

# 叶温测量仪的研制及其在叶片参数测量中的应用

李东升, 郭琳, 郭冲冲\*, 郭天太

(中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 为探索植物自身水分状态, 研究叶气温差与叶片厚度变化, 自行研制了叶温测量仪, 同时利用 YI-201020 植物叶片参数测量仪, 对辣椒和花生不同生长阶段的叶片温度和叶片厚度进行监测, 结合环境温度, 并对各个生长阶段的叶气温差和叶片厚度作相关性分析, 结果表明: 传感器线性度为 1%, 回程误差 0.02 V, 灵敏度为 0.04 V/°C, 分辨力为 0.3°C, 仪器在测量范围 0~90°C 下最大示值误差为 0.27°C, 得到仪器的扩展不确定度为 0.41°C; 叶气温差和叶片厚度在各个时期都呈显著的正相关, 其中中长期显著性最为明显。研究结果对植物物理学研究有参考价值。

**关键词:** 仪器, 设计, 应用, 叶温测量, 叶气温差, 叶片厚度, 相关性

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.023

中图分类号: S313

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0139-06

李东升, 郭琳, 郭冲冲, 等. 叶温测量仪的研制及其在叶片参数测量中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 139-144.

Li Dongsheng, Guo Lin, Guo Chongchong, et al. Development of leaf temperature measuring instrument and its application in plant leaf parameter measurement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 139-144. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

植物水分状况直接反映植物生长, 测量植物水分含量能够实现农业的精准灌溉, 是当今节水灌溉的必由之路<sup>[1-3]</sup>。研究表明, 叶气温差(叶面温度与空气温度之差)与叶片厚度变化可以很好地反映植物水分盈亏状态<sup>[4-7]</sup>。目前对于叶片厚度变化的研究主要集中于叶片厚度对环境因子(光强、CO<sub>2</sub>、温湿度、土壤水分等)的响应以及与各种抗性(抗旱性、抗寒、耐盐等)之间相关性研究等<sup>[8-11]</sup>方面, 而对于叶片厚度与叶温、气孔导度、光合速率等光合特征研究则相对较少, 研究方法也通常以石蜡切片、冷冻切片等破坏性处理<sup>[12]</sup>方法为主, 这样势必造成叶片厚度测量的误差, 同时不能实时测量。此外, 环境温度对植物开花等重要生长过程的影响已有很多研究, 为进一步揭示植物本身与环境温度之间的耦合机理, 就必须对植物的“体温”进行测量, 进而研究叶气温差与叶片厚度之间的耦合机理。为此, 本文作者研制了叶片温度测量仪, 并对叶片温度进行了接触式测量, 结合本课题组先期研发的 YI-201020 型植物叶片参数精密测量仪, 实时监测叶片厚度与叶片温度, 研究叶气温差与叶片厚度之间相关性, 进一步深入研究叶片厚度变化机理, 为基于叶片厚度监测水分状况, 实行农业自动化灌溉提供理论和实践基础。

## 1 叶温测量仪的研制

目前广泛利用红外测温法来测量叶片温度<sup>[13-14]</sup>, 但由于叶片内部生理变化关系而较难确定叶片反射率; 同时环境对红外测温法影响较大, 使得该方法测量前的前期准备复杂<sup>[15]</sup>, 同时测量误差较大, 无法满足精度要求。故本文采用贴片式铂电阻温度传感器对叶温进行接触式测量。贴片式铂电阻温度传感器测量简单方便, 只需外接夹具将其固定于叶片上即可测量, 同时采用四线制接法来消除铂电阻传感器引线电阻对测量结果造成的影响<sup>[16]</sup>, 该方法能够活体采集叶片温度实现叶温的实时精确测量。

### 1.1 叶温测量仪系统设计

#### 1.1.1 技术参数要求

结合现代仪器设计自动化、微型化、便携式、低功耗的理念, 要求温度范围为 0~60°C, 测量的不确定度小于 0.5°C, 测量的分辨率优于 0.3°C, 同时为接触式测量, 还要求体积小, 功耗低, 可靠耐用, 携带方便等特点。

