

## 基于热红外成像技术的油菜菌核病早期检测研究

陈欣欣<sup>1,3,4</sup>, 刘子毅<sup>1,3,4</sup>, 吕美巧<sup>2\*</sup>, 张初<sup>1,3,4</sup>, 姚洁妮<sup>1,2</sup>, 何勇<sup>1,3,4\*</sup>

1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058
2. 金华职业技术学院, 浙江 金华 321017
3. 农业农村部光谱学重点实验室, 浙江 杭州 310058
4. 浙江大学现代光仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310058

**摘要** 将热红外成像技术和低空遥感技术相结合, 基于冠层和叶片两个尺度对菌核病侵染油菜的过程进行检测研究。从冠层尺度分析, 首先获取整株样本的温度值(平均温度与最大温差), 并采集其生理指数(气孔导度、CO<sub>2</sub>浓度、蒸腾速率及光合速率)。然后, 将染病样本与健康样本的温度值进行判别分析, 并对其进行单因素方差分析。从结果可知, 平均温度和最大温差值都可以对染病样本与健康样本进行区分, 且最大温差相较平均温度结果较明显。同时单因素方差分析也显示, 最大温差三次检测中均存在显著性差异。对获取的生理指数进行分析, 发现染病样本与健康样本之间可以通过生理指数进行明显区分。另外, 将生理指数与叶片温度进行相关性分析, 结果表明二氧化碳浓度与叶片温度之间的三次检测均存在显著性差异。基于叶片尺度, 首先从单一叶片来看健康区域和染病区域的温度差异, 可以明显区分出染病区域和健康区域的温度差异。然后, 提取健康区域与染病区域的温度值(最大温度、最小温度、平均温度以及最大温差)进行对比分析, 并对其进行单因素方差分析。结果表明, 以上四个温度指标均可以区分叶片的染病区域和健康区域。但根据单因素方差分析结果可知, 与冠层尺度相同, 最大温差三次检测中均存在显著性差异, 可以实现对油菜菌核病的早期识别。

**关键词** 热红外成像; 油菜菌核病; 气孔导度; Grab Cut 算法

**中图分类号:** O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0730-08

## 引言

油菜是我国的种植历史悠久, 且种植范围广泛, 主要分布于我国的西北、华北及长江流域各省(区)。同时在世界其他地方也广泛种植, 据统计当前油菜的种植面积占全世界作物总种植面积的20%以上, 成为多个国家的支柱型农作物。但是油菜在培育及生长时期极易受到多种病害侵染, 影响油菜植株生长, 最终影响油菜产量。其中, 以菌核病为代表的真菌性疾病在油菜的生长过程中侵染最频繁, 危害最显著, 并在以油菜培育到成熟的全生命周期里均有不同程度的侵害。在发病阶段病菌主要侵染油菜的叶片和茎秆, 会导致油菜叶片过早枯萎凋零, 无法结果、结果率低或结果质量不高等问题, 对油菜的出油量和品质产生极大影响。长江流域是我国油菜的主要产区之一, 每年因菌核病的侵染面临约为

5%~25%的产量损失, 直接经济损失达数亿元<sup>[1-3]</sup>。因此, 研究菌核病对油菜的侵染机理, 提早对其进行有效监测和防控, 一直以来都是学术界十分重视的课题。

当植物受到病害的侵染后, 染病植株的气孔开闭会发生变化, 对植株的呼吸作用造成影响, 从而使得叶片温度表面温度产生差异<sup>[4-6]</sup>。热红外成像技术正是利用染病样本和健康样本之间叶片温度差异来对其进行区别分析, 近年该技术已多次应用到农作物病害的检测中并取得了显著的效果。Oerke等<sup>[7]</sup>利用热红外成像技术从冠层层面对苹果的痂疾病进行监测, 结果表明在病害症状未显现前检测到叶片异常低温点, 比肉眼观测到早1~2 d。Lenthe等<sup>[8]</sup>将热红外成像仪搭载在无人机上, 从冠层叶片和单个叶片两个层面分别检测小麦受侵染的严重程度, 研究结果显示热红外成像仪可以很有效的检测出病害程度。李小龙等<sup>[9]</sup>将热红外成像技术运用到小麦条锈病的检测中, 研究结果显示, 该技术可以实现对

收稿日期: 2017-07-29, 修订日期: 2018-01-12

基金项目: 浙江省重大科技专项(2015C02007), 国家自然科学基金项目(31471417), 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFD0700304)资助

作者简介: 陈欣欣, 女, 1991年生, 浙江大学生物系统工程与食品科学学院硕士研究生 e-mail: xxchen1220@zju.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: 421795699@qq.com; yhe@zju.edu.cn

