

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.020

柑橘黄龙病远红外热处理温度场分布特性试验研究

张建桃^{1,2} 林耿纯^{1,2} 陈 鸿¹ 文 晟^{2,3} 尹选春^{2,4} 邓小玲^{2,5}

(1. 华南农业大学数学与信息学院, 广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642;
3. 华南农业大学工程基础教学与训练中心, 广州 510642; 4. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;
5. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642)

摘要: 针对柑橘黄龙病热空气处理存在能耗高、加热设备笨重、传热较慢等问题,提出了柑橘黄龙病远红外热处理方法。为解决远红外加热时柑橘树温差过大的问题,搭建了柑橘黄龙病热空气快速处理温度场分布特性试验平台,研究了远红外灯管组数量、单根灯管功率、加热时间、远红外灯与支架顶部距离对柑橘树温度场分布的影响,并对远红外加热影响因素进行优化。研究表明:远红外灯管组数量、单根灯管功率以及加热时间对柑橘树叶和枝干的温度场分布均有显著影响,远红外灯与支架顶部距离对树叶的温度场分布影响显著。试验优化后的参数为:远红外灯管组数量为3,单根灯管功率为1 kW,加热时间为3 min,远红外灯与支架顶部距离为10 cm。在此条件下,树叶温度平均值为58.1℃,枝干温度平均值为43.1℃,整体温度平均值为52.3℃。在此参数下对柑橘黄龙病进行远红外热处理田间试验,病菌浓度平均降低34.4%。研究结果可为柑橘黄龙病规模化远红外热处理设备的优化设计提供参考。

关键词: 柑橘; 黄龙病; 远红外热处理; 温度场; 防治效果

中图分类号: S436.6; S129 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)10-0175-14

Experiment on Temperature Field Distribution Characteristics of Citrus HLB Far Infrared Heat Treatment

ZHANG Jiantao^{1,2} LIN Gengchun^{1,2} CHEN Hong¹ WEN Sheng^{2,3} YIN Xuanchun^{2,4} DENG Xiaoling^{2,5}

(1. College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
2. National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology, Guangzhou 510642, China
3. Engineering Fundamental Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
4. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
5. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: For the weak points of citrus Huanglongbing (HLB) heat treatment by hot air, such as high energy consumption, slow heat transfer, and heavy heating equipment, far infrared heat treatment method for citrus HLB was put forward. An experimental platform of HLB far infrared heat treatment was set up, which consisted of heat treatment enclosure, far infrared lamp groups, a paperless recorder, a 12 channels temperature recorder and some temperature sensors, to study the influence of the far infrared lamp groups quantity, the power of far infrared lamp, the heating time, position of the far infrared lamps on the temperature field distribution of far infrared heat treatment. The results showed that the quantity of far infrared lamp groups, the power of single far infrared lamp and the heating time had significant effect on the temperature field distribution of leaves and branches, the distance between the far infrared lamp groups and the top of the stent had significant effect on the temperature field distribution of leaves. The factors that affecting the temperature field distribution were optimized. The optimum parameters were as follows: the quantity of far infrared lamp groups was 3, the power of single far infrared lamp was 1 kW,

收稿日期: 2018-12-24 修回日期: 2019-06-02
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701001)、国家自然科学基金项目(61773171, 61675003)、广东省科技计划项目(2016A020210092, 2017B010117010)、广东省教育厅平台建设项目(2015KJHZ007)和大学生创新创业项目(201710564193)
作者简介: 张建桃(1978—),男,副教授,博士,主要从事精细农业研究,E-mail: zhangjiantao@yeah.net
通信作者: 邓小玲(1978—),女,副教授,博士,主要从事柑橘黄龙病智能无损检测技术研究,E-mail: dengxl@scau.edu.cn

the heating time was 3 min, and the distance between far infrared light and the top of the bracket was 10 cm. Under the optimal parameters, the average temperature of leaves was 58.1℃, the average temperature of branches was 43.1℃, and the average temperature of the whole treatment enclosure was 52.3℃. Under the parameters the effectiveness of infrared heat treatment on the control of citrus HLB was proved by experiments, the average reduction rate of bacteria concentration after treatment was 34.4%. The results provided a reference for the optimization design of large-scale HLB infrared heat treatment equipment.

Key words: citrus; Huanglongbing; far infrared heat treatment; temperature field; control effectiveness

0 引言

柑橘黄龙病 (HLB) 是由韧皮部杆菌属的病原菌引起的毁灭性疾病^[1],除了采取预防措施,如移除受感染的植株、种植无疾病的幼苗和管理昆虫媒介之外,没有其他有效管理办法^[2]。根据发病特点及发现地域的不同,柑橘黄龙病分为 *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CaLas)、*Candidatus Liberibacter africanus* (CaLaf) 和 *Candidatus Liberibacter americanus* (CaLam) 3 种类型^[3-4]。其中, CaLas 和 CaLam 侵染植株后,在 22~24℃ 和 27~32℃ 均可引起症状,属于耐热型; CaLaf 侵染植株后,在 22~24℃ 可使植株表现严重症状,在 30℃ 以上症状减轻或消失,属于热敏感型^[5-6]。患有黄龙病的柑橘树表现为植株矮化,结果变少,果实变小、畸形,且着色不均匀^[7-9]。柑橘黄龙病传播途径除了嫁接、用病树接穗繁殖以及接穗和染病苗木的远距离传播之外,柑橘木虱是重要的传播媒介^[10]。目前,针对柑橘黄龙病的防控仍以防为主,尚无特效药及抗病品种^[11]。化学防治主要作为一种间接防治方法,它是利用化学药品杀死柑橘黄龙病传播媒介柑橘木虱等,阻止黄龙病的传播,进而对柑橘黄龙病进行防治。但化学药品的使用容易使柑橘木虱产生抗药性,且会造成环境污染。砍除病树对于防治黄龙病具有一定的效果,但是大量砍除病树将对以柑橘为经济来源的果农造成巨大损失。针对柑橘木虱进行生物防治,对抑制柑橘黄龙病的传播具有一定的作用,但成本过高,见效慢。除此之外,热处理方法是抑制黄龙病传播的有效物理防治方法,该方法利用黄龙病菌对温度的敏感性,直接抑制黄龙病菌的传播^[12]。

热处理也称热疗,是应用较早的一种脱毒技术^[13-15]。柑橘黄龙病热处理技术的主要原理就是利用外界的传热介质,如光照、湿热空气、热水或蒸汽等,向感染黄龙病的柑橘植株传递足够热量,在不影响其正常生长的前提下,使黄龙病病菌钝化甚至死亡,黄龙病症状消失^[13-16]。文献[17-28]研究证明,热处理对于柑橘黄龙病的防治是有效的。

但自然热罩热处理存在处理周期长、效率低、对自然条件依赖大、处理罩内温差过大等问题;热空气快速热处理以空气作为传热介质,存在加热设备笨重、传热慢、能耗高等问题。

远红外线具有除菌杀毒的作用,利用远红外线加热细菌内毒素时,180℃ 温度下加热 120 min,或 250℃ 下加热 30 min,内毒素均转阴性^[29]。文献[30]利用远红外加热技术处理桑椹菌核病,当远红外灯管与菌核间距离为 45 mm、加热 60 s、温度为 120℃ 时,可有效杀死病原菌。文献[31]采用远红外基质消毒机处理蔬菜育苗基质,能够杀死基质中的病菌、虫卵、害虫以及杂草种子。远红外热处理具有加热快、能耗低、无污染等特点,已在植物除菌杀毒等方面得到了成功的应用。

本文提出采用远红外对柑橘黄龙病进行热处理。搭建柑橘黄龙病远红外热处理温度场分布特性试验平台。通过研究远红外灯管组数量、灯管功率、加热时间等对温度场分布的影响,为柑橘黄龙病远红外热处理设备的优化设计提供依据。

1 材料与方法

1.1 柑橘黄龙病远红外热处理试验平台

搭建的柑橘黄龙病远红外快速热处理温度场分布特性试验平台如图 1 所示。此试验平台配置有远红外灯,其灯管为碳纤维石英加热管,额定电压 220 V,额定功率 1 000 W,长度 600 mm,灯罩尺寸为 620 mm × 180 mm × 46 mm;功率调节器(衡鑫电热电器制造厂),额定电压 220 V,最大调节功率 9 kW;功率表型号为 PZEM-061(V2.0),量程 0~22 kW;无纸记录仪(杭州盘古自动化系统有限公司)型号为 VX8140R,具有 40 路输入端口,连接 PT100 型温度传感器,量程为 -200~650℃,精度为 0.1℃;12 通道温度记录仪(台湾路昌电子企业股份有限公司),型号为 BTM-4208SD,K 型探头,分辨率为 0.1℃,量程为 -50.0~999.9℃,精度为 ±0.4% FS + 0.5℃;在线式红外测温仪(南京隆顺仪表有限公司),型号 LSCI-SJG/300A,量程 -50~300℃,精度为 2% FS,可以测量物体的最小尺寸为 22.5 mm,最