#### 1.1.2 仪器工作原理

本文采用 STT-F 系列铂电阻温度传感器, 其温度测量范围 0~100°C, 零度阻值为 100 Ω, 电阻变化率为 0.3851 Ω/°C, 测量精度为±0.12%, 防水防潮, 且在低温测量时, 铂电阻具有良好的复现性及稳定性, 满足了叶片表面温度测量要求。仪器以富士通单片机为控制核心, 通过传感器信号转换电路将叶温信号作线性化处理, 输出模拟量信号经单片及机内的模/数转换器进行采集与转换, 最后通过显示、存储、按键、通信等模块实现仪器测量功能<sup>[17]</sup>。仪器的信号转换电路由德州仪器产的单片机式温度—电流变送器 XTR105 和 RURR-BROWN 公司产的精密电流环接收器 RCV420 组成<sup>[18-19]</sup>。XTR105 能将铂电阻阻值转换

收稿日期: 2011-06-27 修订日期: 2011-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60671052); 浙江省质量技术监督系统科研计划项目(20080106)。

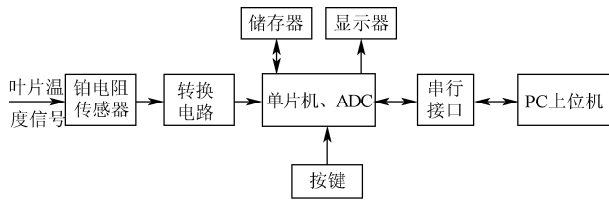
作者简介: 李东升(1957—), 男, 吉林梨树人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为植物物理信息检测技术以及超精密检测技术。杭州 中国计量学院, 310018。Email: ldsim@163.com

\*通信作者: 郭冲冲(1987—), 女, 浙江台州人, 研究方向为植物物理信息检测技术。杭州 中国计量学院, 310018。Email: guo\_chong\_chong@126.com

成电流信号送给采样电路，输出电流值仅与铂电阻阻值有关，消除了由于导线电阻产生的阻值误差，同时，XTR105 具有线性补偿功能。而 RCV420 能够将 XTR105 变送器输出的 4~20 mA 输出电流信号转换成 0~5 V 模拟信号输出。叶温测量仪的系统总体框图如图 1 所示。

### 1.2 叶温测量仪标定校准实验

对图 1 所示的叶片温度测量仪进行研发后，首先要确定该仪器的静态参数，其中线性度、灵敏度、回程误差、系统误差等为重要试验内容。以 RST-01B 恒温槽为标准热源对仪器进行标定，恒温槽精度为 0.01℃。标定温度间隔设定为 10℃。从 10℃ 开始对仪器进行标定，记录不同温度下仪器输出电压 (V)。仪器进程与回程标定曲线如图 2 所示。



