.56	20.50±0.95	23.00±1.32
	11	3.48±0.34	10.45±0.71	9.50±1.18	12.50±1.11
	12	3.00±0.57	1.08±0.21	1.50±0.25	1.50±0.25
鳢肠		3.88±0.58	15.32±1.13	15.00±0.65	20.50±2.09
	10	4.43±0.56	9.48±1.59	9.00±0.87	14.00±1.63
	11	4.69±0.84	5.58±0.97	4.50±0.75	8.00±1.35
	12	8.29±1.50	0.66±0.15	0±0.01	2.50±0.48
千金子		2.88±0.26	25.24±3.75	23.00±2.96	26.00±3.08
	10	4.24±0.26	7.87±1.03	9.50±1.55	12.50±1.31
	11	2.94±0.63	8.10±1.10	6.50±0.85	8.00±1.22
	12	5.71±1.22	1.67±0.40	2.00±0.58	3.50±0.75
异型莎草		6.51±0.36	55.91±2.87	30.00±0.01	81.50±2.17
	10	6.74±0.53	27.56±0.63	18.50±2.29	59.50±2.56
	11	7.42±1.71	6.61±1.00	5.00±0.96	18.00±3.34
	12	8.08±0.97	3.99±0.26	1.50±0.25	13.00±1.32

随着土壤温度的增加,杂草种子发芽率逐渐降低。处理组 10 对应的土壤温度为 92.83℃,马唐、鳢肠、千金子和异型莎草 4 种杂草种子发芽率相比未经火焰处理对照组分别降低 20.69%、31.71%、51.92% 和 27.00%。处理组 11 对应的土壤温度为 116.58℃,马唐、鳢肠、千金子和异型莎草 4 种杂草种子发芽率相比未经火焰处理对照组分别降低 56.90%、60.98%、69.23% 和 77.91%。处理组 12 对应的土壤温度为 156.83℃,马唐、鳢肠、千金子和异型莎草 4 种杂草种子发芽率相比未经火焰处理对照组分别降低 94.82%、87.81%、86.54% 和 84.05%。

相比未经火焰处理的对照组,92.83℃ 的土壤温度可以使千金子种子和异型莎草种子的发芽率显著降低,但不足以使马唐种子和鳢肠种子的发芽率显

著降低,当土壤温度达到 116.58℃ 和 156.83℃ 时,4 种杂草种子发芽率均显著降低,这表明马唐种子和鳢肠种子耐热性较好,可能需要提高土壤温度或延长土壤温度处于较高温度的时间,以达到较好的消杀效果。

4 田间试验

为进一步验证火焰消杀装置对土壤中杂草种子的处理效果,检验其田间作业性能,于 2023 年 7 月在广东省河源市柳城镇下坝村农业科学试验基地开展土壤火焰处理田间试验。田间试验时,以主要存在的杂草稗草、马唐、鳢肠和异型莎草等为处理对象,配套动力为雷沃 M1204-B 型拖拉机,土壤含水率为 21.58%。试验过程中,燃料输入流量设置为 3.5 m³/h,作业速度为 2.2 km/h,燃烧器距地高度为 200 mm,在旋耕前、后分别进行一次土壤火焰处理,

旋耕前土壤火焰处理效果如图 14a 所示,旋耕后土壤火焰处理过程如图 14b 所示。



图 14 田间火焰热力消杀试验

Fig. 14 Field flame thermal abatement test

土壤火焰处理后,在处理区域随机选取 4 个 500 mm×500 mm 的采样点,调查杂草在第 42 天的对照组发芽数量 Z_1 和处理组发芽数量 Z_2 ,结果如表 5 所示,并计算相对除草率 Y ,公式为

$$Y = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} \times 100\% \tag{7}$$

表 5 田间试验各种类杂草发芽数量

Tab.5 Germination quantities of various weed types in field test

杂草种类	对照组发芽 数量 Z_1	处理组发芽 数量 Z_2	相对除草率 $Y/\%$
稗草	6	1	83.33
马唐	13	2	84.62
鳢肠	5	1	80.00
异型莎草	11	0	100

田间试验结果表明,在土壤火焰处理后第 42 天,相比对照组,土壤火焰处理组对稗草、马唐、异型

莎草和鳢肠种子有显著的抑制萌发作用,相对除草率 $Y \geq 80.00\%$ 。

5 结论

(1)燃料分流部件中集管内径对各支管间燃料流量分配的均匀性有重要影响。通过数值模拟和验证试验得出,当集管内径 d 为 20 mm、气体输入流量为 1.0 ~ 3.5 m³/h 时,最大流量偏差系数 $\Delta\eta$ 在 3.0% 以内,支管间流体流量分配较均匀。