小麦条锈病从潜育期到发病期的识别。

本研究以健康油菜和染病油菜为研究对象,基于冠层尺度和叶片尺度,探索无人机模拟平台搭载热红外成像仪对不同侵染天数的油菜菌核病进行可行性分析,旨在发现一种可以应用于大面积早期病害检测的手段。

## 1 实验部分

### 1.1 样本制备

试验样本的培育在浙江大学紫金港校区试验田中进行。将油菜种撒在大田中,培育至约 10 cm 高,选取健壮,长势均匀的幼苗移栽至盆穴中单株培育,待单株油菜生长出 5~6 片以上较大叶片时,对其进行病菌接种。由于实验中不可控因素的存在,菌丝接种率无法达到 100%,故选取 120 株油菜植株叶片进行接种,最终根据接种情况来确定试验样本数量。将成功接种的油菜植株放入人工温室环境(温度 25 °C,湿度 85%)中静置 24 h,然后将其取出进行试验。

### 1.2 实验设备

#### 1.2.1 无人机低空遥感模拟平台

模拟低空遥感环境,将热红外成像仪搭载在无人机低空遥感模拟平台进行试验,其中无人机低空遥感模拟平台如图 1 所示。该平台由系统硬件和操控系统两部分组成。其中,系统硬件部分是由热红外成像仪、直线滑行导轨、驱动装置、三轴云台、电动缸组件组成。试验模拟的飞行长度为 12 m,即导轨长度;模拟飞行高度为 3.8 m。相机传感器搭载在三轴云台上,云台安装在导轨上,通过操控系统控制导轨前进、升降及云台角度转换。



图 1 无人机模拟平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of UVA simulation platform

#### 1.2.2 热红外成像仪

研究中使用的热红外成像仪(FLIR-T620, FLIR Systems, Inc, USA)如图 2(a)所示。具体参数如表 1 所示。

表 1 热红外成像仪设备参数表

Table 1 The parameters table of Thermal infrared imager equipment

参数名称	波长范围 / $\mu\text{m}$	热灵敏度 / $^{\circ}\text{C}$	温度测量 精度/ $^{\circ}\text{C}$	原始 分辨率
参数范围	7.8~14	<0.04@+30	$\pm 2$	640×480

#### 1.2.3 便携式光合测量仪

生理指数使用便携式光合测量仪(LI-6400, Li-COR, Inc, USA)采集,设备如图 2(b)所示。该设备通过检测植物的生理状况,将植物的各项生理指标( $\text{CO}_2$  浓度、气孔导度、光合速率等)进行采集,为分析各项生理活动提供数据保障。



图 2 热红外成像仪(a)和光合测量仪(b)结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of Thermal imaging system (a) and Photosynthesis instrument (b)

### 1.3 热红外图像采集

热红外图像的采集分三次完成,主要为接种前(健康植株),接种 24 h 后(病症未显现)以及接种 48 h 后(病症完全显现)三个阶段。采集时间为上午 9:00—12:00,在实验前调整实验室温度( $20 \pm 2$ ) °C 和湿度(50%~60%),为试验的进行提供相对稳定的温湿度环境。首先,采集未接种的健康样本数据,作为对照组。然后,从 120 株接种的样本中选取选取 90 株进行试验。试验从接种菌丝 24 h 后开始,此时油菜样本感染症状未完全显现,属于早期病害识别。此后,间隔 48 h 后油菜样本染病症状开始明显显现,再进行一次采集。

### 1.4 生理指数的测定

油菜样本生理指数的采集主要在下午 2:00—4:00 完成,在采集前将染病样本和健康样本搬到阳光充足的室外静置 0.5 h,采集时选择光线较明亮的区域,保证植株正常进行光合作用。为了保证数据的可靠性,对健康样本尽量选取植株上宽大的叶片进行采集,每次采集 2~3 片叶片,然后取平均值;对于染病样本,选取叶片的病斑位置进行测量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 图片处理及温度提取

#### 2.2.1 基于冠层尺度的数据处理

首先通过 FLIR-T620 软件获取原始热红外图片[如图 3

(a)]的温度值,接着对热红外图像进行预处理,采用 Grab Cut 算法<sup>[10-11]</sup>剔除样本周围的环境背景,得到只有样本植株的热红外图像,如图 3(b),然后将去处背景的热红外图片进行二值化处理,得到如图 3(c)所示的二值图;最后根据温度值和灰度值之间存在得线性关系,得到冠层尺度样本的实际

温度值,计算出样本的平均温度和最大温差值。对整株油菜进行温度提取时,由于受到叶片经脉等因素的影响使得最大温度和最小温度的误差较大,故只采用了平均温度和最大温差值<sup>[12-14]</sup>。