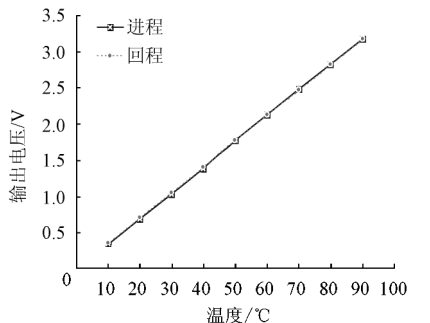
a. 仪器系统框图



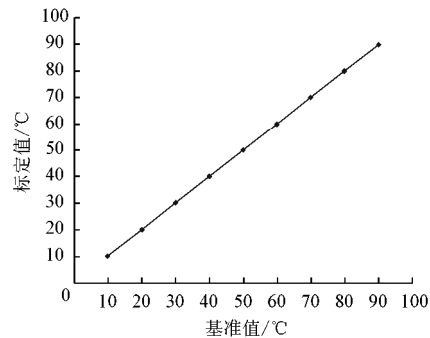
b. 仪器实物图

图 1 叶温测量仪

Fig.1 Leaf temperature measuring instrument



a. 仪器输出特性标定曲线



b. 仪器校准曲线

图 2 叶片温度测量仪标定校准实验

Fig.2 Alibration experiment of leaf temperature measuring instrument

图 2 为叶片温度测厚仪的标定校准实验。其中，图 2a 为温度测量仪输出特性标定曲线，表示各个温度设定值与仪器输出电压的对应关系。从进、回程曲线看出经过信号调理，测量范围内电压信号输出的线性度非常好，经标定得到的传感器线性度为 1%，回程误差 0.02 V，灵敏度为 0.04 V/℃，分辨力为 0.3℃。图 2b 为仪器校准实验得到的曲线，表示设定的温度值与仪器显示值的对应关系，可以得到仪器在测量范围 0~90℃ 下最大示值误差为 0.27℃，所以该仪器满足设计要求，能够实现对植物叶片表面温度的准确测量。

### 1.3 叶温测量仪的不确定度分析

叶温测量仪的不确定度来源包括标准器的不确定度和被校器件的不确定度。选取 50℃ 作为叶温测量仪的校准点。根据 JJG617-96 数字温度指示调节仪检定规程<sup>[20]</sup>，确定数学模型为

$$\Delta_A = A_d - A_s \quad (1)$$

式中， $\Delta_A$  为测量误差，℃； $A_d$  为仪表示值，℃； $A_s$  为二等标准水银温度计示值，℃，对 (1) 式取偏导，可得传播系数  $C_1=1$ ， $C_2=-1$ 。

#### 1.3.1 被校器件不确定度 $u(A_d)$ 的分量组成

1) 测量重复性引起的不确定度分量  $u_{11}$ ，采用 A 类方法评定。

用叶温测量仪在 50℃ 经过连续 10 次等精度测量，得到测量值  $x_i$ ，用贝塞尔公式计算，得到单次的实验标准差

$$S_{\text{单}}, u_{11}=S_{\text{单}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} v_i^2}{n-1}}=110 \text{ mk}, \text{ 自由度 } v_{11}=10-1=9, \text{ 式}$$

中， $v_i$  为  $x_i$  的残余误差， $n$  为测量次数，mk 为热力学温度单位。

2) 由叶温测量仪的分辨力引入不确定度分量  $u_{12}$ ，采用 B 类方法评定。

叶温测量仪的分辨力为 0.3℃，半宽度为  $a=0.15^\circ\text{C}$ ，符合均匀分布， $u_{12}=\frac{a}{\sqrt{3}}=\frac{0.15}{\sqrt{3}}\approx 86.6 \text{ mk}$ ，即约 87 mk，

取相对标准差为 20%，则自由度  $v_{12}=\frac{1}{2(20\%)^2}=12$ 。

#### 3) 被校标准器不确定度分量合成 $u(A_d)$

$$u(A_d)=\sqrt{u_{11}^2+u_{12}^2}\approx 140.2 \text{ mk}, \text{ 取 } 141 \text{ mk}$$

$$\text{自由度为 } v_1=\frac{u(A_d)^4}{\sum_{i=1}^2 \frac{u_i^4}{v_i}}\approx 18.8, \text{ 取 } 18.$$

#### 1.3.2 标准温度计的标准不确定度分量 $u(A_s)$

$A_s$  的不确定度来源包括标准器的测量重复性、传递不确定度和读数误差。

1) 测量重复性引起的不确定度分量  $u_{21}$ ，采用 A 类方法评定。

在 50℃ 经过连续 10 次等精度测量，得到测量值  $y_i$  和单次试验标准差  $S_{\text{单}}$

$$u_{21} = S_{\text{单}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} v_i^2}{n-1}} = 7.4 \text{ mk}, \text{ 自由度 } v_{21} = 10 - 1 = 9, v_i$$