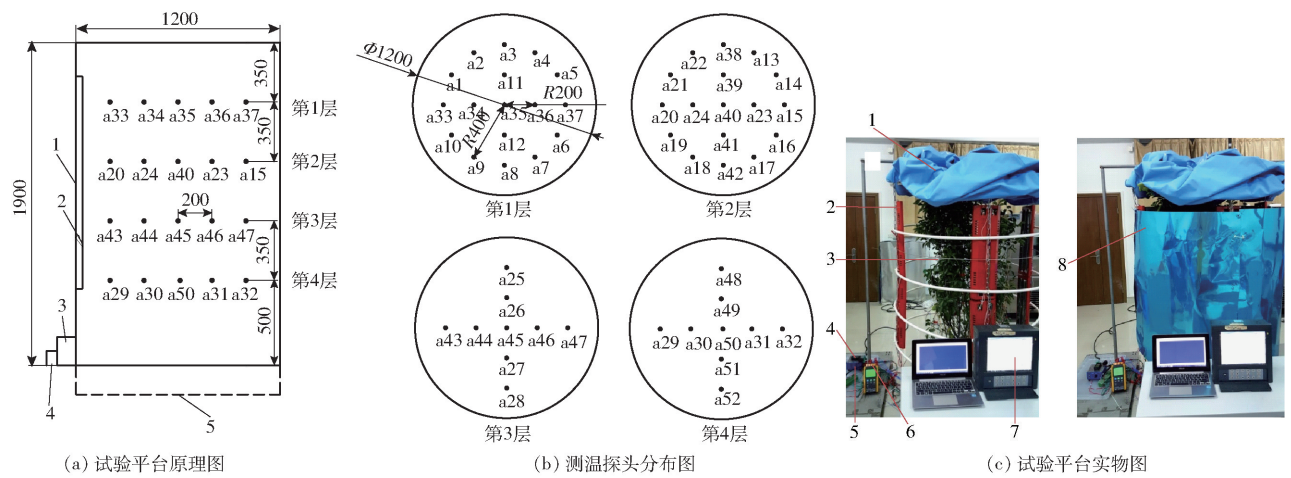


图 1 柑橘黄龙病远红外快速热处理试验平台

Fig. 1 Citrus HLB far infrared rapid heat treatment test platform

1. 处理罩 2. 远红外灯管组 3. 柑橘树 4. 功率表 5. 功率调节器 6. 12 通道温度记录仪 7. 无纸记录仪 8. 铝板

大尺寸为 50 mm,测量的最佳距离为 360 mm,最远测量距离为 700 mm;处理罩由 PVC 双面涂塑防水布制成,防水布厚度 0.45 mm;镜面反射铝板,厚度为 0.3 mm。

两盏远红外灯竖直拼接在一起,各连接一根灯管(每盏远红外灯内可平行安装两根管式红外加热灯管),并以此作为一个整体,即一组远红外灯管。远红外灯管组垂直布置在处理罩内侧。在红外灯辐射区域内,辐射能不需要任何中介物质,直接辐射或经反射涂层反射到柑橘树表面,柑橘树吸收辐射转换为内部的蓄热能^[26],柑橘树叶和树枝温度升高。灯管功率由功率调节器调节,功率用功率表测量。柑橘树叶、枝干的温度通过 PT100 型温度传感器、K 型温度传感器和在线式红外测温仪测量。由于柑橘树的树叶比较稀疏,部分红外灯辐射会透过柑橘树空隙,照射到对面的处理罩上。为了充分利用这部分能量,处理罩内侧布置镜面铝板,透过柑橘树的红外辐射就会被反射到柑橘树,从而提高热辐射效率。

处理罩内共布置 52 个温度测试点,如图 1a 所示,温度传感器分布位置如图 1b 所示。其中 a1 ~ a32 号温度传感器测量树叶温度,a33 ~ a52 号温度传感器测量枝干温度。树冠层树叶密度由上到下逐层降低,测温探头数量由上到下逐渐减少。第 1 层和第 2 层各布置 17 个测试点,其中 12 个用于测量树叶温度,另外 5 个用于测量枝干温度;第 3 层和第 4 层各布置 9 个测试点,每层 4 个用于测量树叶温度,5 个用于测量枝干温度。试验装置实物如图 1c 所示,远红外灯管组用于加热柑橘树,外侧铝板用于反射远红外辐射,由无纸记录仪和通道温度记录仪同时记录各测点温度,试验时室内平均温度为 18℃。树叶、枝干温度利用绝缘胶布将 PT100 和

K 型温度传感器固定在树叶或枝干表面上进行测量。

1.2 柑橘树温度测量方法

为了明确柑橘黄龙病远红外热处理时柑橘树的温度场分布,需测量树叶和枝干的温度。在线式红外测温仪能够直接测量物体表面温度,但只能用于环境温度为 0 ~ 50℃ 的场合。试验过程中处理罩内温度会超过这个范围。PT100 型温度传感器和 K 型温度传感器可以测量固体表面温度,以及气体、流体等的温度^[32]。本研究采用 PT100 型温度传感器和 K 型温度传感器测量树叶和枝干温度。测量时要将传感器固定在树叶或树干上,为了测定试验中采用的固定方法是否能真实反映被测物的温度,需要用红外测温仪对 PT100 型温度传感器和 K 型温度传感器进行标定。

1.2.1 树叶温度测量

测量树叶温度的传感器布置方法如图 2 所示。用 2 kW 的远红外灯在距离为 50 cm 的地方对树叶进行加热,加热 5 min,记录各传感器测量的温度变化。其中位置 1 用在在线式红外测温仪直接测量树叶温度;位置 2、3 分别用绝缘胶布将 K 型温度传感器和 PT100 型温度传感器固定在树叶上;位置 4 用在在线式红外测温仪测量绝缘胶布外表面的温度;位置 5、6 分别将 PT100 型温度传感器和 K 型温度传感器直接暴露在空气中,用于测量远红外加热对 PT100 型温度传感器和 K 型温度传感器金属探头的加热效果。

用远红外加热柑橘树 5 min,各传感器的温度变化如图 3 所示,从图 3 可以看出,位置 1、2、3 在前 2 min 内温度上升了 20℃,2.5 ~ 5 min 时测量的温度相近;位置 4 的温度明显高于其他位置,高出位置

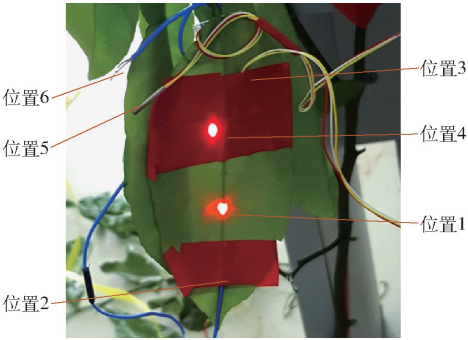


图 2 树叶温度测量试验

Fig. 2 Leaf temperature measurement test

1、2、3 约 6℃;位置 6 测得的温度最低,为 26.4℃,在 2~5 min 时几乎没有变化;位置 5 测得的温度随着远红外加热时间的延长而升高,5 min 内温度低于位置 1、2、3 传感器测得的温度。试验结果表明:绝缘胶布外表面温度明显高于树叶温度;树叶温度高于传感器金属探头直接暴露在空气中的温度;利用绝缘胶布固定 PT100 和 K 型温度传感器测量的树叶温度,与用在线式红外测温仪直接测量的树叶表面温度接近,故可用此方法测量树叶温度。

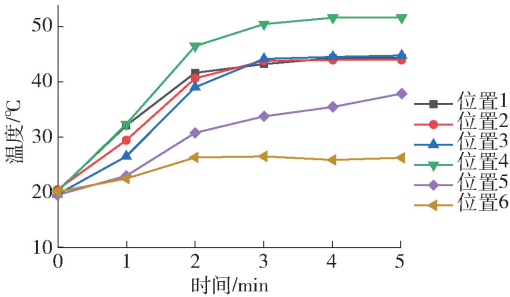


图 3 树叶温度测量试验结果

Fig. 3 Temperature measurement results of citrus leaves

1.2.2 枝干温度测量

测量枝干温度的传感器布置方法如图 4 所示。用 2 kW 的远红外灯在距离为 50 cm 的地方对枝干进行加热,记录各传感器测量的温度变化,加热时间为 5 min。其中位置 1 用在线式红外测温仪直接测量枝干温度,位置 2、3 分别用绝缘胶布将 K 型温度传感器和 PT100 型温度传感器固定在枝干上,测量枝干表皮温度;位置 4 用在线式红外测温仪测量绝缘胶布外表面温度,验证位置 2、3 的传感器测量的是枝干表皮温度还是绝缘胶布的温度;位置 5、6 的 PT100 温度传感器和 K 型温度传感器直接暴露在空气中,用于测量远红外加热对 PT100 型温度传感器和 K 型温度传感器金属探头的加热效果。

用远红外加热柑橘树 5 min,各位置的温度变化如图 5 所示,从图 5 可以看出,位置 1、2、3 在前 2 min 内温度均上升了 12℃左右,并在 2~4 min 内测量的温度相近,差值在 1℃以内;3 min 后位置 4

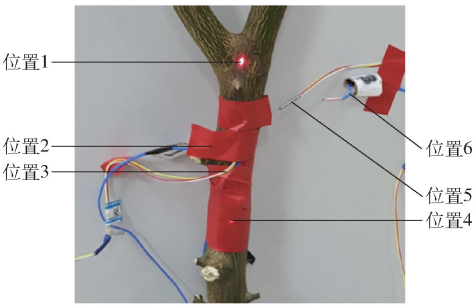


图 4 枝干温度测量

Fig. 4 Temperature measurement of citrus branch

传感器测出的绝缘胶布温度与位置 1、2、3 测得的温度相比略高;位置 5 传感器测量的温度随着远红外加热时间的延长而升高,但低于位置 1、2、3、4 测得的温度;位置 6 传感器测得的温度最低,为 29.45℃,在 1~5 min 内几乎没有上升。试验结果表明,利用绝缘胶布固定 PT100 和 K 型温度传感器测量的枝干温度与用在线式红外测温仪测量的枝干表皮温度在 2~4 min 内接近,绝缘胶布外表面经远红外加热后的温度在 3 min 后高于枝干温度,同时 5 min 内测得的枝干温度高于传感器金属探头受远红外加热后测得的自身温度。故使用绝缘胶布固定 PT100 和 K 型温度传感器测量枝干表皮温度是可行的。