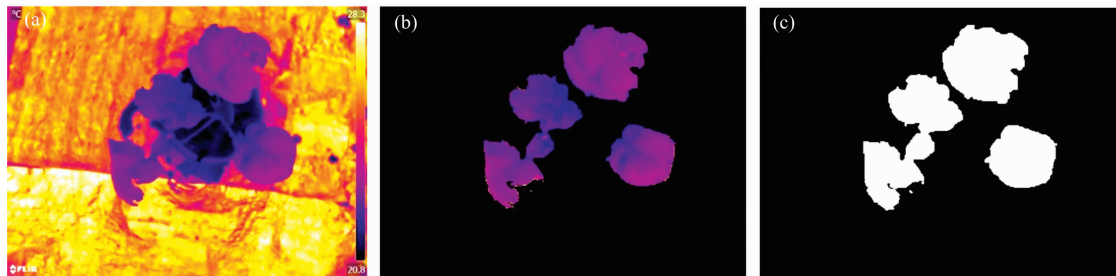


图 3 热红外图像的处理过程

(a): 原始热红外图像; (b): 剔除背景热红外图像; (c): 二值化处理后的图像

Fig. 3 The processing of Thermal infrared image

(a): Original thermal infrared; (b): Thermal infrared image after removing the background; (c): Image after binarization processing

2.2.2 基于叶片尺度的数据处理

基于叶片尺度对病斑区域温度值进行提取,是利用热红外成像仪自带软件 FLIR Tools 进行。通过对样本病斑区域和健康区域进行框选,可以获得该区域的最大温度值、最小温度值和平均温度值。

2.2 基于冠层温度值的健康油菜与染病油菜分析研究

2.2.1 菌核病侵染对油菜冠层的影响

菌核病对油菜植株的侵染较快,为了保证完整的检测到菌核病对油菜侵染的全过程,在菌丝接种 24 h 后开始采集油菜样本的热红外图片。对图像进行对比分析,结果如图 4

所示。在接种菌丝 24 h 后,就有高于健康区域的病斑点出现在油菜叶片上。经过温度的分析比对,接种一天(24 h)后病斑处的温度比健康区域温度高 0.5 °C,而且随着病菌的侵染天数变化,两者之间的温差逐渐扩大。接种 3 d 后,温差值显示为 0.8 °C,第 5 天后,病斑区域面积扩大,从可见光图片可以看出病斑点完全失水干枯,该区域与健康区域的温差值达到了 1.9 °C。由以上推测,菌核病对油菜叶片的侵染使得细胞坏死,无法进行生理活动,也就无法调动呼吸作用和蒸腾作用来调节植株温度的平衡,从而使得染病部位中的温度逐渐升高直至与环境温度趋同。

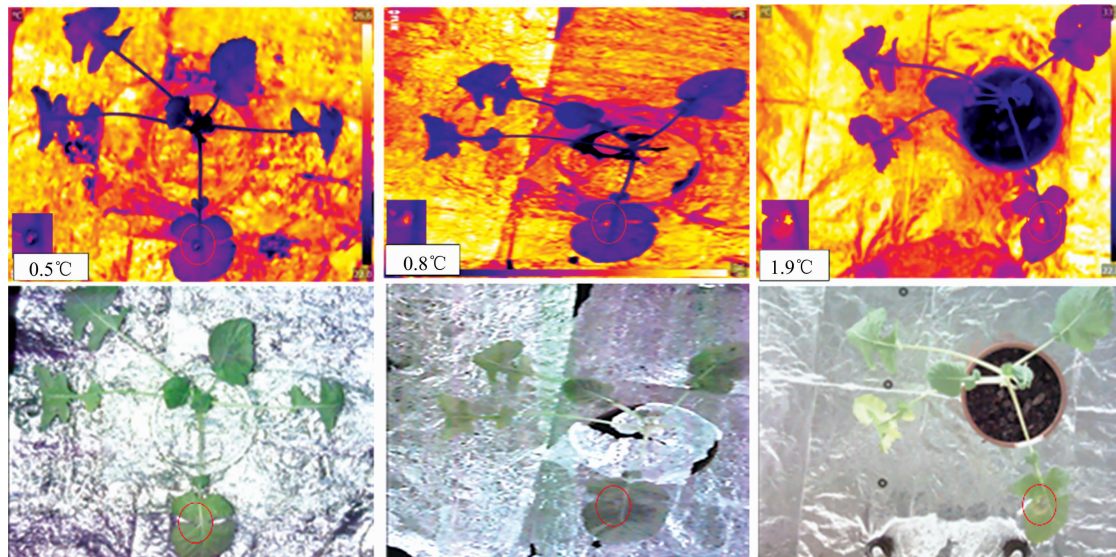


图 4 不同天数油菜冠层的热红外图像和 RGB 图像

Fig. 4 Thermal infrared image and RGB image of rape canopy with different number of days