为  $y_i$  的残余误差。

2) 根据二等标准水银温度计检定规程 JJG128-2003, 得到二等标准水银温度计在  $50^\circ\text{C}$  的不确定度为  $30 \text{ mk}$  ( $P=0.99$ ), 正态分布, 查表得, 当  $P=0.99$  时, 包含因子  $k_p = 2.58$ , 按 B 类不确定度评定得到的不确定度分量  $u_{22}$  为

$$u_{22} = 30/2.58 = 11.6 \text{ mk}, \text{ 自由度 } v_{22} = \infty$$

3) 对标准器的读数误差引起的不确定度分量  $u_{23}$ , 采用 B 类方法评定

二等标准水银温度计的分度值为  $0.1^\circ\text{C}$ , 通过读数望远镜可估读到其  $1/10$ , 则该区间半宽  $a$  为  $1/20$  分度值, 采用均匀分布。

$$u_{23} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 2.9 \text{ mk}, \text{ 估计值可靠性约 } 50\%, \text{ 故}$$

$$\text{自由度为 } v_{23} = \frac{1}{2 \times (50\%)^2} = 2。$$

4) 标准器引入的合成标准不确定度分量  $u(A_s)$

$$u(A_s) = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2 + u_{23}^2} \approx 14.06 \text{ mk}, \text{ 取 } 14.1 \text{ mk}$$

$$\text{自由度 } v_2 = \frac{u(A_s)^4}{\sum_{i=1}^3 u_i^4} \approx 107, \text{ 取 } 107。$$

### 1.3.3 标准器输入的合成标准不确定度

因为上述几个分量不确定度彼此独立不相关, 故合成标准不确定度  $u_c$  为

$$u_c = \sqrt{(c_1 u(A_d))^2 + (c_2 u(A_s))^2} \approx 141.7 \text{ mk}, \text{ 取 } 142 \text{ mk}$$

$$\text{即 } 0.14^\circ\text{C}, \text{ 有效自由度 } v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^2 u_i^4} \approx 17.5, \text{ 取 } 17。$$

### 1.3.4 扩展不确定度评定

取置信概率  $P=99\%$ , 查  $t$  表  $t_{0.99}(17) = 2.90$ , 所以包含因子  $k = 2.90$ , 则扩展不确定度  $U_{99}$  为

$$U_{99} = k \cdot u_c \approx 412 \text{ mk}, \text{ 取 } 0.41^\circ\text{C}。$$

### 1.3.5 测量不确定度报告

$$U_{99} = 0.41^\circ\text{C}, k = 2.90, v_{\text{eff}} = 17。$$

## 2 叶片温度测量试验

### 2.1 试验时间、地点及材料

本研究试验于 2010 年 4 月—8 月期间分别选取辣椒(椒优 2 号)、花生(花生藤)、水稻作为田间种植, 辣椒与花生分 3 个生育阶段分别进行试验: 幼苗期、成长期、成年期(开花期/结果期)。试验点均在浙江省中国计量学院温室进行 ( $120^\circ 11 \text{ E}$ ,  $30^\circ 15 \text{ N}$ ), 属于亚热带季风气候, 四季分明, 湿润多雨, 年平均气温  $15 \sim 18^\circ\text{C}$ , 全省年平均雨量在  $980 \sim 2000 \text{ mm}$ , 年平均日照时数  $1710 \sim 2100 \text{ h}$ , 同时该温室土壤肥沃疏松, 排灌条件好。选取的温室长  $15 \text{ m}$ , 宽  $10 \text{ m}$ , 作物的株行距为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , 每个品种定植 15 株, 5 株一行, 采用人工播种, 正常田间操作。

### 2.2 测量试验方案

本试验同时对不同植物、不同生育阶段的同一叶片部位叶片厚度、叶片表面温度以及环境温度进行监测。在叶片上取 4 点(避开主叶脉)测量取平均为叶片厚度数值, 同时监测环境温度, 被测植物叶片厚度的监测周期为  $24 \text{ h}$ , 每隔  $30 \text{ min}$  通过定时数据采集记录叶片厚度值; 令主叶脉的中间位置左右两点作为叶温测定, 取均值。每隔  $30 \text{ min}$  采集一次。每日  $6:00 \sim 18:00$ , 每隔  $2 \text{ h}$  对被测植物灌水以保证试验在相同土壤湿度环境下进行; 晚间 ( $18:00 \sim 6:00$ ) 无土壤灌溉。采用杭州仰仪科技有限公司的 YI-20020A 植物叶片参数测量仪测定叶片厚度, 环境温度, 叶片厚度仪器的测量范围为  $0 \sim 700 \mu\text{m}$ , 精度为  $1 \mu\text{m}$ , 仪器环境温度测量误差小于  $0.3^\circ\text{C}$ ; 叶片温度使用自行研制的叶温测量仪进行测量。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 叶气温差和叶片厚度变化规律

