

基于红外热成像的核桃冠层温度测量不确定性分析

孙 圣<sup>1</sup> 张劲松<sup>1,2</sup> 孟 平<sup>1,2</sup> 汪贵斌<sup>2</sup> 尹昌君<sup>1</sup> 王鑫梅<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

**摘要:** 为了探究和量化利用红外热成像系统进行核桃冠层温度测量过程中所产生的不确定性,利用 A310f 型红外热像仪在核桃园区对样本树冠层进行为期 20 d 的高频连续观测,对样本树进行了不同方向(东、西、南、北)和不同高度角(10°、30°、45°、60°、80°)的冠层温度测量。首先,对 5 个重要参数的敏感性进行分析,发现冠层温度受叶片辐射率( $\varepsilon_{leaf}$ )影响最大,受环境反射温度( $T_{refl}$ )影响次之,受空气温度( $T_a$ )和空气相对湿度( $R_H$ )影响较小,对距离( $D$ )变化不敏感。其次,对 3 棵样本树与 4 个方向的冠层温度进行双因素方差分析,结果表明,各方向之间达到了显著性水平( $P < 0.05$ ),进一步通过多重比较确定了南、北两个方向存在显著性差异( $P < 0.05$ ),其他各方向之间差异不显著。对不同高度角的分析表明,5 个高度角之间不存在显著的温度差异。然后,通过温度廓线法直接观察到冠层外部温度高于内部温度,同时,温度频数直方图反映出像素点呈现双峰分布特征,冠层像素点的峰值温度为 25.1℃。最后,对冠层内外温度进行方差分析,结果表明,两者之间存在极显著性差异( $P < 0.01$ )。

**关键词:** 核桃; 红外热成像; 冠层温度; 不确定性

**中图分类号:** S664.1; TN219      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0249-08

Uncertainty Analysis of Walnut Canopy Temperature Measurement Based on Thermal Infrared Imaging

SUN Sheng<sup>1</sup> ZHANG Jinsong<sup>1,2</sup> MENG Ping<sup>1,2</sup> WANG Guibin<sup>2</sup> YIN Changjun<sup>1</sup> WANG Xinmei<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2. Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** In order to explore and quantify the uncertainty caused by the thermal infrared imaging system for the measurement of walnut canopy temperature, the A310f thermal imager was used to perform a high-frequency and continuous observation of the canopy temperature of three sample trees for 20 days in the walnut plantation. During the period, the canopy temperature was measured in different directions (east, west, south and north) and at different angles (10°, 30°, 45°, 60° and 80°). First of all, the sensitivity analysis of five important parameters showed that the canopy temperature was most affected by leaf emissivity ( $\varepsilon_{leaf}$ ), followed by the ambient reflection temperature ( $T_{refl}$ ), and was less affected by air temperature ( $T_a$ ) and air relative humidity ( $R_H$ ). It was not sensitive to distance ( $D$ ) changes. Then, two-way analysis of variance was performed between the canopy temperature of three sample trees and four directions. The results showed that there was a significant level ( $P < 0.05$ ) between the directions, and the difference between the samples was not significant. Further, through multiple comparison methods, significant differences ( $P < 0.05$ ) were found between the south and the north directions, and the differences between the other directions were not significant. Analysis of the different angles showed that there was no significant temperature difference between the five angles. The external temperature of the canopy was higher than the internal temperature of the canopy that was directly observed by profile gradient method. The temperature frequency histogram reflected the bimodal distribution characteristic of the pixel points, and the peak temperature of the canopy pixel was 25.1℃. Finally, the analysis of variance was performed on the temperature from inside and outside of the canopy. The results showed that

收稿日期: 2019-03-11    修回日期: 2019-03-29

**基金项目:** 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFBB2017ZX002-1)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B05)

**作者简介:** 孙圣(1988—),男,博士生,主要从事森林生态学与农林复合研究,E-mail: sunsheng\_2011@126.com

**通信作者:** 张劲松(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事森林生态与林业气象、复合农林业研究,E-mail: zhangjs@caf.ac.cn

there was an extremely significant difference ( $P < 0.01$ ) between them, and the external temperature of the canopy reached the maximum value at 13:00. In summary, the uncertainty analysis of canopy temperature would provide a theoretical basis for reducing measurement error and improving measurement accuracy.

**Key words:** walnut; thermal infrared imaging; canopy temperature; uncertainty

0 引言

冠层温度作为表征植物生理生态过程及能量平衡的重要参数之一,直接影响叶片水分亏缺,以及植物碳、水和能量的交换<sup>[1]</sup>。准确测量植物冠层温度对植物水分关系和冠层能量平衡方面的研究具有重要意义<sup>[2]</sup>。早期,采用热电偶测量冠层温度,需要确保金属丝始终附着在叶片表面,并且需要获取大量测量数据以确保足够的代表性;热红外温度计的测量值是混合热信号生成的平均值,会受到非目标物的干扰以及出现空间分辨率不足的问题<sup>[3]</sup>。因此,上述方法准确、长期、连续测量冠层温度是不可行的。随着红外热成像技术的快速发展,在稳定性、像素分辨率和灵敏度上都能够满足整个生长季节冠层温度的连续监测需求<sup>[4]</sup>。此外,红外图像还具有可视化优点,可以将不同温度信息整合到一张图谱中,结合图像处理技术能够实现冠层温度的精准提取<sup>[5]</sup>。