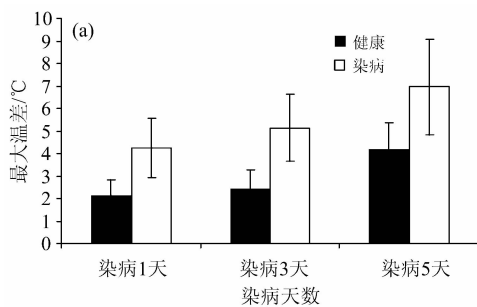
2.2.2 油菜菌核病侵染对油菜冠层温度的影响

基于冠层尺度,对染病样本和健康样本的平均温度和最大温差值进行对比分析,结果如图 5 所示。首先来看平均温

度,从图中可以看出健康样本和染病样本平均温度值有差异,且随着染病天数的增加,差值在逐渐变大,三次差值分别为 0.59, 0.97 及 1.46 °C。然后,从最大温差值分析,健康

样本和染病样本的差值在染病 24 h 后就表现得较为明显,而且随着病菌侵染的加重,差值较大的趋势依旧保持,分别为 2.11, 2.73 及 2.79 °C。

对样本进一步采用单因素方差分析,以验证不同样本之间的差异。从结果可知,染病样本和健康样本的平均温度在病菌侵染第 1 天后和第 3 天后无显著性差异,只在病菌侵染第 5 天出现;染病样本和健康样本在病菌侵染第 1 天即表现出显著性差异。故对比可知,通过分析最大温差值可以在病菌侵染早期实现染病样本和健康样本的区分,是研究油菜菌核病很好地指标。



### 2.2.3 油菜菌核病侵染对油菜生理指数的影响

从植物生长原理来分析,病菌对植株的侵染会使得细胞气孔的开闭失调,进而导致植物的蒸腾作用、呼吸作用、光合作用等生理状态减缓和加快,使叶片的温度调节能力降低,致使温度不可避免的升高或降低<sup>[15]</sup>。病菌侵染对植株的气孔开闭、蒸腾作用、呼吸作用及光合作用造成的影响,主要通过气孔导度、光合速率、二氧化碳浓度以及蒸腾速率来表征。

#### (1) 油菜生理指数与染病天数之间的关系

对以上四个指数进行分析,来判断染病样本和健康样本的生理状态差异,结果如图 6 所示。

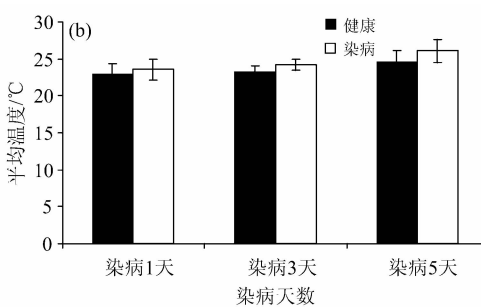


图 5 染病后连续 3 d 油菜冠层的温度分析

(a): 平均温度; (b): 最大温差

\* 表示染病样本的平均温度和最大温差与健康样本之间在 0.05 水平上显著相关;

\*\* 表示染病样本的平均温度和最大温差与健康样本在 0.01 水平上显著相关

Fig. 5 Temperature analysis of rape canopy for 3 consecutive days after infection

(a): Average temperature; (b): Maximum temperature difference

\* : It means temperature and maximum temperature different of infected samples were significantly correlated with healthy samples at the level of 0.05; \*\* : It means temperature and maximum temperature different of infected samples were significantly correlated with healthy samples at the level of 0.01