对辣椒和花生各个生长阶段进行测量, 并对叶气温差和叶片厚度进行相关性分析。图 3~5 为辣椒和花生在幼苗期、成长期和成熟期叶气温差与叶片厚度的变化曲线。

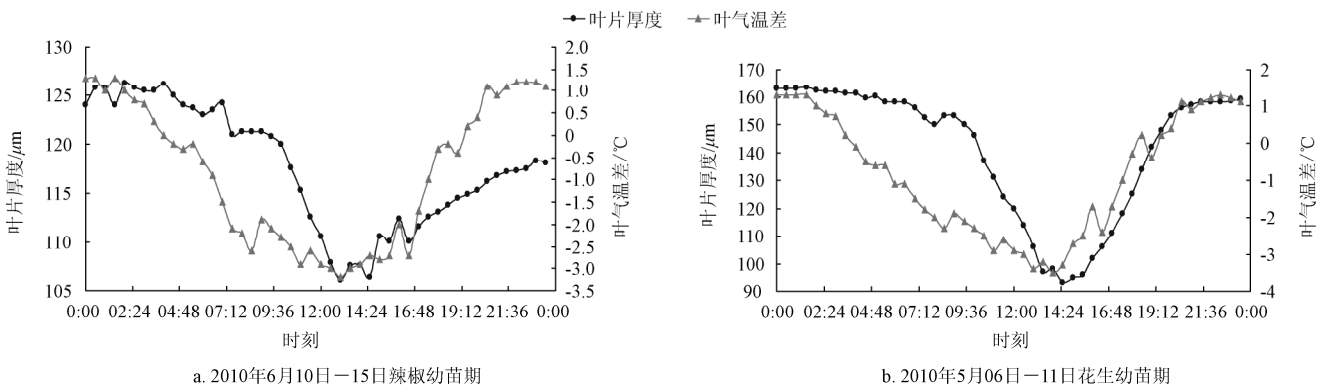


图 3 辣椒和花生幼苗叶气温差与叶片厚度日变化曲线

Fig.3 Canopy-air temperature and leaf thickness of daily variation curves in seedling stage of chilies and peanuts

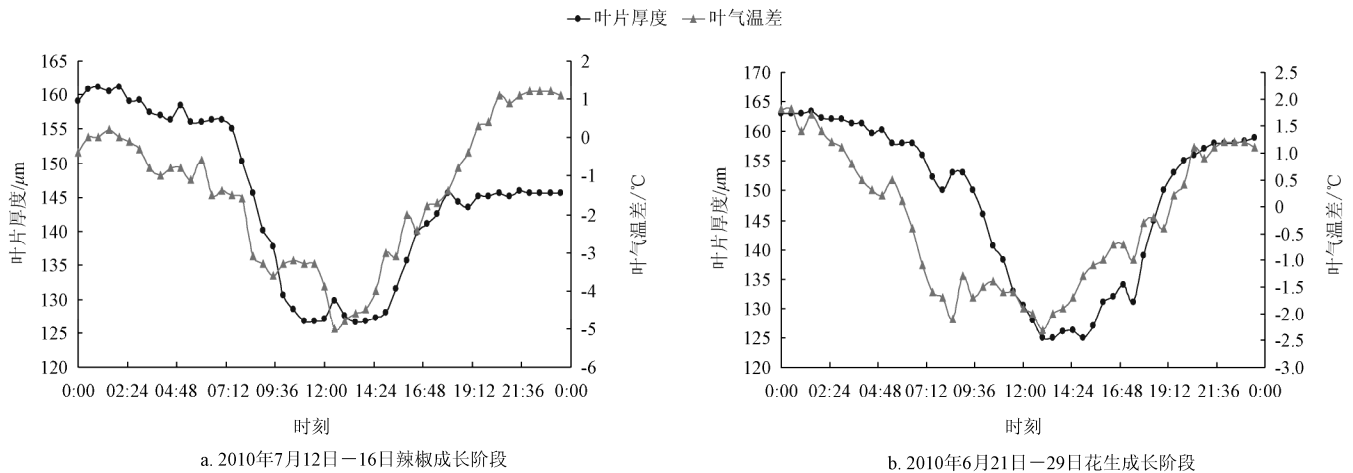


图4 辣椒和花生成长阶段叶气温差与叶片厚度日变化曲线

Fig.4 Canopy-air temperature and leaf thickness of daily variation curves in growth stage of chilies and peanuts