(2)火焰高度和火焰温度最高值均随着燃料输入流量的增大而增大。土壤温度变化规律试验结果表明,当拖拉机前进速度为 2.36 km/h,燃料输入流量为 2.5、3.0、3.5 m³/h,燃烧器出口距地高度为 200 mm 时,土壤温度最高值可分别达到 92.83、116.58、156.83℃。

(3)4 种杂草种子的平均发芽时间、发芽指数、发芽势和发芽率等特性指标随着土壤温度的增大而逐渐减小。相比未经火焰处理的对照组,当土壤温度达到 92.83℃时,在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下,火焰处理千金子、异型莎草种子的发芽率显著降低,但对马唐、鳢肠种子的发芽率影响不显著,当土壤温度达到 116.58℃和 156.83℃时,4 种杂草种子的发芽率均显著降低,当土壤温度达到 156.83℃时,马唐、鳢肠、千金子和异型莎草 4 种杂草种子的发芽率分别降低 94.82%、87.81%、86.54% 和 84.05%。

(4)从土壤温度变化规律试验看出,土壤火焰处理主要适用于水稻旱直播种植,对较干旱土壤表面的加热效果较好,对土壤内部的加热效果受土壤导热系数和土壤含水率等因素的影响不明显。因此,如果需要对土壤内部的杂草种子进行火焰处理,可以先进行旋耕处理,将杂草种子带到土壤表面,再进行土壤火焰处理。另外,田间试验表明,土壤火焰处理对稗草、马唐、鳢肠和异型莎草有显著的抑制萌发作用,其相对除草率 $Y \geq 80.00\%$ 。

参 考 文 献

[1] 罗锡文,王在满,曾山,等. 水稻机械化直播技术研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 1-13.
LUO Xiwen, WANG Zaiman, ZENG Shan, et al. Recent advances in mechanized direct seeding technology for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 1-13. (in Chinese)

[2] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese)

[3] 臧英,罗锡文,周志艳. 南方水稻种植和收获机械化的发展策略[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 60-63.
ZANG Ying, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan. Development strategy on rice planting and harvesting mechanization in South China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 60-63. (in Chinese)

[4] 张斌,董立尧. 水稻田杂草群落演化原因及趋势浅析[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(2): 58-60.
ZHANG Bin, DONG Liyao. Preliminary analysis on reason and trend of weed community evolution in paddy field[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2009, 37(2): 58-60. (in Chinese)

[5] 张耗,余超,陈可伟,等. 直播方式对水稻生理性状和产量的影响及其成本分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 58-64.
ZHANG Hao, YU Chao, CHEN Kewei, et al. Effect of direct-seeding methods on physiological characteristics and grain yield of