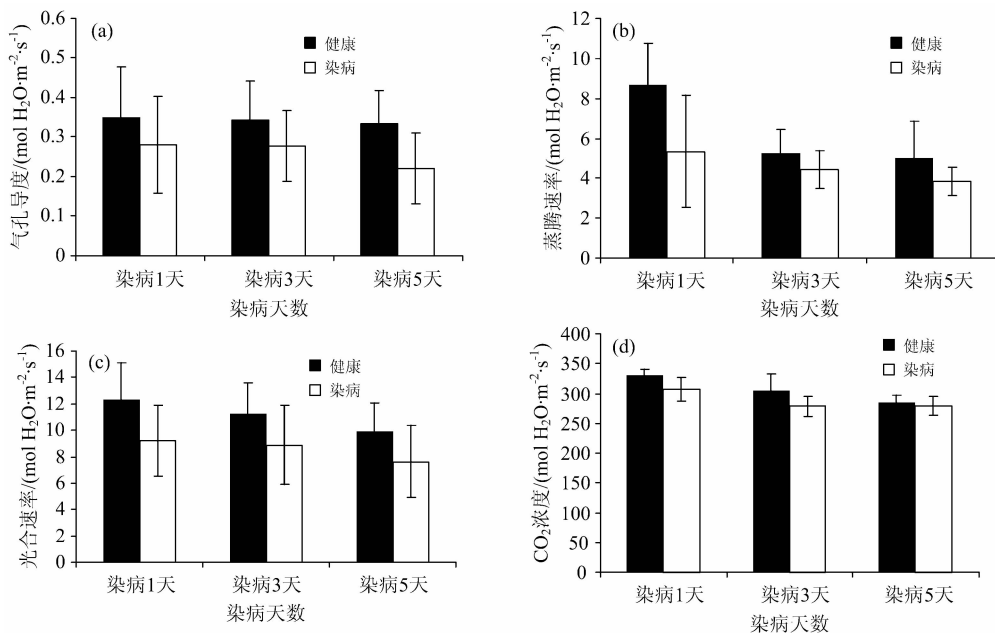


图 6 生理指数与染病天数之间的关系

(a): 气孔导度; (b): 光合速率; (c): 二氧化碳浓度; (d): 蒸腾速率

Fig. 6 The relationship between the physiological index and inoculated days

(a): Stomatal conductance; (b): Photosynthetic rate; (c): Concentrations of carbon dioxide; (d): Transpiration rate

从结果可知,从病菌侵染第 1 天到第 5 天,染病样本的四个生理指数(气孔导度、光合速率、CO<sub>2</sub> 浓度以及蒸腾速率)明显低于健康样本,这表明病菌侵染油菜样本使其生理活动减弱,导致生理指数相较于健康样本下降。其中,从染病植株的气孔导度来看,随着染病天数的变化,气孔导度值呈现递减的趋势。分析光合速率可知,随天数变化健康样本的光合速率变化较稳定,染病植株的光合速率呈递减的趋势。从二氧化碳浓度的分析结果可知,染病样本和健康样本的该指数在不同天数并未发生明显变化,由此推测病菌侵染对呼吸作用的影响不明显。从蒸腾速率分析可知,染病样本和健康样本之间存在较大差异。

### (2) 油菜生理指数与温度之间的相关性研究

由以上结果得到结论,健康样本和染病样本可以通过生理指数进行有效区分。这说明病菌的侵染对植株的生理活动有影响,也从侧面表现了生理指数与叶片的温度存在着一定的相关性,故将生理指数与样本温度建立线性相关性分析,得到结果如表 2 所示。

从结果可知,二氧化碳浓度与温度值之间在三次测量中均存在显著性差异,气孔导度与温度值之间不存在显著性差异。此外,除第 3 天外,光合速率与温度之间在其他两天均存在显著性差异。蒸腾作用与光合速率类型,与温度值之间显著性差异在后两次试验中显现。由结果分析其中原因可知,蒸腾作用和呼吸作用的改变会直接影响叶片温度,而两者的改变主要通过气孔导度的开闭来调节,所以气孔导度间接影响叶片的温度值。光合作用主要通过蒸腾作用传输营养物质,不直接对叶片温度值起作用。综上分析,光合速率、

二氧化碳浓度与蒸腾速率与样本的温度值存在相关性,对于油菜菌核病的侵染具有重要的研究意义。

表 2 油菜的生理指数与温度之间的相关性分析

Table 2 The correlation analysis between temperature and physical index

生理指数	气孔导度	光合速率	二氧化碳浓度	蒸腾速率
染病 1 天	0.184	0.623**	0.662**	0.338
染病 3 天	0.269	0.343	-0.451*	-0.393*
染病 5 天	0.345	0.590**	0.533**	-0.549**

注: \* 表示生理指数与温度之间在 0.05 水平上有相关性, \*\* 表示生理指数与温度之间在 0.01 水平上有相关性

## 2.3 基于叶片温度值的健康与染病油菜分析研究

### 2.3.1 菌核病侵染对油菜叶片的影响

从图 7 的热红外图片及可见光图片对比分析看出,随着叶片病斑状态的不断变化,可以清晰的看出随着天数的增加,菌核病对油菜叶片侵染过程。从健康叶片热红外图像来看,除叶片的经脉外,在叶片上并未出现明显的温度差异点。但菌丝接种 24 h 后,从热图中可以清晰的观察到小面积的病斑点显现。随着侵染天数的变化,热红外图像中呈现出的病斑面积逐渐变大,到第 5 天后,病斑已经导致整个叶片枯黄、失水。从 RGB 图像中来看,染病 24 h 后,肉眼无法清晰直观的识别出病斑点,直到第 3 天才达到肉眼清晰可见。所以,对油菜样本病症的观测,热红外图像在油菜菌核病病症识别上明显早于 RGB 图像。