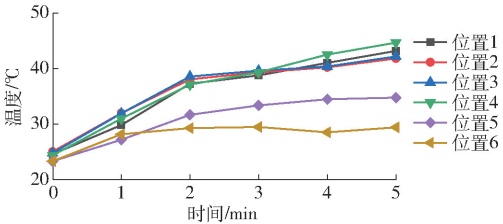


图 5 枝干温度测量试验结果

Fig. 5 Temperature measurement results of citrus branch

1.3 试验方法

将 5 年生柑橘树(高 1.87 m,树冠最大直径 1.0 m)置于处理罩内,首先通过对远红外灯管组数量、单根远红外灯管功率、加热时间、远红外灯管组与支架顶部距离 4 个影响因素进行单因素试验研究,分析这些因素对柑橘黄龙病远红外热处理温度场分布的影响;然后在确定因素水平对其影响的基础上,利用正交试验确定较优的试验参数组合。

选取的各因素和实际取值如表 1 所示,将两盏远红外灯竖直拼接在一起,各连接 1 根灯管,并以此作为一个整体,组成远红外灯管组。改变远红外灯管组数量时,各远红外灯管均匀布置在处理罩内四周,如图 1c 所示,当灯管组数为 1 时,布置在左侧;当灯管组数为 2 时,左右各布置 1 个;当灯管组数为 3 时,以左侧为基准,均匀布置;当灯管组数为 4 时,

前后左右 4 个方位各布置 1 个。试验时处理罩封闭,起到保温作用。首先进行单因素试验,研究远红外灯管组数量、单根远红外灯管功率、加热时间、远红外灯顶端与支架顶部距离等因素对温度场分布的影响;然后进行正交试验,优选出能使柑橘树均匀加热的参数;最后利用优选的参数,对柑橘黄龙病进行远红外热处理田间试验,检测处理效果。

表 1 试验因素与取值

Tab.1 Experiment factors and values

试验因素	取值
远红外灯管组数量/个	1、2、3、4
单根远红外灯管功率/kW	0.7、0.8、0.9、1.0
加热时间/min	2.0、2.5、3.0、3.5
远红外灯与支架顶部距离/cm	10、15、20、25

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 远红外灯管组数量对温度场的影响

试验条件:单根远红外灯管功率固定为 0.8 kW,加热时间 3 min,远红外灯与支架顶部距离 10 cm,通过改变远红外灯管组数量来改变加热功率,其他试验条件不改变,远红外灯管组数量分别选取为 1、2、3、4,试验重复 3 次,试验结果如表 2、3 所示。根据表 2 中不同远红外灯管组数量下树叶温度,利用 Matlab 分别进行曲面插值,插值结果如

表 2 远红外灯管组数量对树叶温度场的影响

Tab.2 Citrus leaves temperature under different far infrared lamp groups quantity

℃

传感器序号		远红外灯管组数量/个							
		1		2		3		4	
a1	a17	28.6	23.3	36.1	34.0	53.7	63.4	54.8	60.9
a2	a18	27.6	23.9	34.2	33.5	54.1	50.2	63.6	58.1
a3	a19	26.8	33.8	36.5	38.3	55.6	57.3	67.0	62.1
a4	a20	23.3	51.6	40.8	54.1	60.1	65.4	62.6	69.9
a5	a21	24.4	40.6	48.7	39.1	58.2	50.5	66.5	58.7
a6	a22	25.5	30.4	48.3	37.1	59.8	57.5	67.7	68.8
a7	a23	24.7	23.7	36.6	38.5	64.9	50.9	59.7	55.9
a8	a24	25.7	26.3	34.9	32.5	59.8	43.2	67.7	50.3
a9	a25	23.8	26.2	31.8	34.9	50.3	51.7	58.7	71.6
a10	a26	28.4	26.3	34.6	34.4	53.6	52.4	57.5	52.1
a11	a27	25.0	21.6	35.2	28.0	48.2	40.5	63.4	48.7
a12	a28	23.1	22.3	32.2	29.2	48.8	54.3	49.9	56.4
a13	a29	25.2	36.5	37.0	48.2	65.5	51.5	71.0	57.9
a14	a30	25.6	28.9	46.1	34.8	54.4	41.6	67.1	44.7
a15	a31	23.2	23.2	51.2	31.0	46.4	43.0	62.5	47.1
a16	a32	22.0	23.4	41.5	53.8	55.3	53.8	56.1	60.8
平均值/℃		27.0		38.3		53.6		60.0	
极差/℃		30.0		37.5		30.5		26.9	
显著性		P<0.01							

表 3 远红外灯管组数量对枝干温度场的影响

Tab.3 Citrus branches temperature under different far infrared lamp groups quantity

℃

传感器序号		远红外灯管组数量/个							
		1		2		3		4	
a33	a43	40.3	39.5	41.4	40.4	61.2	53.6	66.8	62.4
a34	a44	25.5	24.9	31.3	27.7	41.9	34.6	45.4	38.0
a35	a45	21.9	24.7	25.8	27.2	37.3	33.4	40.7	40.2
a36	a46	21.7	20.3	31.5	29.5	42.7	37.3	44.5	38.9
a37	a47	23.8	20.6	41.0	41.9	49.7	44.9	68.9	48.8
a38	a48	24.2	24.0	29.7	29.1	50.0	47.9	63.7	60.8
a39	a49	21.9	19.6	26.3	22.0	39.4	29.8	42.4	31.9
a40	a50	20.2	19.4	25.0	20.2	31.4	25.9	33.8	27.7
a41	a51	21.9	20.1	28.0	22.6	40.3	29.1	43.6	30.9
a42	a52	20.2	21.4	24.3	25.1	35.5	32.3	38.1	35.9
平均值/℃		23.8		29.5		39.9		45.2	
极差/℃		20.9		21.7		35.3		41.2	
显著性		P<0.01							

图 6 所示。图 6 中坐标原点位于处理罩中心,边缘位置与远红外灯的最近距离为 20 cm。从理论分析,图 6b~6d 中温度应为对称分布,但从图 6 中可以看出,实际测得的温度分布并不对称,其主要原因应该是柑橘树叶和枝干分布不均匀,导致柑橘树吸收红外辐射量不一致,造成温度不对称。

从表 2 和表 3 可以得出,远红外灯管组数量对树叶(表 2)和枝干(表 3)的温度场分布均有极显著影响($P<0.01$)。随着远红外灯管组数量的增加,树叶以及枝干的平均温度均增加,且树叶温度高于枝干温度。结合图 6 可以得出,当远红外灯管组数量为 1 或 2 时,处理罩内树叶温度场非常不均匀。

当远红外灯管组数量为 3 和 4 时,树叶平均温度分别为 53.6、60.0℃,树叶温度极差分别为 30.5、

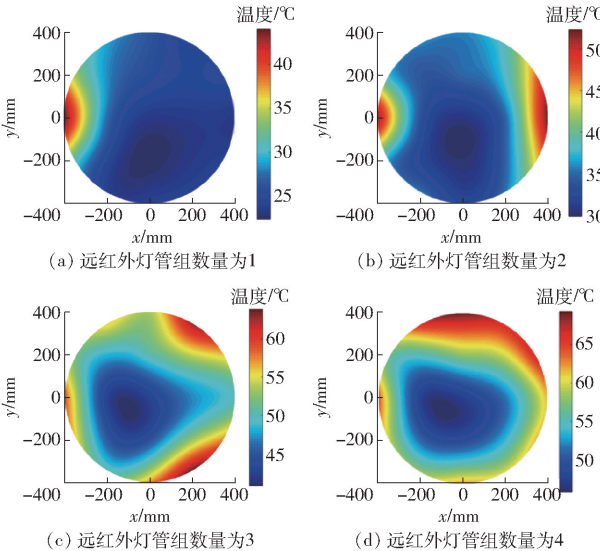


图 6 不同远红外灯管组数量树叶温度分布图

Fig.6 Leaf temperature distribution maps under different far infrared lamp groups quantity

26.9℃;枝干平均温度分别为 39.9、45.2℃,枝干温度极差分别为 35.3、41.2℃。说明采用 4 组灯管组与 3 组灯管组加热相比,前者树叶温度场更均匀,而后者枝干温度场更均匀。

从以上试验结果及分析可以看出,远红外灯管组数量对树叶以及枝干温度场分布影响显著。随着远红外灯管组数量的增加,树叶以及枝干的平均温度值增加,且树叶温度高于枝干温度。灯管组数量为 4 时,树叶温度均匀,灯管组数量为 3 时,枝干温度较均匀。当远红外灯管组数量为 3 时,树叶平均温度为 53.6℃,枝干为 39.9℃。

2.1.2 单根远红外灯管功率对温度场的影响

试验条件:固定远红外灯管组数量为 3,加热时间 2 min,远红外灯与支架顶部距离 10 cm,其他试验条件不变,改变远红外灯功率来加热柑橘树,远红外灯功率取 0.7、0.8、0.9、1.0 kW,试验重复 3 次,试验结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 单根远红外灯管功率对树叶温度场的影响
Tab.4 Citrus leaves temperature under different far infrared lamp power ℃

传感器序号		单根远红外灯管功率/kW							
		0.7		0.8		0.9		1.0	
a1	a17	45.2	53.7	37.9	51.8	52.4	63.2	51.1	62.1
a2	a18	41.1	44.2	39.0	37.9	46.4	50.9	44.7	49.5
a3	a19	45.4	41.8	46.9	42.5	52.1	46.5	50.4	45.0
a4	a20	45.4	47.0	51.8	52.8	52.2	52.7	49.9	51.3
a5	a21	42.3	44.9	44.4	40.2	48.4	52.0	47.5	51.3
a6	a22	41.1	43.3	46.9	43.7	48.4	49.1	46.6	47.7
a7	a23	58.9	41.3	59.1	38.2	71.2	46.9	70.4	45.4
a8	a24	46.9	37.9	48.1	41.8	52.8	42.9	50.7	41.8
a9	a25	40.5	40.9	37.1	42.7	47.5	47.8	45.8	46.4
a10	a26	44.4	38.9	39.2	41.4	50.8	43.3	48.7	43.1
a11	a27	38.1	35.8	35.2	33.1	42.7	39.4	41.4	38.5
a12	a28	42.2	43.8	35.0	43.8	47.5	48.7	46.3	48.7
a13	a29	54.9	41.4	52.7	44.7	63.9	46.8	59.9	45.3
a14	a30	40.4	34.1	43.7	35.8	46.1	37.6	45.9	36.7
a15	a31	35.6	34.0	35.8	39.1	40.5	37.0	39.4	37.5
a16	a32	39.1	35.3	50.2	45.2	43.2	38.6	42.3	38.2
平均值/℃		42.5		43.0		48.4		47.2	
标准差/℃		5.7		6.3		7.4		7.1	
显著性		P<0.01							