近年来,热红外成像技术已经被广泛应用于植物气孔导度、植物水分亏缺和灌溉策略等农林业研究<sup>[6-8]</sup>中。农作物冠层的均一化和高密度性,使得垂直测量更为容易<sup>[9-10]</sup>;相反,林木的高度会给地面垂直测量增加难度<sup>[11]</sup>。因此,在非垂直观测中,方向和角度问题就成为影响测量的重要因素之一。随着无人机遥感平台的发展,无人机热成像观测虽然满足了空间尺度的要求,但是只能获取时间上不连续的数据,而且不考虑相机参数设定会导致拍摄产生较大的误差<sup>[12]</sup>。目前,有关测量误差的报道多集中在实验室条件下对黑体表面的研究<sup>[13]</sup>,而对于田间树木冠层温度测量中的不确定性研究相对较少。AUBRECHT等<sup>[14]</sup>在阔叶混交林冠层温度观测中,量化了A655sc型热像仪(FLIR,美国)的测量误差,并进行了不确定性分析。随后,KIM等<sup>[15]</sup>评估了A325型热像仪(FLIR,美国)测量针叶树冠层温度的精度,并提出了修正的经验模型。由于叶片相互遮挡以及冠层的不规则性,使得冠层温度分布存在差异<sup>[16-17]</sup>,测量过程中容易造成以点代面和以局部代整体,从而引起误差。

本文针对A310f型红外热像仪(FLIR,美国)的主要参数进行敏感性分析,并进一步探讨不同方向、不同角度以及冠层内外温度差异对热红外

测量核桃冠层温度带来的不确定性。最终提出减小误差的方法,为基于冠层温度的相关研究提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于河南省济源市市郊核桃园区(北纬35°01',东经112°28')。该园区属于典型的低山丘陵区,受暖温带大陆性季风气候影响。气候温和,光、热、水资源丰富。夏季炎热,热量充足。该区域年平均气温为14.3℃,最冷月平均气温为-0.1℃,最热月平均气温为27℃。年降水总量约650 mm,降水多集中于6—8月,约占全年降水量的54%以上。园区核桃品种繁多,以香玲品种为主。本文将主要优势树种香玲核桃树作为研究对象。核桃树的株行距3 m×5 m,行向为南北向,5年生核桃树株高3.8 m,自然开心型,2~3个主枝条。选择3棵相邻且长势良好的核桃树作为样本树,记为H1、H2、H3,3棵样本树按照从北到南横向排列(图1)。

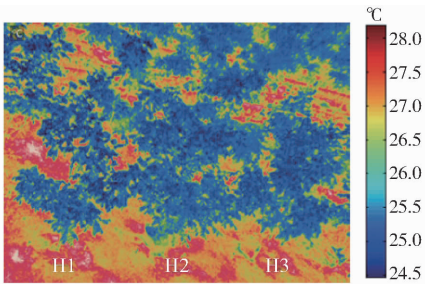


图1 2017年5月31日13:00时拍摄的热红外图像  
Fig.1 Thermal infrared image acquired at 13:00 on May 31, 2017

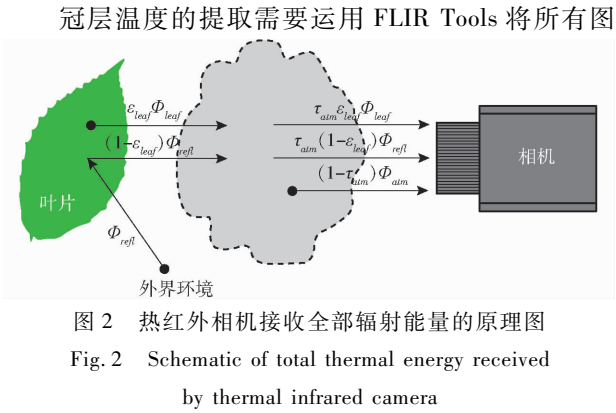
1.2 试验设计

样地西侧设立10 m高的观测塔,在塔顶处安装美国FLIR公司生产的A310f型红外热像仪,镜头焦距18 mm,视场角为25°,红外热像仪镜头到3棵样本树冠层的距离分别为17.8、19.1、20.5 m。于2017年5月25日—6月13日(20 d)采集红外图像,06:00—18:00每隔30 min获取一次图像,图像分辨率为320像素×240像素,在塔基处使用工业计算机通过运行FLIR公司的IR Monitor软件以及无线传输设备,将采集到的图像上传到主机。2017年6月10日天气晴朗,于13:00对3棵样本树逐一地进行东、西、南、北4个方向的观测,站在

4 m 高伸缩梯的最高处利用 A310f 型红外热像仪采集图像,保证各方向的测量间隔不超过 4 min。2017 年 6 月 12 日天气晴朗,利用 8 m 高脚手架对 H1 和 H2 样本树进行 10°、30°、45°、60°和 80° 5 个角度的冠层温度测量,保证每个角度测量时间不超过 3 min。在样本树旁边设立高度为 2 m 的空气温湿度和总辐射自动观测系统。所采用的温湿度传感器为 HMP45C (Campbell, 美国) 和 AV20P (AVALON, 美国),数据采集器为 Squirrel SQ2020 (Grant, 英国)。设定每 1 min 采集 1 次,每 10 min 输出 1 组平均值。