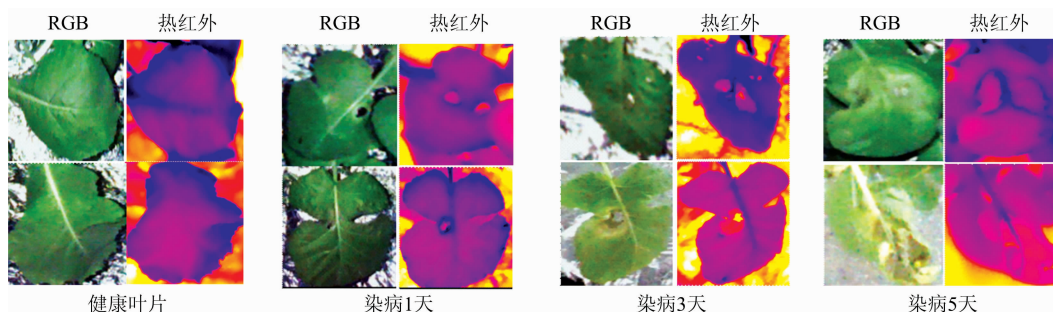


图 7 油菜叶片不同天数的 RGB 图像及热红外图像

Fig. 7 RGB image and thermal infrared images of rape leaf with different number of days

为了更直观的展现菌核病侵染对叶片温度值的影响,对单一叶片进行划线分析,将划线处的像素点换算成温度值进行对比分析,分析结果如图 8 所示。根据温度曲线的变化可以看出,单一叶片的病斑区与健康区确实存在温度差异。此外,曲线的峰值区域集中在像素点为 25~35 区域,此处为恰好为叶片上病斑的位置。比较三个曲线可以看出,染病 1 天和染病 3 天时像素点 25~35 区域曲线的凸起较明显,而在染病第 5 天,曲线的走势区域平缓。分析原因可知,染病第 5 天时叶片的干枯面积逐渐变大,温度差异降低,故曲线的突起变得相对较平缓。

### 2.3.2 油菜菌核病侵染对油菜叶片温度的影响

基于叶片提取温度时避开了叶片上的经脉,保证了叶片

最大温度值与最小温度值的可靠性。所以,基于叶片尺度提取四项温度值(最大温度、最小温度、平均温度及最大温差)来分析菌核病对油菜温度的影响,结果如图 9 所示。结果表明,病斑区域的四项温度值均高于健康区域。其中,最大温度值的三次对比结果表明,病斑区域和健康区域温度差值分别为 1.68, 0.47 及 1.0 °C。最小温度值的三次对比结果表明,病斑区域和健康区域的温度差值分别为 1.43, 0.715 及 0.93 °C,三次差值分别呈现递减的趋势。从最大温差值的三次对比结果来看,温度差值分别为 0.27, 0.52 及 0.73 °C,且差值呈递增的趋势。此外,从平均温度的三次对比结果来看,温度差异分别为 1.79, 0.175 及 0.41 °C,且差值逐渐变小。分析以上 4 个温度指数可知,三次对比得到的差异指数