从表 4 和表 5 可以看出,当远红外灯管组数量为 3,加热时间为 2 min,远红外灯与支架顶部距离为 10 cm 时,单根远红外灯管功率对树叶(表 4)和枝干(表 5)温度场分布均影响显著($P<0.05$)。树叶的平均温度均达到 40℃ 以上,当单根远红外灯管功率为 0.9 kW 和 1.0 kW 时,树叶、枝干温度平均值接近,当单根远红外灯管功率为 0.7 kW 和 0.8 kW

表 5 单根远红外灯管功率对枝干温度场的影响
Tab.5 Citrus branches temperature under different far infrared lamp power ℃

传感器序号		单根远红外灯管功率/kW							
		0.7		0.8		0.9		1.0	
枝干									
a33	a43	39.2	44.2	46.2	43.3	45.1	50.2	44.7	48.6
a34	a44	35.9	29.3	32.4	31.2	40.5	31.7	38.9	31.1
a35	a45	30.6	32.3	30.4	28.9	33.5	34.9	32.6	34.5
a36	a46	33.6	30.0	32.7	31.5	37.3	32.2	36.1	32.0
a37	a47	39.0	26.1	36.9	39.3	45.7	27.4	44.1	27.2
a38	a48	36.9	40.3	37.4	40.7	41.2	44.2	39.3	42.5
a39	a49	33.2	27.3	33.2	28.1	36.0	28.7	35.6	28.7
a40	a50	26.4	24.6	28.6	25.3	27.7	24.8	28.0	25.4
a41	a51	35.8	26.8	33.2	26.8	38.9	28.3	38.3	28.3
a42	a52	31.4	28.7	29.8	28.7	33.9	30.8	33.2	30.0
平均值/℃		32.6		31.2		35.7		35.0	
标准差/℃		5.4		5.7		7.1		6.5	
显著性		P<0.01							

时,树叶、枝干的温度平均值也接近,但与 0.9 kW 和 1.0 kW 相比时,温度更低,同时温度标准差也稍低。

不同功率下树叶平均温度的变化如图 7 所示。从图 7 可以看出,不同功率下树叶平均温度上升趋势相似;加热功率为 0.9、1.0 kW 时,树叶温度明显高于 0.7、0.8 kW;功率为 0.9、1.0 kW 时,树叶温度上升速度基本接近,但前者温度高于后者。当单根远红外灯管的功率为 1.0 kW 时,树叶温度平均值在 1.5 min 时上升到 38.5℃,2 min 时上升为 47.2℃,0.5 min 内上升 8.7℃,上升速度与 0.9 kW 时接近。当单根远红外灯管的功率为 0.7 kW 时,树叶温度平均值在 1.5 min 时上升为 35.2℃,2 min 时上升为 42.5℃,0.5 min 内上升 7.3℃,上升速度与 0.8 kW 时接近。

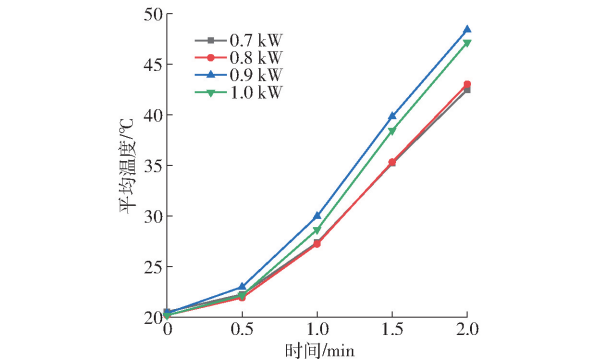


图 7 不同功率下树叶平均温度变化曲线
Fig. 7 Average temperature curves of leaves under different far infrared lamp powers

试验结果表明,增加单根远红外灯管功率可在一定程度上增加树叶以及枝干的温度平均值,且相同条件下树叶温度高于枝干温度。相同加热时间,功率越高树叶平均温度上升幅度越大。0.7、0.8 kW 以及 0.9、

1.0 kW 时测得的树叶以及枝干温度相近。

2.1.3 加热时间对温度场的影响

试验条件:远红外灯管组数量固定为 3 个,单根远红外灯管功率 0.8 kW,远红外灯与支架顶部距离 10 cm,其他试验条件不变,探究不同加热时间对温度场分布的影响,加热时间取 2.0、2.5、3.0、3.5 min,试验重复 3 次。树叶以及枝干的温度平均值、标准差、显著性分析结果如表 6 所示。

表 6 加热时间对温度场的影响

类别 评价指标		加热时间/min			
		2.0	2.5	3.0	3.5
树叶	平均值/℃	41.0	48.3	53.6	59.6
	标准差/℃	6.3	7.7	6.7	7.7
	显著性	$P < 0.01$			
枝干	平均值/℃	31.2	36.2	39.9	43.6
	标准差/℃	5.7	8.6	9.1	10.2
	显著性	$P < 0.01$			

从表 6 可以看出,加热时间对树叶以及枝干的温度场分布均有显著影响($P < 0.01$)。随着加热时间的增加,树叶以及枝干的温度平均值均增加,当加热时间为 3.5 min 时,树叶温度达到 59.6℃,枝干温度平均值达 43.6℃;当加热时间为 2.0 min 时,树叶温度平均值为 41.0℃,枝干温度平均值为 31.2℃,温度上升幅度随着时间推移逐步降低。

由于树叶与枝干不能单独加热,且相同加热条件下树叶温度高于枝干温度,因此应该重点考虑树叶温度,根据表 6 中不同远红外灯管组数量下树叶温度,利用 Matlab 分别进行曲面插值,插值结果如图 8 所示。图中坐标原点位于处理罩中心,边缘位

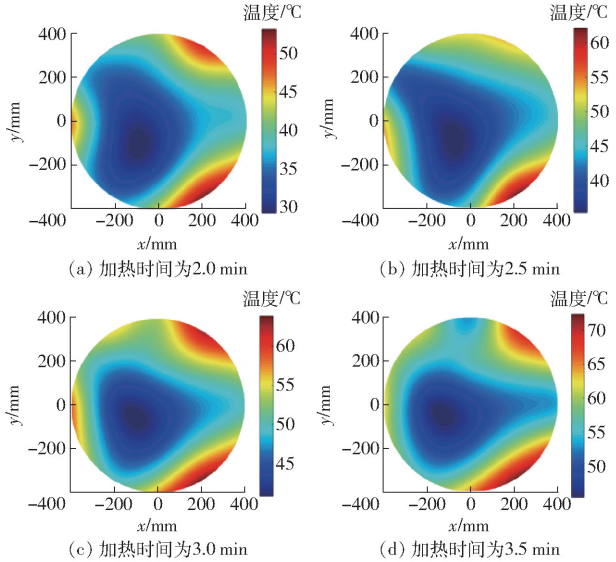


图 8 不同加热时间树叶温度分布图

Fig. 8 Leaf temperature distribution maps under different heating time

置与远红外灯的最近距离为 20 cm。

对于树叶而言,加热时间为 2.0、2.5、3.0、3.5 min 时,在灯的正前方距离灯 20 cm 处,平均温度分别为 50.2、56.2、61.8、67.7℃,最高温度分别为 53.5、62.4、64.2、72.7℃。在灯的正前方距离灯 40 cm 处,平均温度分别为 31.8、37.7、42.4、46.6℃。随着加热时间的增加,虽然距离远红外灯 20 cm 以及 40 cm 处的树叶温度平均值均增加,但从 20 cm 至 40 cm 的温度降低的幅度没有变化。

试验结果表明,在 2 ~ 3.5 min 内,加热时间增加 0.5 min,树叶温度平均值升高 6℃左右。在远红外灯正前方,距离从 20 cm 增加到 40 cm 时,树叶温度平均值下降幅度不随加热时间的变化而变化。相同条件下树叶温度高于枝干温度。

2.1.4 远红外灯顶端与支架顶部距离对温度场的影响

试验条件:远红外灯管组数量固定为 3 个,单根远红外灯管功率 0.8 kW,加热时间 3 min,其他试验条件不变,改变远红外灯与支架顶部距离来加热柑橘树,选取水平为 10、15、20、25 cm,试验重复 3 次。不同远红外灯与支架顶部距离下,树叶以及枝干的温度平均值、标准差、显著性计算结果如表 7 所示。

表 7 远红外灯与支架顶部距离对温度场的影响

Tab. 7 Influence of distance between far infrared lamp and top of bracket on temperature field

类别 评价指标		远红外灯与支架顶部距离/cm			
		10	15	20	25
树叶	平均值/℃	53.6	55.3	55.3	54.8
	标准差/℃	6.7	7.9	4.9	6.8
	显著性	$P = 0.01$			
枝干	平均值/℃	39.9	40.7	40.9	41.0
	标准差/℃	9.1	9.5	9.0	9.9
	显著性	$P = 0.07$			

从表 7 可以看出,当固定远红外灯管组数量为 3,单根远红外灯管功率为 0.8 kW,加热时间为 3 min 时,远红外灯与支架顶部距离对树叶的温度场分布影响显著($P < 0.05$),对枝干的温度场分布无显著影响($P > 0.05$)。树叶以及枝干各水平下的温度平均值接近,树叶温度平均值达到 50℃以上,枝干温度平均值在 40℃左右。当远红外灯与支架顶部距离为 20 cm 时,树叶以及枝干的温度标准差较其他水平时更小,且树叶温度标准差低于枝干温度标准差。