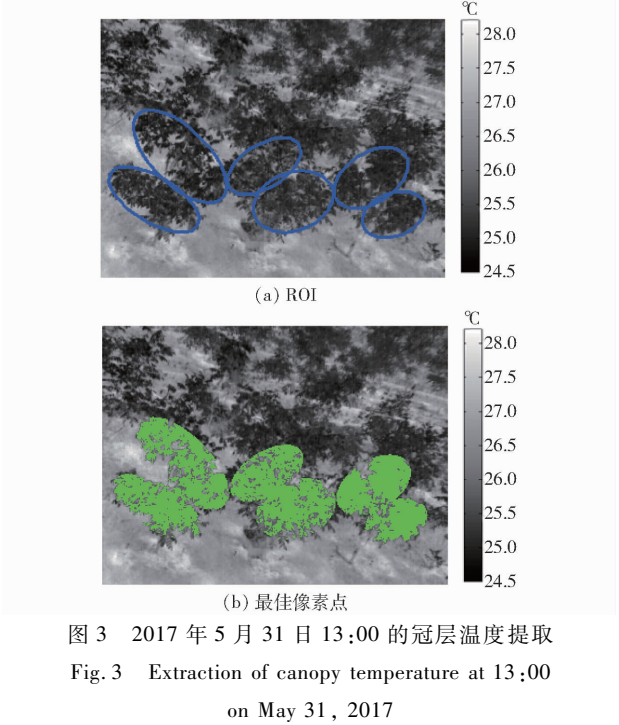
1.3 测温原理和数据分析

红外热辐射的理论基础就是普朗克分布定律,这种辐射载有物体的温度特征信息,其能够为红外成像技术判别被测目标的温度高低和热量分布提供客观基础<sup>[18]</sup>。红外热像仪对电磁波波长为 8 ~ 14 μm 的能量尤为敏感。该波段又区别于常用于植被遥感的近红外波段(0.75 ~ 1.25 μm),其不能用以测量植物温度指标。为了精确地测量目标的表面温度,当处理来自相机传感器的图像数据时,需要考虑到干扰因素。由图 2 可知,相机传感器接收到的总能量主要包括 3 部分:植被辐射能量  $\Phi_{leaf}$ 、反射物体辐射能量  $\Phi_{refl}$ 、植被和相机之间大气辐射能量  $\Phi_{atm}$ ,该能量由叶片反射,然后被空气中的水汽所衰减。其中,  $\epsilon_{leaf}$  是植被辐射率,  $\tau_{atm}$  是大气透射率。由于  $\tau_{atm}$  很难直接测定,天气晴朗时默认为 1,所以不考虑  $\tau_{atm}$  的影响。能量传输过程主要受到以下 5 个参数的影响:叶片辐射率  $\epsilon_{leaf}$ 、空气温度  $T_a$ 、空气相对湿度  $R_H$ 、冠层到相机镜头的距离  $D$ 、反射物体温度  $T_{refl}$ 。并根据实际条件对这 5 个参数设定了变化范围(表 1),再根据 FLIR Tools (FLIR, 美国) 软件以及 Matlab R2012b (Mathworks, 美国) 所建立的叶片辐射能量过程函数进行敏感性分析来评估这些参数所引起的测量误差。



| 表 1 主要参数的变化范围以及固定值的设定                                                 |             |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|------|------|
| Tab. 1 Range of changes of main parameters and setting of true values |             |      |      |
| 参数                                                                    | 变化范围        | 间隔   | 真实值  |
| $\epsilon_{leaf}$                                                     | 0.95 ~ 0.96 | 0.01 | 0.96 |
| $T_a / ^\circ\text{C}$                                                | -10 ~ 50    | 0.5  | 24.3 |
| $R_H / \%$                                                            | 0 ~ 100     | 1    | 76.6 |
| $D / \text{m}$                                                        | 0 ~ 200     | 1    | 19.1 |
| $T_{refl} / ^\circ\text{C}$                                           | -10 ~ 80    | 0.5  | 26.8 |

像中全部像素点所对应的温度导出为文本格式 csv。再利用 Matlab R2012b 软件将热红外彩色图像根据温度信息转换为 8 bit 320 像素 × 240 像素的灰度图像,其温度变化范围对应了 0 ~ 255 个灰度级别。并通过椭圆选区建立样本树冠层的感兴趣区域 (ROI) (图 3a),其中,ROI 区域内的全部像素点为 17 605 个,包括冠层像素点和土壤像素点。再利用灰度阈值分割法来提取冠层像素点<sup>[19]</sup>,结果表明,最佳的冠层像素点(绿色区域)个数为 12 305 个(图 3b)。最后,利用冠层像素点的平均温度来表示整个冠层温度。



采用双因素分组的多个样本均值进行方差分析,比较各组间总的差异,如果总差异具有显著性 ( $P < 0.05$ ) 或达到了极显著水平 ( $P < 0.01$ ),再进行组间的两两比较,采用多重比较 (LSD) 方法,利用  $t$  检验来区分数据间存在的显著性差异。研究中还选用了标准差 (SD) 作为评价指标,反映数据离散程度以及数据精度。计算公式为

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

(1)

式中  $S_D$ ——标准差  $n$ ——样本数  
 $x_i$ ——实测值  $\bar{x}$ ——样本均值

2 结果与分析

2.1 热红外测量要素的敏感性分析

图 4 对 5 个主要参数进行敏感性分析,白色圆点代表测量的真实温度为 23.9℃,红色和蓝色区域被白色所代表的中值温度分离成两个温差相等的部分。由温度比例尺可知,红色区域比蓝色区域温度高。可以根据图中两种颜色所占比例以及相应的温差统计数据(表 2)来综合评估各参数的敏感性。在  $T_a$  和  $R_H$  的敏感性分析中,测量温度的最大温差为 2.3℃,且  $T_a$  的变化对测量温度产生的影响大于  $R_H$ 。当  $T_a < 25℃$  时,随着  $R_H$  的增加,温度逐渐增大;当  $T_a > 25℃$  时,温度随着  $R_H$  的增加而减小;当  $T_a = 25℃$  时,  $R_H$  的变化不会对温度产生影响。在大于中值温度的红色区域里,  $T_a$  和  $R_H$  的变化对温度影响较小,与真实值的偏差不超过 0.9℃;在小于中值温度的蓝色区域里,产生的温度偏差可达到 1.4℃。当固定  $T_a$ 、 $R_H$  和  $\varepsilon_{leaf}$  为真实值时,随着  $T_{refl}$  的增加,温度会逐渐减小,而  $D$  对温度的影响则可以忽略不