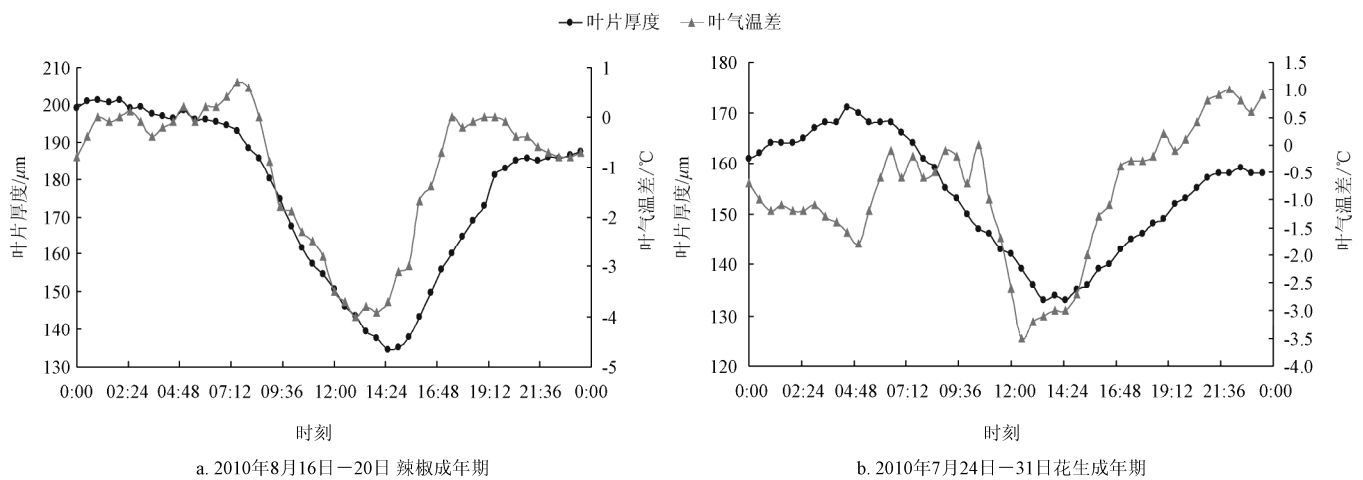


图5 辣椒和花生成年期叶气温差与叶片厚度日变化曲线

Fig.5 Canopy-air temperature and leaf thickness of daily variation curves in adult stage of chilies and peanuts

由图3可见, 幼苗时期辣椒、花生叶气温差与叶片厚度变化总体趋势接近。夜间, 叶气温差变化较缓慢, 而日间叶气温差变化幅度较叶片厚度大, 并且由于存在生理惯性, 两者时间在13:30~15:00出现极值, 而叶片厚度达到极值的时间较叶气温差极值点更晚。辣椒与花生叶气温差变化范围分别为: 4.5和4.8℃。叶片厚度在日叶气温差于-3.2~-2.5℃时达到最小值。

由图4可见, 成长时期的辣椒、花生叶片厚度与叶气温差间变化趋势与幼苗期相似, 然而成长期2种被测植物叶片厚度极值到达的时间出现差异, 辣椒的叶气温差相对叶片厚度极值出现滞后现象, 花生的叶片厚度达到极值时间晚于叶气温差极值点。被测叶片日叶气温差变化值分别为辣椒6.2℃、花生4.1℃。