2.2 正交试验结果与分析

2.2.1 正交试验方案

根据单因素试验结果,正交试验考虑远红外灯管组数量(A)、单根远红外灯管功率(B)、加热时间(C)、远红外灯与支架顶部距离(D)4 个因素。选用

L64(421)正交表,正交试验因素水平如表 8 所示。根据 L64(421)正交表安排正交试验,试验测量指标分为两类:温度平均值和温度标准差,包含树叶、枝干、整体(即所有测试点)温度平均值和树叶、枝干、整体温度标准差共 6 个具体评价指标,试验结果如表 9 所示。

表 8 正交试验因素水平

Tab.8 Factors and levels of orthogonal test

因素水平	A/个	B/kW	C/min	D/cm
1	1	0.7	2.0	10
2	2	0.8	2.5	15
3	3	0.9	3.0	20
4	4	1.0	3.5	25

表 9 正交试验结果

Tab.9 Orthogonal test results

℃

序号	温度平均值			温度标准差			序号	温度平均值			温度标准差		
	树叶	树干	整体	树叶	树干	整体		树叶	树干	整体	树叶	树干	整体
1	25.6	23.3	24.7	3.8	4.1	4.0	33	39.6	30.1	35.9	6.6	4.5	7.4
2	26.7	23.4	25.4	4.2	3.9	4.3	34	44.8	34.4	40.8	4.9	6.8	7.6
3	28.9	24.1	27.1	4.4	5.3	5.3	35	53.9	39.9	48.5	6.5	8.9	10.1
4	30.1	25.6	28.4	4.8	4.6	5.2	36	56.6	42.6	51.2	6.8	10.9	11.0
5	25.9	23.1	24.8	4.6	4.4	4.7	37	42.8	32.9	39.0	5.2	5.3	7.1
6	29.0	24.9	27.5	4.6	4.8	5.0	38	50.1	37.1	45.1	7.9	8.6	10.3
7	30.4	25.5	28.5	5.2	4.8	5.6	39	56.5	42.5	51.1	7.1	11.0	11.1
8	32.9	26.6	30.5	6.7	6.9	7.4	40	61.0	46.7	55.5	6.9	11.8	11.4
9	27.8	24.3	26.4	4.7	3.9	4.7	41	47.8	35.7	43.1	6.2	7.1	8.8
10	29.7	25.1	27.9	5.4	4.7	5.6	42	54.9	40.0	49.1	6.7	8.9	10.5
11	33.0	27.6	30.9	6.1	7.1	7.0	43	59.3	43.1	53.1	8.3	10.1	12.0
12	34.3	28.5	32.1	5.7	7.3	6.9	44	65.9	48.1	59.1	7.0	11.1	12.3
13	27.2	23.8	25.9	5.0	4.2	5.0	45	49.9	36.5	44.7	7.0	7.2	9.6
14	31.4	25.8	29.3	6.8	6.2	7.1	46	54.4	39.4	48.7	7.3	8.6	10.7
15	33.5	27.8	31.3	6.6	7.4	7.4	47	62.0	45.2	55.6	6.0	10.4	11.4
16	36.1	29.2	33.4	7.6	9.2	8.8	48	67.7	50.0	60.9	8.3	14.0	13.8
17	33.6	28.8	31.7	4.6	6.0	5.6	49	47.7	36.7	43.5	6.6	7.1	8.7
18	37.5	31.2	35.0	5.2	8.4	7.3	50	54.9	43.2	50.4	5.9	11.2	10.0
19	41.8	32.6	38.3	7.0	8.0	8.6	51	64.5	48.7	58.5	9.2	13.4	13.3
20	45.4	35.9	41.7	5.9	8.9	8.5	52	71.4	54.3	65.4	9.5	14.5	15.1
21	35.9	30.4	33.8	5.3	8.0	6.9	53	57.0	42.3	51.3	6.9	8.4	10.3
22	41.2	34.5	38.7	5.7	9.9	8.2	54	63.2	47.4	57.3	4.8	10.1	10.8
23	46.2	36.1	42.3	6.5	9.2	9.0	55	71.1	52.0	64.1	9.9	12.1	14.6
24	47.5	36.5	43.3	6.1	8.7	8.9	56	68.8	51.5	62.5	10.5	13.6	14.9
25	38.0	30.1	34.9	6.5	6.8	7.6	57	56.2	41.9	51.1	6.3	8.3	10.4
26	44.8	34.9	41.0	7.1	9.1	9.2	58	69.3	51.2	62.3	9.7	14.6	14.7
27	50.5	39.0	46.1	7.9	10.9	10.7	59	73.1	53.8	65.7	7.6	13.3	13.9
28	51.8	41.1	47.7	6.8	13.3	11.0	60	81.1	60.2	73.0	9.3	15.2	15.6
29	38.6	31.4	35.9	6.2	7.2	7.4	61	59.5	45.6	54.4	8.7	10.6	12.0
30	45.0	34.8	41.1	8.2	9.2	9.8	62	66.2	48.0	59.6	9.4	11.1	13.9
31	48.7	39.3	45.1	6.2	12.7	10.2	63	77.8	57.2	70.2	10.5	14.9	16.1
32	53.0	42.4	48.9	7.0	13.1	11.0	64	81.0	58.9	72.8	8.9	13.4	15.4

2.2.2 正交试验直观分析

正交试验直观分析是利用极差衡量各因素对各指标影响情况,极差越大则说明对该指标的影响越大,为重要影响因素,相反极差小则为次要因素^[33]。直观分析结果如表 10 所示,图 9 则表示了各因素水平与各指标均值、标准差之间的关系。

由表 10 可知,因素 A、B、C 对树叶、枝干、整体的温度平均值以及温度标准差这 6 个指标均有影

响,除树叶温度标准差指标外,对其他指标的影响大小一致,从大到小的顺序为 A、C、B。D 对 6 个评价指标也均有影响。对于树叶、枝干和整体温度平均值指标,各因素对其影响大小顺序为 A、C、B、D,最优组合为 A₄B₄C₄D₁。对于树叶、枝干和整体温度标准差指标,各因素对其影响大小顺序为 A、C、B、D(其中树叶温度标准差为 A、C 与 B、D 相同),最优组合为 A₁B₁C₁D₄。从表 10 还可以看出,对于温度

表 10 直观分析结果
Tab. 10 Visual analysis result

指标	因素	各水平均值/℃				极差 R/℃	优水 平
		水平 1	水平 2	水平 3	水平 4		
树叶	A	30.2	43.7	54.2	66.4	36.3	4
	B	43.9	47.5	51.1	52.0	8.1	4
	C	40.8	46.5	52.0	55.3	14.5	4
	D	49.1	48.3	49.0	48.1	1.0	1
	误差列	48.7	48.7	48.6	48.5	0.8	
温度平 均值 枝干	A	25.5	34.9	40.3	49.5	24.0	4
	B	34.7	36.9	39.0	39.7	5.0	4
	C	32.3	35.9	39.7	42.4	10.1	4
	D	38.2	37.4	37.6	37.0	1.3	1
	误差列	37.6	37.6	37.5	37.6	0.6	
整体	A	28.4	40.3	48.8	60.1	31.8	4
	B	40.4	43.5	46.5	47.4	6.9	4
	C	37.6	42.4	47.3	50.4	12.8	4
	D	45.0	44.2	44.6	43.9	1.1	1
	误差列	44.5	44.5	44.4	44.4	0.7	
树叶	A	5.4	6.4	6.8	8.4	3.0	1
	B	6.0	6.5	7.0	7.5	1.5	1
	C	5.9	6.5	7.2	7.4	1.5	1
	D	6.9	6.8	7.0	6.2	0.8	4
	误差列	6.7	6.8	6.6	6.7	0.5	
温度标 准差 枝干	A	5.6	9.3	9.1	12.0	6.4	1
	B	7.9	8.6	9.5	10.0	2.0	1
	C	6.4	8.5	10.0	11.0	4.6	1
	D	9.7	9.2	9.0	8.0	1.7	4
	误差列	9.0	8.9	9.0	9.0	0.4	
整体	A	5.9	8.8	10.3	13.1	7.2	1
	B	8.3	9.1	10.1	10.6	2.3	1
	C	7.5	9.1	10.4	11.1	3.6	1
	D	9.9	9.6	9.6	9.0	0.9	4
	误差列	9.5	9.6	9.5	9.5	0.3	

平均值类指标,各因素的最优水平一致,因素 A、B、C 的最优水平为 4,因素 D 的最优水平为 1。对于温度标准差类指标,各因素的最优水平也一致,且与温

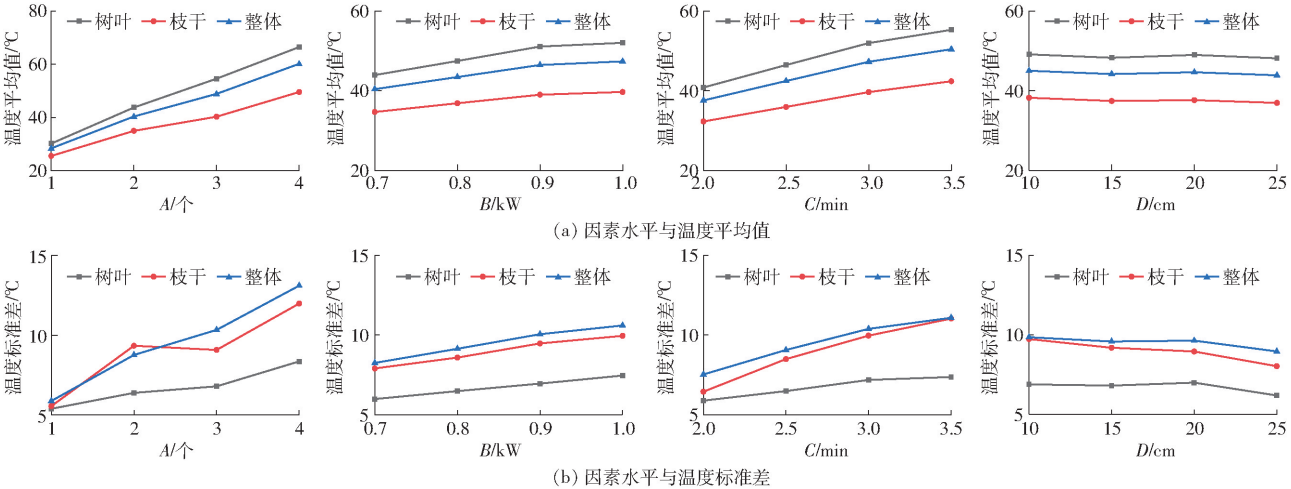


图 9 因素水平与各指标均值、标准差的关系

Fig. 9 Diagrams of relationship between factor level and mean value, standard deviation of each index