计。在相同温度比例尺下,对  $\varepsilon_{leaf} = 0.95$  和  $\varepsilon_{leaf} = 0.96$  进行比较发现,前者的最大温差为 5.3℃,明显高于后者的温差。此外,当  $\varepsilon_{leaf} = 0.95$  时,比例尺的中值在  $T_{refl}$  为 45℃ 处,形成了鲜明的温度分离;而当  $\varepsilon_{leaf} = 0.96$  时,比例尺中值位置提升到 49℃,使得红色区域内最大温差由 1.7℃ 下降到 1.4℃。值得注意的是,  $\varepsilon_{leaf}$  仅仅改变 0.01 就导致了 1.1℃ 的误差,远远超过了其他指标变化所引起的误差。最后,考虑  $\varepsilon_{leaf}$  最为敏感,而  $D$  最不敏感,所以固定  $\varepsilon_{leaf}$  和  $D$  为真实值,构建了其他 3 个要素的三维透视图,其中黑色圆点为真实测量值,维持  $R_H$  的间隔不变,使得  $T_{refl}$  和  $T_a$  间隔均减小且保持两者一致,最大温差为 3.4℃,说明  $T_a$  减小对温度变化的影响较小,而  $T_{refl}$  在其中起到了决定性作用。因此,根据变化范围和所引起的误差对这 5 个要素进行排序,影响程度由大到小为  $\varepsilon_{leaf}$ 、 $T_{refl}$ 、 $T_a$ 、 $R_H$ 、 $D$ 。根据上述结果,研究表明利用 A310f 型红外热像仪进行冠层温度测量时,距离对测量结果影响不大,叶片辐射率为 0.96 时有助于减小测量误差,如果能够对每一幅图像中的  $T_{refl}$ 、 $T_a$  和  $R_H$  进行校准则会显著提高冠层温度的测量精度。

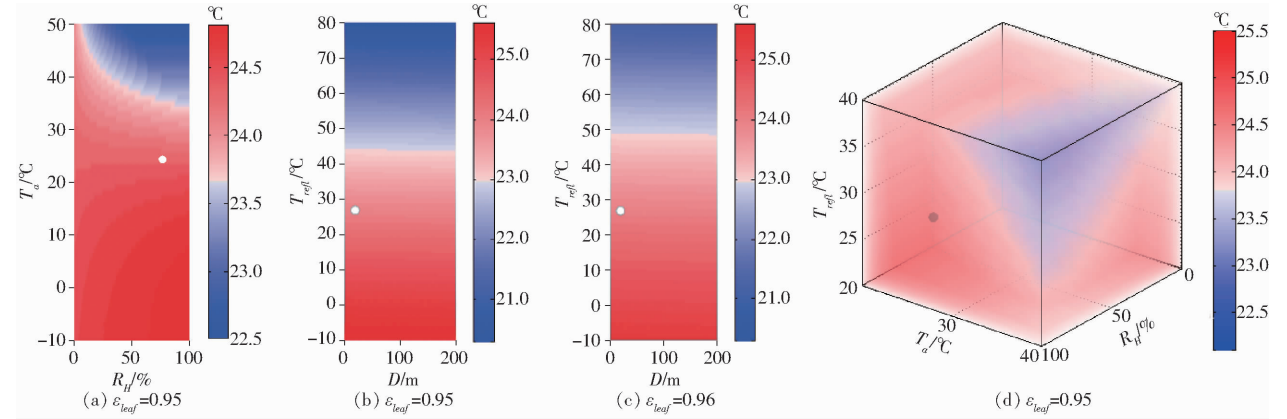


图 4 5 个主要参数的敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of five main parameters

表 2 不同参数组合的温度以及温差

| 参数组合                                             | 温度   |      |      | 温差      |         |         |
|--------------------------------------------------|------|------|------|---------|---------|---------|
|                                                  | 最大值  | 最小值  | 中值   | 最大值与最小值 | 最大值与真实值 | 真实值与最小值 |
| $T_a$ 、 $R_H$                                    | 24.8 | 22.5 | 23.7 | 2.3     | 0.9     | 1.4     |
| $T_{refl}$ 、 $D$ ( $\varepsilon_{leaf} = 0.95$ ) | 25.6 | 20.3 | 23.0 | 5.3     | 1.7     | 3.6     |
| $T_{refl}$ 、 $D$ ( $\varepsilon_{leaf} = 0.96$ ) | 25.3 | 21.1 | 23.2 | 4.2     | 1.4     | 2.8     |
| $T_{refl}$ 、 $T_a$ 、 $R_H$                       | 25.5 | 22.1 | 23.8 | 3.4     | 1.6     | 1.8     |

2.2 冠层温度的空间变异

分别对 3 棵样本树从东、西、南、北 4 个方向进行冠层温度测量,结果如图 5 所示。根据表 3 统计结果,四分位差最大值为 0.89,最小值仅为 0.29,说明数据表现为相对集中。就单一方向而言,SD 的离

散程度较低,冠层温度的波动不大,平均温度能够很好地反映真实的冠层温度;就不同方向而言,北向的冠层温度要明显低于其他 3 个方向的冠层温度。其原因可能是蒸腾潜热作用代替太阳辐射产生的显热作用成为影响北侧冠层温度的主要因素。然后,针