- rice and its cost analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 58–64. (in Chinese)
- [6] 张夕林, 张谷丰, 孙雪梅, 等. 直播稻田杂草发生特点及其综合治理[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(1): 117–118. ZHANG Xilin, ZHANG Gufeng, SUN Xuemei, et al. Characteristics and comprehensive control of weeds in direct seeding paddy fields[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2000, 23(1): 117–118. (in Chinese)
- [7] 王卫, 谢小立, 谢永宏. 稻田土壤种子库研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2758–2763. WANG Wei, XIE Xiaoli, XIE Yonghong. Progress in the researches of seed bank in rice paddy fields[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11): 2758–2763. (in Chinese)
- [8] 丛晓男, 单菁菁. 化肥农药减量与农用地土壤污染治理研究[J]. 江淮论坛, 2019(2): 17–23. CONG Xiaonan, SHAN Jingjing. Research on input of chemical fertilizers and pesticides and soil pollution control of agricultural land[J]. Jiang-Huai Tribune, 2019(2): 17–23. (in Chinese)
- [9] ASCARD J. Effects of flame weeding on weed species at different developmental stages[J]. Weed Research, 1995, 35(5): 397–411.
- [10] SIVESIND E C, LEBLANC M L, CLOUTIER D C, et al. Impact of selective flame weeding on onion yield, pungency, flavonoid concentration, and weeds[J]. Crop Protection, 2012, 39: 45–51.
- [11] RAHKONEN J, PIETIKAINEN J, JOKELA H. The effects of flame weeding on soil microbial biomass[J]. Biological Agriculture & Horticulture, 1999, 16(4): 363–368.
- [12] ULLOA S M, DATTA A, MALIDZA G, et al. Yield and yield components of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] are influenced by the timing of broadcast flaming[J]. Field Crops Research, 2010, 119(2–3): 348–354.
- [13] STEPANOVIC S, DATTA A, NELISON B, et al. The effectiveness of flame weeding and cultivation on weed control, yield and yield components of organic soybean as influenced by manure application[J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2016, 31(4): 288–299.
- [14] RAJKOVIC M, MALIDZA G, STEPANOVIC S, et al. Influence of burner position on temperature distribution in soybean flaming[J]. Agronomy, 2020, 10(3): 391.
- [15] MORSELLI N, PUGLIA M, PEDRAZZI S, et al. Energy, environmental and feasibility evaluation of tractor-mounted biomass gasifier for flame weeding[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 50: 101823.
- [16] GUO Wenlei, LI Feng, WU Dandan, et al. Effectiveness of flame for preplant pest management in leaf vegetable fields[J]. Hort Technology, 2019, 29(6): 788–794.
- [17] MAO Liangang, WANG Qiuxia, YAN Dongdong, et al. Flame soil disinfection: a novel, promising, non-chemical method to control soilborne nematodes, fungal and bacterial pathogens in China[J]. Crop Protection, 2016, 83: 90–94.
- [18] TONG J C K, SPARROW E M, ABRAHAM J P. Geometric strategies for attainment of identical outflows through all of the exit ports of a distribution manifold in a manifold system[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(17–18): 3552–3560.
- [19] 孙文峰, 王进, 常晋恺, 等. 喷雾机预混装置动态流场分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 83–95. SUN Wenfeng, WANG Jin, CHANG Jinkai, et al. Dynamic flow field analysis and parameter optimization of premixing device of spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 83–95. (in Chinese)
- [20] 杨程, 刘宏昭, 原大宁. 并联管组流体特性分析及均流模型设计[J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1573–1578. YANG Cheng, LIU Hongzhao, YUAN Danning. Fluid characteristic analysis and flow sharing model design of parallel pipe group[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(7): 1573–1578. (in Chinese)
- [21] 杨断利, 张然, 陈辉, 等. 蛋鸡羽毛覆盖度计算及其与体温关系研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 242–251. YANG Duanli, ZHANG Ran, CHEN Hui, et al. Calculation of feather coverage and relationship between coverage and body temperature in laying hens[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 242–251. (in Chinese)
- [22] 张玉涛, 林国钺, 史学强, 等. 横向声波扰动下的乙醇燃烧火焰结构和振荡特性[J]. 工程科学学报, 2022, 44(8): 1453–1461. ZHANG Yutao, LIN Guocheng, SHI Xueqiang, et al. Flame structure and oscillation characteristics of ethanol combustion under transverse acoustic disturbance[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(8): 1453–1461. (in Chinese)
- [23] 刘晓文, 曾雪婷, 李涛, 等. 基于改进 YOLO v7 的生猪群体体温红外自动检测方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 267–274. LIU Xiaowen, ZENG Xueting, LI Tao, et al. Automatic detection method of body temperature in herd of pigs based on improved YOLO v7[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Sup. 1): 267–274. (in Chinese)
- [24] 吴竞仑, 李永丰, 张志勇, 等. 土层深度对稻田杂草种子出苗及生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2003, 19(3): 170–173. WU Jinglun, LI Yongfeng, ZHANG Zhiyong, et al. Effect of difference soil depths on emergence of weed seeding and its growth in rice field[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2003, 19(3): 170–173. (in Chinese)
- [25] LIU Changchun, LIU Xinle, GE Hong, et al. On the influence of distance between two jets on flickering diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 2019, 201: 23–30.
- [26] ULLOA S M, DATTA A, KNEZEVIC S Z. Growth stage impacts tolerance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to broadcast flaming[J]. Crop Protection, 2010, 29(10): 1130–1135.
- [27] 陈树人, 栗移新, 潘雷. 热除草技术现状和展望[J]. 安徽农业科学, 2007(33): 10695–10697. CHEN Shuren, LI Yixin, PAN Lei. Review and prospect of thermal weed control technologies[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007(33): 10695–10697. (in Chinese)
- [28] 许永福. 刺罩式土壤蒸汽除草消毒装置设计及试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. XU Yongfu. Design and experiment of spike-hood soil steam weeding and disinfection device[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [29] 杨洪伟, 张丽颖, 纪建伟, 等. 低场核磁共振分析聚乙二醇对萌发期水稻种子水分吸收的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 276–283. YANG Hongwei, ZHANG Liying, JI Jianwei, et al. Effect of establishment and application of prediction model of soil water in walnut orchard based on unmanned aerial vehicle thermal infrared imagery[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 276–283. (in Chinese)