度平均值类指标均不同,因素 A、B、C 的最优水平为 1,因素 D 的最优水平为 4。

由图 9 可知,从温度平均值类指标来看,因素 A 可以明显提高树叶、枝干、整体的温度平均值。因素 B 以及因素 C 对树叶、枝干、整体的温度平均值的提高具有一定的促进作用,且因素 C 的促进作用比因素 B 明显。因素 D 对树叶、枝干、整体的温度平均值的提高无明显作用。从温度标准差类指标来看,因素 A 对整体温度标准差的影响随着 A 的增加而逐渐增大,当因素 A 水平为 3 时,枝干温度标准差与水平 2、4 相比有所降低,树叶温度标准差随着 A 的增加变化较缓慢。因素 B 水平变化时树叶、枝干、整体的温度标准差无明显改变,因素 C 对枝干、整体的温度标准差的影响随着 C 的增加也逐步加大,但对树叶温度标准差无明显作用。随着因素 D 的加大,树叶、枝干以及整体的温度标准差在一定程度上有所降低。

2.2.3 正交试验方差分析

直观分析虽然能够将各因素对评价指标的影响按照极差大小进行排序,但是各因素对指标的影响是否显著却不清楚。对于评价指标有显著影响的因素应进行严格控制,而对于评价指标影响不显著的因素则不用考虑。选取显著性水平 $\alpha \leq 0.05$,对试验结果进行方差分析,分析结果如表 11 所示,其中贡献率为因素平方和与总平方和的比值,贡献率越大则该因素对评价指标的影响越大。

从表 11 可知,因素 A、B 以及 C 对温度平均值都是显著影响因素。因素 A、C 对温度平均值类指标的贡献率最高,对树叶温度平均值的贡献率分别为 78%、14%,对于枝干温度平均值的贡献率分别为 77%、15%,对于整体温度平均值的贡献率分别为 78%、14%。而因素 D 对温度平均值影响不显

表 11 方差分析结果
Tab. 11 Variance analysis results

指标	变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	贡献率/%
温度平均值	<i>A</i>	11 721. 15	3	3 907. 05	397. 44	<0. 01	78
	<i>B</i>	668. 42	3	222. 81	22. 67	<0. 01	4
	<i>C</i>	2 056. 46	3	685. 49	69. 73	<0. 01	14
	<i>D</i>	17. 34	3	5. 78	0. 59	0. 63	0
	误差	501. 35	51	9. 83			3
	合计	14 964. 72	63				
	<i>A</i>	5 048. 64	3	1 682. 88	340. 40	<0. 01	77
	<i>B</i>	252. 84	3	84. 28	17. 05	<0. 01	4
	<i>C</i>	946. 47	3	315. 49	63. 82	<0. 01	15
	<i>D</i>	15. 45	3	5. 15	1. 04	0. 38	0
	误差	252. 13	51	4. 94			4
	合计	6 515. 53	63				
	<i>A</i>	8 812. 06	3	2 937. 35	386. 11	<0. 01	78
	<i>B</i>	484. 90	3	161. 63	21. 25	<0. 01	4
	<i>C</i>	1 578. 57	3	526. 19	69. 17	<0. 01	14
	<i>D</i>	15. 18	3	5. 06	0. 67	0. 58	0
	误差	387. 99	51	7. 61			3
	合计	11 278. 70	63				
温度标准差	<i>A</i>	130. 89	3	43. 63	73. 43	<0. 01	56
	<i>B</i>	26. 13	3	8. 71	14. 66	<0. 01	11
	<i>C</i>	43. 40	3	14. 47	24. 35	<0. 01	18
	<i>D</i>	4. 77	3	1. 59	2. 67	0. 06	2
	误差	30. 30	51	0. 59			13
	合计	235. 49	63				
	<i>A</i>	448. 44	3	149. 48	176. 49	<0. 01	58
	<i>B</i>	45. 50	3	15. 17	17. 91	<0. 01	6
	<i>C</i>	201. 82	3	67. 27	79. 43	<0. 01	26
	<i>D</i>	33. 52	3	11. 17	13. 19	<0. 01	4
	误差	43. 20	51	0. 85			6
	合计	772. 48	63				
	<i>A</i>	506. 47	3	168. 82	302. 43	<0. 01	68
	<i>B</i>	56. 75	3	18. 92	33. 89	<0. 01	8
	<i>C</i>	144. 31	3	48. 10	86. 17	<0. 01	19
	<i>D</i>	7. 69	3	2. 56	4. 59	0. 01	1
	误差	28. 47	51	0. 56			4
	合计	743. 69	63				

著。因素*A*、*B*、*C*对温度标准差类指标均有极显著影响。因素*A*对温度标准差指标的贡献率最高,对树叶、枝干、整体温度标准差的贡献率分别为56%、58%、68%。因素*C*对树叶、枝干、整体温度标准差的贡献率分别为18%、26%、19%。因素*B*对树叶、枝干、整体温度标准差的贡献率为11%、6%、8%。因素*D*对枝干、整体温度标准差有极显著影响,但对树叶温度标准差没有显著影响。表11还表明,对于各评价指标,因素*A*的贡献率是最大的,因素*C*次之,说明远红外灯管组数量对评价指标的影响能力最大,其次是加热时间。因素*D*仅对枝干和整体温度标准差指标有显著影响。

2. 2. 4 同一因素不同水平差异显著性检验

采用邓肯式新复极差检验法(Shortest significant ranges, SSR)对同一因素不同水平均值间的差异进行显著性检验,检验结果如表12所示。

由表12可知,对于树叶温度平均值,因素*A*、*C*的4个水平均达到极显著差异,因素*B*的第3水平和第4水平均与第1、2水平达到极显著差异。对于枝干温度平均值,因素*A*、*C*的4个水平均达到极显著差异,因素*B*的第3水平和第4水平均与第1、2水平达到极显著差异,因素*D*的第1水平与第4水平达到极显著差异。对于整体温度平均值,因素*A*、*C*的4个水平均达到极显著差异,因素*B*的第3水

表 12 同一因素各水平间差异显著性 SSR 检验

Tab. 12 Significant SSR test for differences between levels of the same factor

指标	温度平均值			温度标准差		
	树叶	枝干	整体	树叶	枝干	整体
A	水平 1	a	a	a	a	a
	水平 2	b	b	b	b	b
	水平 3	c	c	b	b	c
	水平 4	d	d	c	c	d
B	水平 1	a	a	a	a	a
	水平 2	b	b	ab	b	b
	水平 3	c	c	bc	c	c
	水平 4	c	c	c	c	d
C	水平 1	a	a	a	a	a
	水平 2	b	b	a	b	b
	水平 3	c	c	b	c	c
	水平 4	d	d	b	d	d
D	水平 1	a	b	ab	c	b
	水平 2	a	ab	ab	bc	b
	水平 3	a	ab	b	b	b
	水平 4	a	a	a	a	a

平和第 4 水平均与第 1、2 水平达到极显著差异,因素 *D* 的第 1 个水平与第 4 个水平达到极显著差异。对于树叶温度标准差,因素 *A* 的第 2 水平和第 3 水平均与第 1、4 水平达到极显著差异,因素 *B* 的第 1 水平和第 4 水平达到极显著差异,因素 *C* 的第 3 水平和第 4 水平均与第 1 水平和第 2 水平达到极显著差异,因素 *D* 的第 3 个水平与第 4 个水平达到极显著差异。对于枝干温度标准差,因素 *A* 的第 2 水平和第 3 水平均与第 1、4 水平达到极显著差异,因素 *B* 的第 3 水平和第 4 水平均与第 1、2 水平达到极显著差异,因素 *C* 的 4 个水平均达到极显著差异,因素 *D* 的第 1、3、4 水平达到显著差异。对于整体温度标准差,因素 *A*、*B*、*C* 的 4 个水平均达到极显著差异,因素 *D* 的第 1、2、3 水平与第 4 水平达到极显著差异。除此之外,其他因素不同水平平均值间的差异均不显著。同一因素不同水平差异显著性检验,为确定多指标正交试验的最优水平提供了帮助。

2.2.5 正交试验结果验证

对于多指标正交试验,不同的评价指标受不同因素以及因素水平的影响也存在一定的差异,若仅注重优化某一评价指标,则其他评价指标对应的结果可能较差,因此,应综合考虑各评价指标的试验效果,综合选择各参数的最优水平。在采用直观分析、方差分析、SSR 检验的基础上利用综合平衡法确定最优参数水平组合。

评价指标不同,各因素的最优水平存在差异,根据表 11 和表 12 的方差分析、贡献率以及同一因素

各水平间差异显著性 SSR 检验可知,在确定最优参数水平时,优先考虑整体温度平均值,然后考虑树叶温度平均值、整体温度标准差,再考虑枝干温度平均值、枝干温度标准差,最后考虑树叶温度标准差。