对 3 棵样本树和 4 个方向产生的 12 个冠层温度均值进行双因素方差分析,样本树之间检验结果为  $F = 3.93 < F_{0.05}^{2,6} = 5.14, P > 0.05$ , 未达到显著水平,说明 3 棵样本树之间温度差异不显著。方向之间检验结果为  $F = 10.02 > F_{0.05}^{3,6} = 4.75, P < 0.05$ , 达到了显著性水平,说明从 4 个方向上测量的冠层温度之间存在显著性差异。最后,通过 LSD 法进行多重比

较,进而判断不同方向之间冠层均温的两两关系。 $t$  检验结果表明,南、北两个方向上的冠层均温差为  $2.32 > t_{0.05} = 2.306, P < 0.05$ ,说明这两个方向上观测的冠层温度存在显著性差异,受到强光直接照射影响的南侧冠层温度要高于受阴影影响的北侧冠层温度,而其他方向之间均不存在显著性差异。

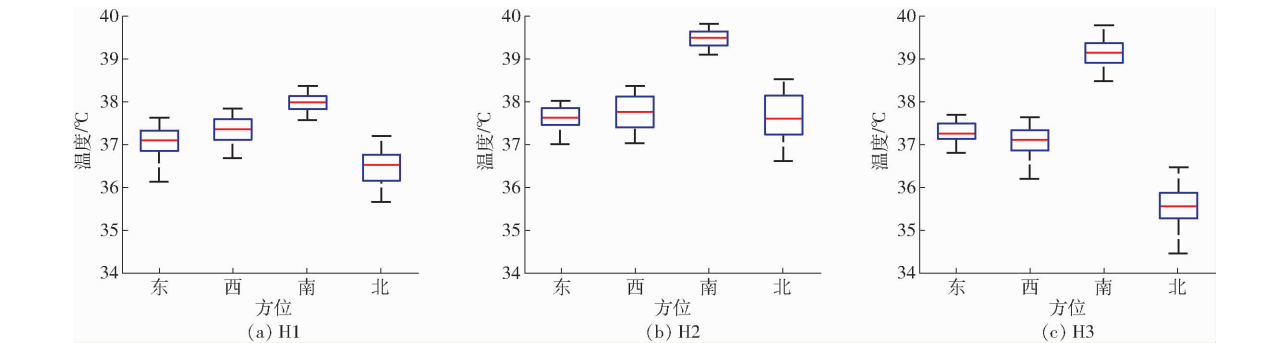


图 5 不同方位冠层温度差异箱线图

Fig.5 Box diagram of differences in canopy temperature in different directions

| 表 3 3 棵样本树在不同方向上的温度统计                                                      |       |      |       |       |      |       |       |      |       |
|----------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| Tab.3 Temperature statistics in different directions of three sample trees |       |      |       |       |      |       |       |      |       |
| 方向                                                                         | H1    |      |       | H2    |      |       | H3    |      |       |
|                                                                            | 平均值   | 四分位差 | $S_D$ | 平均值   | 四分位差 | $S_D$ | 平均值   | 四分位差 | $S_D$ |
| 东                                                                          | 36.90 | 0.47 | 0.35  | 37.62 | 0.39 | 0.27  | 37.27 | 0.35 | 0.23  |
| 西                                                                          | 37.34 | 0.48 | 0.31  | 37.74 | 0.67 | 0.41  | 37.04 | 0.46 | 0.35  |
| 南                                                                          | 37.99 | 0.29 | 0.20  | 39.47 | 0.33 | 0.20  | 39.12 | 0.46 | 0.33  |
| 北                                                                          | 36.44 | 0.60 | 0.42  | 37.64 | 0.89 | 0.55  | 35.54 | 0.61 | 0.46  |

由图 6 可知,针对 H1 和 H2 样本树进行了不同高度角的冠层温度测量。根据表 4 的统计结果可知,H1 样本 5 个观测角度的冠层温度均高于 H2,而且冠层温度的 SD 均大于 H2,说明 H2 的冠层温度偏低,但是温度变异幅度较小。结合双因素方差分析结果,样本树之间检验结果为  $F = 19.02 > F_{0.05}^{1,4} = 7.71, P < 0.05$ , 达到了显著性水平,说明样本树之间温差明显。这可能是由于树木冠层结构异质性以及测量时间间隔而引起的。不同角度之间检验结果为  $F = 1.18 < F_{0.05}^{4,4} = 6.39, P > 0.05$ , 未达到显著性水平,说明不同角度之间所测量的冠层温度差异不显著。这一结果很可能是由于核桃树冠呈开心型,

由 2~3 个主枝条展开,不同角度的观测几乎都能涵盖到目标区域。所以,在实际测量中,可以不考虑高度角对核桃树冠层温度的影响。

| 表 4 2 棵样本树在不同高度角上的温度统计                                               |       |         |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Tab.4 Temperature statistics in different angles of two sample trees |       |         |       |       |       |       |
| 样本                                                                   | 指标    | 高度角/(°) |       |       |       |       |
|                                                                      |       | 10      | 30    | 45    | 60    | 80    |
| H1                                                                   | 平均值   | 32.96   | 34.51 | 34.82 | 34.41 | 33.57 |
|                                                                      | $S_D$ | 1.32    | 1.69  | 1.53  | 1.32  | 1.53  |
| H2                                                                   | 平均值   | 32.48   | 33.11 | 32.22 | 32.16 | 32.20 |
|                                                                      | $S_D$ | 1.04    | 1.00  | 0.86  | 0.94  | 0.91  |