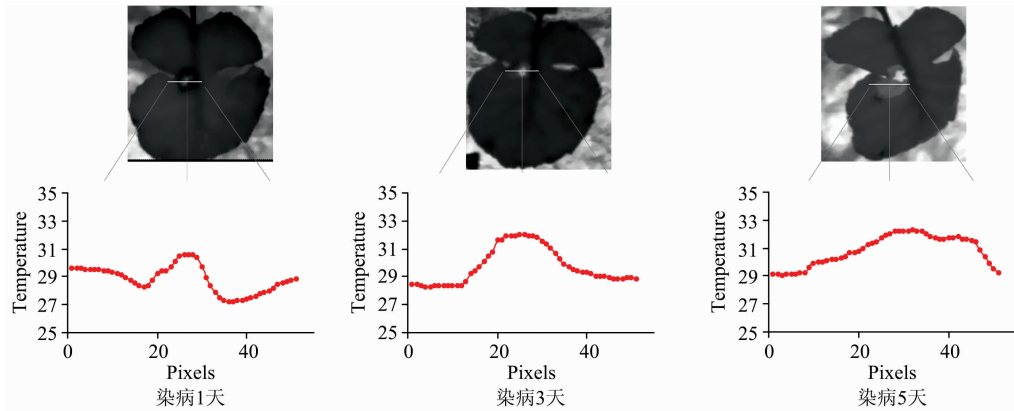


图 8 健康和染病区域的温度变化曲线

Fig. 8 The temperature curve of health and disease area

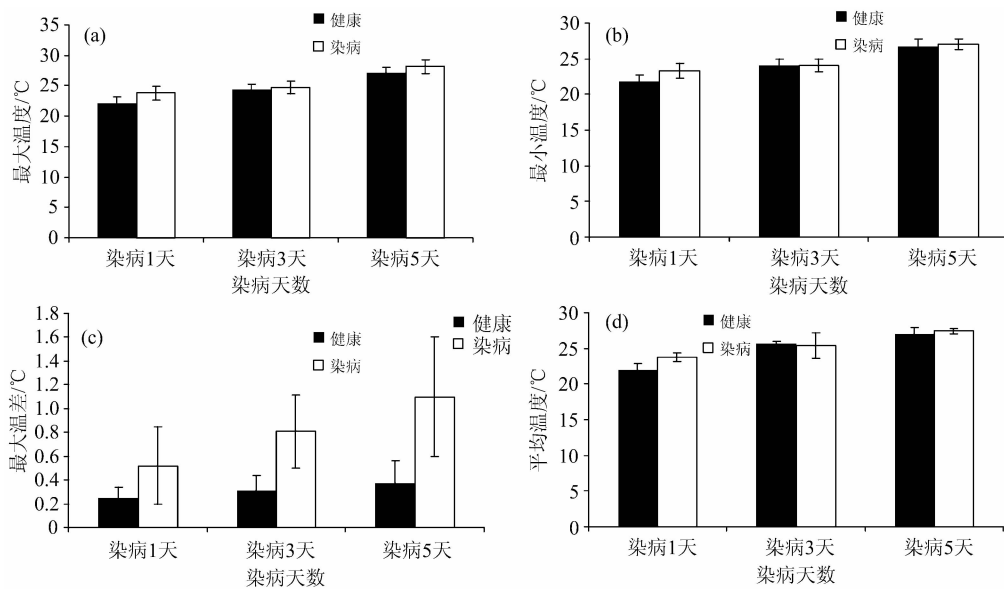


图 9 染病后连续 3 d 油菜植株叶片的温度分析

(a): 最大温度值; (b): 最小温度; (c): 最大温差; (d): 平均温度

Fig. 9 Temperature analysis of rape leaf for 3 consecutive days after infection

(a): Maximum temperature; (b): Minimum temperature; (c): Maximum temperature different; (d): Average temperature

均呈现递减的趋势,分析原因可知随着病菌侵染天数的增加,叶片的病斑面积逐渐变大,导致整个叶片温度升高;健康区域面积变小,也意味着最小温度值所占的区域减小,最终温度值逐渐趋于平稳。

同样对样本采用单因素方差分析,结果如图 9 所示。从分析结果可知,最大温差值依然是显著性差异表现最明显的指数,而最小温度值与染病天数不存在显著性差异。平均温度和最大温度在第 3 天开始呈现显著性差异。与基于冠层尺度的分析结果相似,最大温差值可以对早期的病菌侵染进行识别。此外,可以将平均温度值、最大温度值作为对油菜菌核病识别的辅助性指标。但是最小温度值与染病天数不存在显著性差异,无法作为单一指标对油菜菌核病的侵染进行分析。

### 3 结 论

利用热红外成像技术和模拟低空遥感技术对油菜菌核病进行识别检测,从热红外图像、温度、生理指数等不同维度判别染病样本和健康样本,结果表明:

(1)首先,通过将热红外相机搭载在无人机低空遥感模拟平台上获取整株样本的热红外图像,通过对图像预处理,基于冠层尺度和叶片尺度分别提取热红外图像的温度值。

(2)基于植株冠层尺度,通过对图像、温度及生理指数进行分析,可以实现油菜菌核病的识别检测。对 RGB 图像和热红外图像进行分析对比,结果表明从热红外图像分析出病斑点与周围健康区域的温度差异,而 RGB 图像中肉眼无法看到明显差异。同时对叶片的温度进行分析,最大温差值在

研究油菜菌核病的侵染中具有更好的效果。最后,将生理指数与染病天数进行分析,结果表明,染病样本和健康样本可以通过生理指数进行区分,同时对生理指数与叶片温度进行相关性分析,结果显示叶片温度与光合速率、二氧化碳浓度与蒸腾速率之间存在显著相关性。

(3)基于叶片尺度,通过对图像、温度及同一叶片的像素点进行分析,可以实现油菜菌核病的识别检测。通过 RGB 和热红外图像分析,结果表明热红外图像可以更早、更直

观、更清晰地识别出样本的病斑。同时,对病斑区域和健康区域进行温度(最大温度值、最小温度值、最大温差以及平均温度值)提取,并对比温度差异和单因素方差分析。结果表明,最大温差在染病样本与健康样本之间的判别效果最好,在染病初期即可实现对病斑区域和染病区域的区分。最后,对单一叶片的健康区域和染病区域进行温度分析,结果表明,同一叶片上病斑区域与健康区域存在较明显的温度差异。