对于整体温度平均值,各显著性影响因素贡献率由大到小依次为:*A*、*C*、*B*,首先分析因素 *A*、*C*,考虑病菌、树叶的耐热性,剔除温度在 40℃ 以下,60℃ 以上的搭配,整体温度平均值在 40℃ 以上,60℃ 以下,*A*、*C* 搭配按温度由高到低进行排列的结果为:*A*₄*C*₂、*A*₃*C*₄、*A*₃*C*₃、*A*₄*C*₁、*A*₃*C*₂、*A*₂*C*₄、*A*₂*C*₃、*A*₃*C*₁,*A*、*B* 搭配的排列顺序为:*A*₄*B*₂、*A*₄*B*₁、*A*₃*B*₄、*A*₃*B*₃、*A*₃*B*₂、*A*₃*B*₁、*A*₂*B*₄。在以上排列的基础上对树叶温度平均值试验结果进行排序,剔除温度在 40℃ 以下,60℃ 以上的搭配,*A*、*C* 搭配按温度由高到低进行排列顺序为:*A*₃*C*₃、*A*₄*C*₁、*A*₃*C*₂、*A*₂*C*₄、*A*₂*C*₃、*A*₃*C*₁,*A*、*B* 搭配的排列顺序为:*A*₄*B*₁、*A*₃*B*₄、*A*₃*B*₃、*A*₃*B*₂、*A*₃*B*₁、*A*₂*B*₄。在以上排列的基础上对整体温度标准差按照从小到大的顺序排列为:*A*₃*C*₁、*A*₂*C*₃、*A*₃*C*₂、*A*₂*C*₄、*A*₄*C*₁、*A*₃*C*₃。在以上排列的基础上对枝干温度平均值按照从高到低的顺序排列为:*A*₃*C*₃、*A*₄*C*₁。在以上排列的基础上对枝干温度标准差试验结果平均值按照从小到大的顺序排列为:*A*₄*C*₁、*A*₃*C*₃。

考虑整体以及树叶温度平均值指标时,在 40 ~ 60℃ 内,在因素 *A* 与因素 *C* 的搭配中,*A*₃*C*₃ 温度平均值最高,*A*₄*C*₁ 次之,*A*₃*C*₃ 比 *A*₄*C*₁ 高出 2℃ 左右;在因素 *A* 与因素 *B* 的搭配中,*A*₄*B*₁ 最高,*A*₃*B*₄ 次之,且二者之间相差也为 2℃。枝干温度平均值在 40 ~ 60℃ 内的搭配为 *A*₃*C*₃、*A*₄*C*₁。因素 *A* 的贡献率最大,然后是因素 *C* 和因素 *B*,综合考虑各指标试验结果、因素以及显著性交互作用搭配,对于 *A*、*B*、*C* 3 个因素考虑选取 *A*₃*B*₄*C*₃,对于因素 *D*,选择其在整体温度平均值指标下对应的最优水平 1,因此得到优化的参数组合为 *A*₃*B*₄*C*₃*D*₁。

按照优化后的参数组合进行试验,远红外灯管组数量为 3,单根远红外灯管功率为 1.0 kW,加热时间为 3 min,远红外灯与支架顶部距离为 10 cm,各测点温度以及各指标结果如表 13 所示。树叶温度平均值为 58.1℃,枝干温度平均值为 43.1℃,整体温度平均值为 52.3℃。

2.3 处理效果检测

根据以上试验结果,处理田间带病柑橘树,对处理前后柑橘树叶进行实时荧光定量聚合酶链反应 (Polymerase chain reaction, PCR) 检测^[34],以研究柑橘黄龙病远红外处理效果。

试验在华南农业大学柑橘黄龙病研究室的柑橘实验园进行,试验选取 4 棵柑橘树,分为两组,每组

表 13 优化参数组合下的温度分布

Tab. 13 Temperature distribution under optimal parameter combination

树叶		枝干	
测试点	温度/℃	测试点	温度/℃
a1	63.5	a33	61.3
a2	60.0	a34	45.8
a3	60.5	a35	39.8
a4	62.7	a36	45.9
a5	59.7	a37	54.7
a6	61.3	a38	56.3
a7	63.8	a39	41.9
a8	61.5	a40	33.2
a9	53.5	a41	43.7
a10	57.2	a42	38.3
a11	54.5	a43	56.6
a12	52.9	a44	38.4
a13	65.4	a45	36.0
a14	60.5	a46	40.2
a15	53.0	a47	50.8
a16	61.9	a48	57.1
a17	67.2	a49	30.4
a18	51.7	a50	27.4
a19	58.4	a51	31.0
a20	66.7	a52	33.9
a21	65.2		
a22	60.5		
a23	56.0		
a24	54.0		
a25	58.8		
a26	51.6		
a27	44.6		
a28	59.7		
a29	58.1		
a30	50.3		
a31	48.1		
a32	56.1		
平均值/℃	58.1		43.1
整体平均值/℃		52.3	
标准差/℃	5.5		10.1
整体标准差/℃		10.5	

2 棵, 一组作为对照组, 不进行处理, 另一组作为试验组, 进行远红外处理。根据本研究得出的最优参

表 14 样本实时荧光定量 PCR 检测结果

Tab. 14 Sample real-time fluorescent quantitative PCR detection results

类别	样本	T		病菌浓度(N)		浓度降低率/%
		处理前	处理后	处理前	处理后	
试验组	R-1	20.07	20.26	1.38×10^6	1.20×10^6	12.5
	R-2	19.60	20.81	1.89×10^6	8.26×10^5	56.3
对照组	R-CK-1	19.00	19.74	2.84×10^6	1.72×10^6	39.4
	R-CK-2	20.46	19.73	1.05×10^6	1.73×10^6	-64.5

注: T 为 4 片树叶检测结果的平均值; 处理后指 4 次热处理完 1 个月后的测量值。病菌浓度(N) 为每 ng 总 DNA 中黄龙病菌拷贝数^[20], 计算公式为: $N = 35.50 \times 10^8 \times 10^{(T-19.3)/-3.1692}$ 。

数进行设置,远红外灯管组数量为 3,单根远红外灯管功率为 1.0 kW,加热时间为 3.0 min,远红外灯与支架顶部距离为 10 cm。外界温度为 20℃,加热 3.0 min 后,树叶平均温度达到 58℃,关闭加热,自然降温 9 min 至 30℃时结束,试验装置如图 10 所示,该试验每 7 d 进行一次,连续进行 28 d。



图 10 远红外田间效果试验装置

Fig. 10 Far-infrared field test equipment diagram

1. 处理罩 2. 通道温度记录仪 3. 功率调节器

试验开始前,采集对照组(R-CK-1,R-CK-2)以及试验组(R-1,R-2)4 棵树症状明显的树叶样本,每棵树东西南北方各采集一片,然后提取叶中脉 DNA 进行实时荧光定量 PCR 检测。第 4 次试验结束 1 个月后,用同样方法采集对照组以及试验组的树叶样本进行检测。试验前后检测以及计算结果如表 14 所示。T 表示在 PCR 扩增过程中,扩增产物(荧光信号)到达阈值时(进入指数增长期)所经过的扩增循环次数,当 T 小于 30 时,则可认为样本感染了黄龙病。从表 14 可以看出,所选试验树均感染了黄龙病。根据检测结果计算处理前后试验组以及对照组的 T 平均值和病菌平均浓度(N)值。处理前试验组的 T 平均值为 19.84,N 平均值为 1.64×10^6 ,经过 4 次处理后,试验组 T 值增加,T 平均值为 20.54,N 平均值为 1.01×10^6 ,平均降低率为 34.4%。处理前对照组的 T 平均值为 19.73,N 平

均值为 1.95×10^6 , 处理后, 对照组 T 平均值仍为 19.74, N 平均值为 1.73×10^6 , 病菌平均浓度降低了 11%。因此, 可以认为远红外处理对于柑橘黄龙病防治具有一定效果。

3 讨论

通过试验得出柑橘黄龙病远红外处理的较佳参数为: 远红外灯管组数量为 3, 单根远红外灯管功率为 1.0 kW, 加热时间为 3 min, 远红外灯与支架顶部距离为 10 cm。在此条件下, 树叶温度平均值为 58.1℃, 枝干温度平均值为 43.1℃, 整体温度平均值为 52.3℃。

远红外灯管组数量为 4 时, 加热源更均匀, 温度场应该比灯管组数量为 3 更均匀, 但研究结果并非如此。因为当红外灯管组数量为 4 (偶数) 时, 每组灯管的对面是另一组红外灯, 而红外灯管组数量为 3 (奇数) 时, 每组灯管对面没有其他红外灯, 对面是镜面反射铝板, 因柑橘树枝叶比较稀疏, 透过柑橘树的红外辐射会被反射到柑橘树上, 枝干的温度会比较均匀一些。因此红外灯管组数量为 3 (奇数) 时, 柑橘树温度差小。

远红外热处理方法对柑橘黄龙病的防治具有一定效果, 在优化的参数下, 远红外方式处理后病菌浓度平均降低 34.4%。而热空气快速处理病菌浓度平均降低率为 66.2%^[23], 对比热空气快速处理方法, 热空气处理方式的处理效果更佳。热空气加热方式使处理罩内温度从 32℃ 上升到 48℃, 耗时约为 9 min, 热风机功率 20 kW, 能耗约为 3 kW·h; 但采用红外加热方式时, 只需加热 3 min, 树叶温度平均值可从 18℃ 上升为 58.1℃, 3 组灯管组 (6 根, 每根功率约为 1.0 kW) 能耗约为 0.3 kW·h, 仅为热空气加热能耗的 1/10 左右。热空气加热风机质量达

70 kg, 而 3 组灯管总质量约为 3 kg, 不及热风机质量的 1/20。因此远红外快速热处理方法具有加热快、质量轻、能耗低等优势, 处理成本将更低, 但病菌浓度去除率还有待提高。