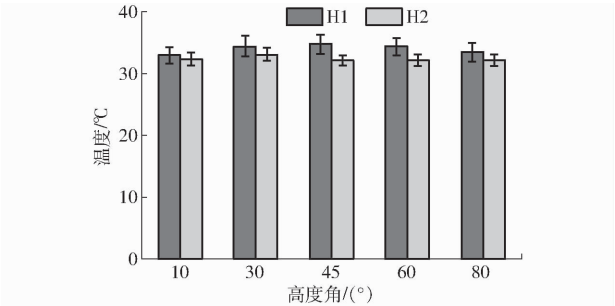


图 6 不同高度角冠层温度的差异

Fig.6 Differences in canopy temperature in different angles

### 2.3 冠层结构的温度变异

首先,将热红外原始图像通过温度廓线法使图像温度变化区分的更为明显,从图 7 可看出,冠层边缘颜色为浅蓝,深蓝色则代表冠层内部,冠层内外存在明显的温度差异。通过温度比例尺,不难看出冠层内部温度低于冠层外部温度,土壤温度明显高于冠层温度。此外,通过对图像进行温度频数直方图分析(图 8),形成了十分清晰的双峰温度变化特征。其中,第 1 个峰值为  $25.1^{\circ}\text{C}$ ,反映了冠层温度,且随

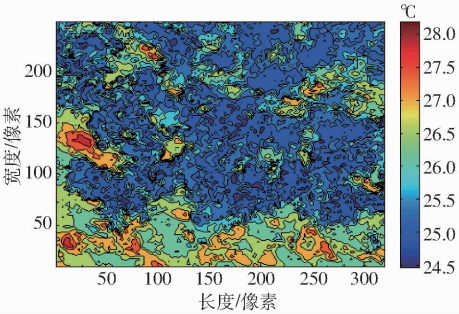


图 7 插值处理后的红外图像和温度廓线图

Fig. 7 Interpolated infrared image and temperature contour map

着提取像素点的变化存在明显的温度波动;第 2 个峰值为 26.9℃,反映了土壤温度,其与冠层温度之间存在明显的过渡区间。考虑树木的冠层结构,冠层内部叶片相互遮挡严密,冠层温度偏低,而边缘位置直接暴露在阳光下,使得叶片温度偏高。

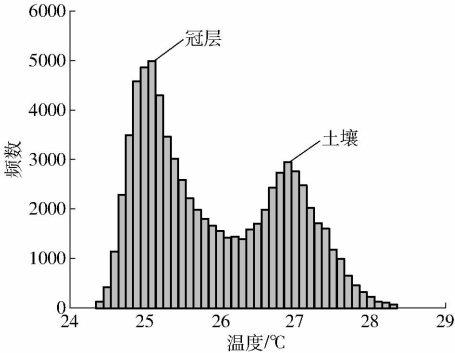


图 8 温度频数直方图

Fig. 8 Temperature frequency histogram

然后,根据冠层内外温度、空气温度和总辐射的变化关系(图 9),在连续 20 d 的测量中,发现早上冠层温度与空气温度表现为紧密地重叠在一起,但是正午前后冠层外部温度会发生明显分离,这可能与环境因子(如辐射和风速)以及植物生理特征(如气孔导度和蒸腾速率)的变化相关,而且在午后时间会达到一天中的最高温度,其与空气温度之间的最大温差可达到 4.7℃。此时,冠层内部温度要明显低于冠层外部温度,表现为冠层内部温度围绕空气温度上下波动。由图 9 还可知,当天气变化剧烈的时候,冠层内外温度均会受到影响,如 5 月 27 日整体冠层温度降低。但是,当天气条件由于多云导致太阳辐射突然变化时,对冠层外部影响更大,而对冠层内部的影响则不明显。如 6 月 3 日和 6 月 7 日午后冠层外部温度发生强烈波动。最后,进行冠层内外温度方差分析,  $F = 17.03 > F_{0.01}^{1,510} = 6.68, P < 0.01$ ,达到了极显著性水平,说明核桃冠层内部和外部温度存在极显著性差异。因此,在利用热像仪测量树木冠层温度时,应尽可能地覆盖冠层内部和外

部,使计算的平均温度更具有代表性,更能够准确地反映整个冠层温度。

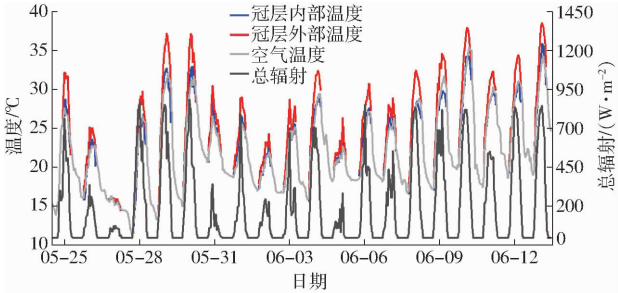


图 9 连续 20 d 冠层内部和外部温度、空气温度以及总辐射的变化特征

Fig. 9 Changing characteristics inside and outside canopy temperature, air temperature and radiation for 20 days