## References

- [ 1 ] Weng Haiyong, Lü Jingwen, Cen Haiyan, et al. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2018, 275: 50.
- [ 2 ] Wang Y, Hou Y P, Chen C J, et al. *Australasian Plant Pathology*, 2014, 43: 307.
- [ 3 ] Zhang Chu, Jiang Hao, Liu Fei, et al. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(1): 213.
- [ 4 ] Zhu Fengle, Zhang Derong, He Yong, et al. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(10): 2931.
- [ 5 ] Zhuang J J, Luo S M, Hou C J, et al. *Computers and Electronic in Agriculture*, 2018, 152: 64.
- [ 6 ] CHEN Peng-fei(陈鹏飞). *Journal of Zhejiang University · Agric. & Life Sci. (浙江大学学报·农业与生命科学版)*, 2018, 44(4): 399.
- [ 7 ] Oerke E C, Frohling P, Steiner U. *Precision Agriculture*, 2011, 12(5): 699.
- [ 8 ] Lenthe J H, Oerke E C, Dehne H W. *Precision Agriculture*, 2007, 8: 15.
- [ 9 ] LI Xiao-long, WANG Ku, MA Zhan-hong(李小龙, 王 库, 马占鸿). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2014, 30(18): 183.
- [10] Tang Y, Hou C J, Luo S M, et al. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 148: 1.
- [11] Rother C, Kolmogorov V, Blake A. *ACM Transaction on Graphics*, 2004, 23(3): 309.
- [12] Calderón R, Navas-Cortés J A, Lucena C, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139: 231.
- [13] Grant O M, Chaves M M, Jones H G. *Physiologia Plantarum*, 2006, 127(3): 507.
- [14] Charle L, Pineda M, Remedios R A, et al. *Plant Cell Physiology*, 2006, 47(9): 1323.

## Diagnosis and Monitoring of Sclerotinia Stem Rot of Oilseed Rape Using Thermal Infrared Imaging

CHEN Xin-xin<sup>1,3,4</sup>, LIU Zi-yi<sup>1,3,4</sup>, LÜ Mei-qiao<sup>2\*</sup>, ZHANG Chu<sup>1,3,4</sup>, YAO Jie-ni<sup>1,2</sup>, HE Yong<sup>1,3,4\*</sup>

1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China
2. Jinhua Polytechnic, Jinhua 321017, China
3. Key Laboratory of Spectroscopy, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310058, China
4. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

**Abstract** The early identification of sclerotinia sclerotiorum rot of oilseed rape was observed from the canopy and leaf scale by using the thermal infrared imager based on the UAV simulation platform. The thermal infrared image data were obtained from the canopy scale, and the temperature values of the canopy scale were extracted, and the rape leaves were monitored for acquiring the physiological index. Then, the average temperature and the maximum temperature difference were used to compare the healthy and diseased samples and one-way ANOVA was also used. The results showed that the difference in the maximum temperature difference between healthy and diseased plants was obvious, and the difference in the average temperature between healthy and diseased plants was obvious with the number of days. The single factor analysis of variance showed that there was significant difference ( $p < 0.01$ ) between the maximum temperature difference at the first day after rape infection. Furthermore, the physiological indexes (stomatal conductance, photosynthetic rate, carbon dioxide concentration and transpiration rate) of rapeseed were analyzed with the number of days. The changes could be used to detect the correlation between physiological index and temperature Sexual analysis. The results showed that there was a significant correlation between photosynthetic rate, carbon dioxide concentration and transpiration rate and temperature. The temperature information of the healthy and diseased areas in the diseased leaves of the samples was obtained. The thermal infrared image could visually identify the disease infection process and use the pixel value to estimate temperature difference between the health and the affected area. The healthy and diseased

samples were identified by maximum temperature, minimum temperature, average temperature and maximum temperature difference. The results were compared with the single factor analysis of variance (ANOVA), showing that the maximum temperature, the minimum temperature, the maximum temperature difference and the average temperature in the healthy and infected areas were significantly different, and the lesion area temperature was higher than that of the healthy area. The single factor analysis of variance showed that there was significant difference ( $p < 0.01$ ) in the maximum temperature difference at the first day, and the early identification of sclerotinia sclerotiorum could be realized.

**Keywords** Thermal infrared imaging; Sclerotinia stem rot of oilseed rape; Stomatal conductance; Grab Cut algorithm

(Received Jul. 29, 2017; accepted Jan. 12, 2018)

\* Corresponding authors