利用远红外处理方式防治柑橘黄龙病, 对病树进行红外热处理所需要的最佳温度、处理时间、处理的次数、相邻两次处理的时间间隔等因素对柑橘黄龙病处理效果的影响, 以及如何提高处理效果, 还需进行进一步研究。另外, 远红外加热对柑橘树木的长势、挂果率、柑橘品质等的影响未知, 还有待进一步研究。

4 结论

(1) 提出采用远红外对柑橘黄龙病进行热处理, 研究了远红外灯管组数量、单根远红外灯管功率、加热时间、远红外灯与支架顶部距离对处理罩内温度场分布的影响, 并通过田间试验验证了柑橘黄龙病进行热处理方法的有效性。

(2) 远红外灯管组数量对树叶以及枝干温度场分布均影响显著。随着远红外灯管组数量的增加, 树叶以及枝干的平均温度均升高, 树叶温度高于枝干温度。

(3) 单根远红外灯管功率对树叶以及枝干温度场分布均影响显著。相同加热时间, 功率越高树叶平均温度上升幅度越大。

(4) 加热时间对树叶以及枝干的温度场分布均有显著影响。在 2 ~ 3.5 min 内, 加热时间每增加 0.5 min, 树叶温度平均值升高 6℃ 左右。在远红外灯正前方, 距离从 20 cm 增加到 40 cm 时, 树叶温度平均值下降幅度不随加热时间的变化而变化。

(5) 远红外灯与支架顶部距离对树叶的温度场分布影响显著。

参 考 文 献

- [1] WANG N, TRIVEDI P. Citrus Huanglongbing: a newly relevant disease presents unprecedented challenges [J]. *Phytopathology*, 2013, 103(7): 652 – 665.
- [2] FAN G, XIA Y, LIN X, et al. Evaluation of thermotherapy against Huanglongbing (citrus greening) in the greenhouse [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1): 111 – 119.
- [3] TRIVEDI P, HE Z, VAN NOSTRAND J D, et al. Huanglongbing alters the structure and functional diversity of microbial communities associated with citrus rhizosphere [J]. *The ISME Journal*, 2012, 6(2): 363.
- [4] 程春振, 曾继吾, 钟云, 等. 柑橘黄龙病研究进展[J]. *园艺学报*, 2013, 40(9): 1656 – 1668.
CHENG Chunzhen, ZENG Jiwu, ZHONG Yun, et al. Research progress on citrus Huanglongbing disease [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(9): 1656 – 1668. (in Chinese)
- [5] 马晓芳. 柑橘木虱转录组分析及与柑橘黄龙病病原菌互作的初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
MA Xiaofang. Transcriptome analysis of citrus psyllid and the study of its interaction with the Huanglongbing pathogen [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [6] 贾志成, 郑加强, 黄雅杰, 等. 柑橘黄龙病热处理防治技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 1 – 9.
JIA Zhicheng, ZHENG Jiaqiang, HUANG Yajie, et al. Review and prospect of thermotherapy for citrus Huanglongbing [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(23): 1 – 9. (in Chinese)
- [7] LEE J A, HALBERT S E, DAWSON W O, et al. Asymptomatic spread of Huanglongbing and implications for disease control [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(24): 7605 – 7610.

- [8] 陈凯男, 李充璧. 柑橘黄龙病研究概况[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(7): 1048–1050, 1069.
- [9] 梅慧兰, 邓小玲, 洪添胜, 等. 柑橘黄龙病高光谱早期鉴别及病情分级[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 140–147.
MEI Huilan, DENG Xiaoling, HONG Tiansheng, et al. Early detection and grading of citrus Huanglongbing using hyperspectral imaging technique [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9): 140–147. (in Chinese)
- [10] 莫元妹. 柑橘黄龙病的传播途径及鉴定方法[J]. 现代农业科学, 2009(5): 64–65.
MO Yuanmei. Citrus Huanglongbing disease transmission and the identification methods [J]. Modern Agricultural Sciences, 2009(5): 64–65. (in Chinese)
- [11] BOVE J M. Huanglongbing: a destructive, newly- emerging, century-old disease of citrus [J]. Journal of Plant Pathology, 2006, 88(1): 7–37.
- [12] AL-JUMAILI A, EHSANI R. Mobile batch heat treatment system for treating HLB- infected citrus trees [C] // 2015 ASABE Annual International Meeting, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015.
- [13] 林丽萍, 陈于隄, 朱丽琴, 等. 热处理对柑橘霉菌生活力和致病力的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 222–227.
LIN Liping, CHEN Yulong, ZHU Liqin, et al. The effect of heat treatment on the vitality and pathogenicity of citrus fungi [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(4): 222–227. (in Chinese)
- [14] DESVIGNES J C, BOYER, CORNAGGIA D, et al. Virus diseases of fruit trees [D]. Paris: Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, 1999
- [15] 林雄杰, 范国成, 胡茜青, 等. 湿度对田间自然热罩防治柑橘黄龙病的影响[J]. 福建农业学报, 2014, 29(5): 475–482.
LIN Xiongjie, FAN Guocheng, HU Hanqing, et al. The effect of humidity on citrus Huanglongbing thermotherapy in the field [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2014, 29(5): 475–482. (in Chinese)
- [16] DOUD M, ZHANG M Q, POWELL C A, et al. Thermotherapy and chemotherapy to control citrus HLB in the field [J/OL]. Journal of Citrus Pathology, 2014, 1(1). <https://escholarship.org/uc/item/7b95n7j4>.
- [17] 邓晓玲, 许美容, 关磊, 等. 一种利用热处理防治柑橘黄龙病的方法: 103404397 A [P]. 2013–11–27.
- [18] DENG X, GUAB L, D L M, et al. Heat treatment of Huanglongbing-affected citrus trees in field for reduction of “*Candidatus Liberibacter Asiaticus*” [C] // International Citrus Congress Proceedings, 2012.
- [19] 关磊, 梁美丹, 仇绮琪, 等. 利用热处理技术降低柑橘黄龙病菌的浓度 [C] // 中国植物病理学会 2012 年学术年会, 青岛, 2012.
- [20] 贾志成, EHSANI Reza, 郑加强, 等. 柑橘黄龙病蒸汽快速热处理升温特性及田间防治效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 219–225.
JIA Zhicheng, EHSANI Reza, ZHENG Jiaqiang, et al. Heating characteristics and field control effect of rapid citrus Huanglongbing steam heat treatment [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 219–225. (in Chinese)
- [21] 姚林建, 易龙, 李双花, 等. 不同温度组合热处理治疗柑橘黄龙病的田间效果分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49(7): 1346–1350.
YAO Linjian, YI Long, LI Shuanghua, et al. Efficacy of heat treatment in controlling citrus Huanglongbing by different temperatures combinations in field [J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(7): 1346–1350. (in Chinese)
- [22] GHATREHSAMANI S, ABDULRIDHA J, BALAFOUTIS A, et al. Development and evaluation of a mobile thermotherapy technology for in-field treatment of Huanglongbing (HLB) affected trees [J]. Biosystems Engineering, 2019, 182: 1–15.
- [23] ABDULRIDHA J, AMPATZIDIS Y, GHATREHSAMANI S, et al. Mobile thermotherapy system for treating HLB-infected citrus trees utilizing hot water and steam [C] // 2018 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018.
- [24] KELLEY A J, PELZ K S. Effect of thermotherapy on the acquisition of *Candidatus Liberibacter asiaticus* by the Asian citrus psyllid (Hemiptera: Liviidae) [J]. Florida Entomologist, 2019, 102(1): 107–112.
- [25] 范国成, 林雄杰, 王贤达, 等. 田间自然热罩治疗柑橘黄龙病的效果分析[J]. 果树学报, 2016, 33(9): 1139–1147.
FAN Guocheng, LIN Xiongjie, WANG Xianda, et al. A field study of the efficacy of PVC film cover in controlling Huanglongbing [J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(9): 1139–1147. (in Chinese)
- [26] BRIEN D O, DUAN Y. Prescription for curing citrus greening [J]. Agricultural Research, 2013: 4–6.
- [27] HOFFMAN M T, DOUD M S, WILLIAMS L, et al. Heat treatment eliminates ‘*Candidatus Liberibacter asiaticus*’ from infected citrus trees under controlled conditions [J]. Phytopathology, 2013, 103(1): 15–22.
- [28] 张建桃, 陈鸿, 文晟, 等. 柑橘黄龙病热空气快速处理温度场分布特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 267–277.
ZHANG Jiantao, CHEN Hong, WEN Sheng, et al. Experiment on temperature field distribution characteristics of citrus Huanglongbing hot air rapid treatment [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 267–277. (in Chinese)
- [29] 何晶. 远红外加热技术应用的初识 [C] // 第十三届全国红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要集, 2011.
- [30] 符凯, 刘智奎, 丁珠玉, 等. 远红外加热技术在桑葚菌核病防治上的研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(11): 83–86.
FU Kai, LIU Zhilei, DING Zhuyu, et al. Study on the prevention of mulberry sclerotinia rot with far-infrared heating technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(11): 83–86. (in Chinese)
- [31] 刘守文, 裴一飞, 孙来燕. 航天器真空热实验用红外灯光谱分布研究 [J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 254–258.
LIU Shouwen, PEI Yifei, SUN Laiyan. Research on spectral pattern of infrared lamp for thermal vacuum test of spacecraft [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 254–258. (in Chinese)
- [32] 牛成诚. 光刻机双驱动微动台温度场研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
NIU Chengcheng. Research on temperature field of lithography dual drive wafer stage [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [33] 胡长华. 概率与数理统计简明辅导 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1989.
- [34] 陈旭, 齐凤坤, 康立功, 等. 实时荧光定量 PCR 技术研究进展及其应用 [J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(8): 148–155.
CHEN Xu, QI Fengkun, KANG Ligong, et al. Advance and application of real-time fluorescent quantitative PCR [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(8): 148–155. (in Chinese)