3 讨论

通过对 5 个要素进行敏感性分析,阐明了其对冠层温度测量的影响程度并量化了各要素的测量误差。其中,  $\epsilon_{leaf}$  对冠层温度测量影响最为严重,  $\epsilon_{leaf}$  的取值可以从文献[20-21]中获得。但实际上,植被辐射率并不是一个定值,它会随着波长大小而发生变化,变化范围在 0.95 ~ 0.99 之间,研究中所涉及到的  $\epsilon_{leaf}$  值都是平均值<sup>[22]</sup>。实际上,准确获取  $\epsilon_{leaf}$  的方法是需要对目标树种进行实际测定。此外,还必须考虑单个叶片相对于相机分辨率的尺寸,一旦叶片的投影面积比像素还小,则会出现单个像素内包含多个叶片的情况,进入到叶片的辐射能经过叶片之间多次散射而被冠层吸收,所以,  $\epsilon_{leaf}$  更接近于 0.99<sup>[23]</sup>。以本研究为例,25° 视场角,18 μm 焦距,当距离红外热像仪 20 m 时,图像单个像素实测值为 2.7 cm,明显小于核桃单叶尺寸。因此,正如图 2 所示,认为像素点内发生的是单个叶片的能量传输过程。利用红外热像仪拍摄树木时,建议叶片尺度的辐射率设定为 0.95,树木冠层尺度的辐射率设定为 0.96,而对于针叶树种或者叶面积较小的植物来说,辐射率应该设定为 0.98。这样,将有利于提高测量冠层温度的准确度。再加上同步测量  $T_a$ 、 $R_H$  以及直接从红外图像上获取  $T_{refl}$  来进行温度校准,进一步保证了冠层温度测量的精度。最后,针对红外热成像设备的硬件差异以及不同树种冠层结构的异质性,建议在进行测量之前,对这 5 个重要参数进行敏感性分析以最大限度的减小测量误差。

就测量的空间特点而言,评价了不同方向 and 不同角度的热红外测量对冠层温度的影响,其结果与 JONES 等<sup>[24]</sup> 在研究葡萄冠层温度上的结果相近似。认为南向拍摄时,阳光照射使得冠层温度升高,并且红外热像仪测量时会与太阳光平行,使得太阳光很

容易通过叶片反射进入到镜头里,从而高估了实际的冠层温度。相反,北向拍摄时,树冠受太阳光影响较小,受阴影的影响使得冠层温度偏低。此外,在 JONES 等<sup>[25]</sup>研究棉花时还发现冠层温度会随着观测角度增大而升高,达到峰值后再逐渐减小。但是,在核桃树研究中,结果则表现为不同角度测量获取的冠层温度不存在显著性差异。分析其原因:一方面,热红外观测的方向平行于太阳光,受到辐射的影响较大;另一方面,由于棉花栽植具有均一化和高密度性,使其冠层形成了较理想的反射平面,反射辐射成为影响不同角度能量接收的主导因素。相反,核桃冠层测量方向与太阳光形成近 90° 夹角,有效地避免了辐射能量被叶片反射直接进入到镜头,同时核桃冠层的不规则性使得辐射能量被冠层内部的散射作用所削减,使其不足以对红外接收信号产生显著影响。因此,对于核桃树连续冠层温度观测时,只需要考虑测量方向的问题,而角度问题可以忽略。

对于树木而言,树冠的边缘属于稀疏结构,直接暴露在阳光下;而冠层内部属于密集结构,主要以散射辐射为主,光线很难穿透<sup>[26]</sup>。冠层内部温度明显低于冠层外部温度的主要原因在于冠层边缘叶片在强光刺激下,光抑制作用使得气孔趋于关闭,温度主要受显热控制;而冠层内部叶片相互遮挡,受强光影响较小,蒸腾作用使得潜热影响占据主导。因此,利用热电偶进行点测量时,一定要满足足够的数量来覆盖冠层的内部和外部,才能够更好的表征冠层温度。而利用红外热像仪测量树木冠层时也应该避免提取局部温度,而应该尽可能的获取整个冠层温

度<sup>[27]</sup>。此外,诸多研究认为 13:00 和 14:00 时是测量冠层温度的最佳时间,原因之一就是该时间段的冠层温度可以和空气温度发生明显分离,对研究植物冠层与空气温度差异以及建立模型都具有重要意义<sup>[28]</sup>。在应用无人机或者其他遥感平台测量植物冠层温度时,也可以采用正午时间,主要是考虑消除树木阴影给图像处理带来的干扰<sup>[29]</sup>。总之,利用红外热像仪测量冠层温度应该尽量选择晴朗、无风的午后,这样将提高影像获取的质量。

## 4 结论

(1)对红外热像仪测量冠层温度中存在的确定性以及减小测量误差的方法进行了分析。结果表明,冠层温度受  $\varepsilon_{leaf}$  影响最大,受  $T_{refl}$  影响次之,  $T_a$  和  $R_H$  的影响较小,对  $D$  变化不敏感。

(2)对于 4 个测量方向来说,南、北两个方向所测量的冠层温度存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ),而其他各方向之间的冠层温度差异不显著。测量时应避免直射和逆光情况,与太阳方位角形成近 90° 的夹角,能够有效消除强光和阴影的影响。

(3)不同测量高度的角度对冠层温度的影响未达到显著性水平,测量时可以不考虑角度问题。

(4)温度频数直方图反映出像素点呈现双峰分布特征,冠层像素点的峰值温度为 25.1℃。

(5)考虑树木冠层结构,正午前后冠层外部温度明显高于内部温度,两者之间存在极显著性差异 ( $P < 0.01$ )。太阳辐射变化主要影响冠层外部温度,冠层内部温度主要受蒸腾潜热的影响。

## 参 考 文 献

- [1] 高明超. 水稻冠层温度特性及基于冠层温度的水分胁迫指数研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2013.  
GAO Mingchao. A research on rice canopy temperature properties and in view of the water stress index of canopy temperature [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [2] 袁国富,唐登银,罗毅,等. 基于冠层温度的作物缺水研究进展[J]. 地球科学进展,2000,16(1):50-54.  
YUAN Guofu,TANG Dengyin,LUO Yi,et al. Advances in canopy-temperature based crop water stress research [J]. Advance in Earth Sciences,2000,16(1):50-54. (in Chinese)
- [3] 肖莉娟. 用红外热图像估算棉花叶片水势参数的研究[D]. 石河子:石河子大学,2013.  
XIAO Lijuan. The study on estimating leaf water potential of cotton based on infrared thermal images [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese)
- [4] AGAM N,COHEN Y,BERNI J A J,et al. An insight to the performance of crop water stress index for olive trees [J]. Agricultural Water Management,2013,118:79-86.
- [5] 张智韬,边江,韩文霆,等. 剔除土壤背景的棉花水分胁迫无人机热红外遥感诊断[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):250-260.  
ZHANG Zhitao,BIAN Jiang,HAN Wenting,et al. Diagnosis of cotton water stress using unmanned aerial vehicle thermal infrared remote sensing after removing soil background [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):250-260. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20181028&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181028&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.028. (in Chinese)
- [6] YU M H, DING G D, GAO G L,et al. Using plant temperature to evaluate the response of stomatal conductance to soil moisture deficit [J]. Forests,2015,6(10):3748-3762.

- [7] COLAIZZI P D, BARNES E M, CLARKE T R, et al. Water stress detection under high frequency sprinkler irrigation with water deficit index [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2003, 129(1): 36–43.
- [8] 赵田欣, 郭斌, 安新民, 等. 美洲黑杨与大青杨杂种叶片气孔导度的红外热像测量方法研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(31): 65–70.
- ZHAO Tianxin, GUO Bin, AN Xinmin, et al. The study of stomatal conductance estimation of populus deltoids Bartr.  $\times$  *Populus ussuriensis* kom. by infrared thermography [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(31): 65–70. (in Chinese)
- [9] ELSAYED S, ELHOWEITY M, IBRAHIM H H, et al. Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 189: 98–110.
- [10] 黄春燕, 赵鹏举, 王登伟, 等. 基于红外热图像的棉花水分胁迫指数高光谱遥感估算研究[J]. *红外*, 2012, 33(6): 17–21.
- HUANG Chunyan, ZHAO Pengju, WANG Dengwei, et al. Hyperspectral remote sensing estimation of cotton water stress index based on infrared thermal image [J]. *Infrared*, 2012, 33(6): 17–21. (in Chinese)
- [11] LEUZINGER S, KÖMER C. Tree species diversity affects canopy leaf temperatures in a mature temperate forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(2): 29–37.
- [12] SEPULCRE-CABTÓ G, ZARCO-TEJADA P J, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, et al. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 136(1–2): 31–44.
- [13] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1336–1341.
- LI Yunhong, SUN Xiaogang, YUAN Guibin. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(9): 1336–1341. (in Chinese)
- [14] AUBRECHT D M, HELLIKER B R, GOULDEN M L, et al. Continuous, long-term, high-frequency thermal imaging of vegetation: Uncertainties and recommended best practices [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 228–229: 315–326.
- [15] KIM Y, STILL C J, ROBERTS D A, et al. Thermal infrared imaging of conifer leaf temperatures: comparison to thermocouple measurements and assessment of environmental influences [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 361–371.
- [16] 孙圣, 张劲松, 孟平, 等. 基于无人机热红外图像的核桃园土壤水分预测模型建立与应用[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16): 89–95.
- SUN Sheng, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al. Establishment and application of prediction model of soil water in walnut orchard based on thermal infrared imagery [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(16): 89–95. (in Chinese)
- [17] JIMÉNEZ-BELLO M A, BALLESTER C, CASTEL J R, et al. Development and validation of an automatic thermal imaging process for assessing plant water status [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(10): 1497–1504.
- [18] 李相迪, 黄英, 张培晴, 等. 红外成像系统及其应用[J]. *激光与红外*, 2014, 44(3): 229–234.
- LI Xiangdi, HUANG Ying, ZHANG Peiqing, et al. Infrared imaging system and applications [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(3): 229–234. (in Chinese)
- [19] COHEN Y, ALCHANATIS V, MERON M, et al. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(417): 1843–1852.
- [20] WAN Z. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(1): 59–74.
- [21] REES W G. *Physical principles of remote sensing* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [22] JONES H G. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology [J]. *Advances in Botanical Research*, 2004, 41: 107–163.
- [23] DONG G Q, LI Z Z. The apparent emissivity of vegetation canopies [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(1): 183–188.
- [24] JONES H G, STOLL M, SANTOS T, et al. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(378): 2249–2260.
- [25] JONES H G, SERRAJ R, LOVEYS B R, et al. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field [J]. *Functional Plant Biology*, 2009, 36(11): 978–989.
- [26] SMOLANDER S, STENBERG P. Simple parameterizations of the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(3): 355–363.
- [27] 杨卫平, 王学知, 比尔·莫兰, 等. 利用红外成像技术的自动树冠温度估计[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 169–175.
- YANG Weiping, WANG Xuezhi, BILL M, et al. Automated canopy temperature estimation via infrared thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 169–175. (in Chinese)
- [28] 张文忠, 韩亚东, 杜宏绢, 等. 水稻开花期冠层温度与土壤水分及产量结构的关系[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(1): 99–102.
- ZHANG Wenzhong, HAN Yadong, DU Hongjuan, et al. Relationship between canopy temperature and soil water content, yield components at flowering stage in rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(1): 99–102. (in Chinese)
- [29] BELLVERT J, ZARCO-TEJADA P J, GIRONA J, et al. Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle [J]. *Precision Agriculture*, 2014, 15(4): 361–376.