由图5可见, 成年期的辣椒、花生叶片厚度和叶气温差变化趋势与幼苗期、成长期相似, 且叶片厚度和叶气温差极值到达时间也基本相同, 为14:00左右, 两者的叶片厚度相对于叶气温差出现极值滞后现象。成年期辣椒叶片与花生叶片叶气温差总变化量均在4℃左右, 叶气温差最低值温差在-4~-3.5℃间, 可见辣椒、花生叶气温差变化均较小, 说明成年期被测植物叶片其叶面温度与

环境温度间相对接近。

### 3.2 叶片厚度与叶气温差相关分析

对辣椒、花生的幼苗期、成长期和成年期的叶气温差与叶片厚度所测量的数据作相关性分析, 如表1所示。

表1 辣椒、花生不同生育阶段叶气温差与叶片厚度相关系数  
Table 1 Correlations of canopy-air temperature and leaf thickness of chilies and peanuts at different stages

	幼苗期		成长期		成年期	
	辣椒	花生	辣椒	花生	辣椒	花生
相关系数 $R$	0.693**	0.723**	0.753**	0.784**	0.847**	0.427*

注: \*和\*\*分别表示在显著性水平  $\alpha$  为 0.05 和 0.01 条件下。

由表1表明, 植物在不同生育阶段, 叶片厚度与叶气温差间均为显著正相关。造成这一现象原因是叶气温差受叶片含水率影响明显, 而叶片含水率与叶片厚度密切相关, 从而在图中可以看到叶片的叶片厚度与叶气温差的变化趋势相似。幼苗阶段辣椒叶气温差与叶片厚度间相关系数较花生的相关系数小, 造成这一差异的原因是因为幼苗阶段花生叶片含水率较辣椒含水率高, 其对水分的敏感度较高, 而叶气温差受叶片含水率影响明显,

故花生幼苗阶段叶气温差与叶片厚度相关系数大; 成长阶段辣椒、花生含水率虽略有下降, 而两者厚度变化与叶气温差的相关系数  $R$  仍较大; 成年期, 由于花生叶片在成年期含水率为整个生育阶段最低, 故其叶气温差对叶片厚度的影响最小, 而相反辣椒叶片则在成年期仍保持较高的水分含水率, 因此在成年期辣椒叶片厚度与叶气温差间显著相关明显。

#### 4 结 论

1) 自行研制了叶片温度测量仪, 得到传感器线性度为 1%, 回程误差 0.02 V, 灵敏度为 0.04 V/°C, 分辨力为 0.3°C, 仪器在测量范围 0~90°C 下最大示值误差为 0.27°C, 得到仪器的扩展不确定度为 0.41°C。

2) 辣椒和花生各个生长期的叶片温度、叶片厚度的总体变化趋势接近, 且存在明显的规律性日变化, 叶气温差和叶片厚度在 13:30~15:00 出现一天的最低点, 同时叶气温差日总变化量都在 4°C 左右。

3) 对 2 种植物在各个生长期的叶气温差和叶片厚度作相关性分析, 结果发现两者在各个生长期都成显著正相关性, 总体上看, 在成长阶段叶片厚度与叶气温差间相关性最为显著。

可以对更多的作物进行叶气温差和叶片厚度采集, 进一步完善叶气温差和叶片厚度的耦合机理。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张劲松, 孟平, 高峻, 等. 基于冠层叶气温差的苹果园土壤水分预报模型[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 17—20. Zhang Jinsong, Meng Ping, Gao Jun, et al. Model for predicting soil water status based on the canopy—air temperature differential in apple orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(6): 17—20. (in Chinese with English abstract)
- [2] 段爱旺, 孟兆江. 作物水分信息采集技术与采集设备[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 6—14. Duan Aiwan, Meng Zhaojian. Present situation of techniques and equipments of monitoring crop water status[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2007, 9(1): 6—14. (in Chinese with English abstract)
- [3] Conejero W, Alarcon J J, Garcia-Orllana Y, et al. Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors for irrigation scheduling in early maturing peach trees[J]. Tree Physiology, 2007, 27(12): 1753—1759.
- [4] 宋军兰, 李东升. 番茄叶片厚度变化规律的比较解剖分析[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(6): 590—592. Song Junlan, Li Dongsheng. Comparative anatomy analysis of the leaf thickness changes in tomato[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2009, 21(6): 590—592. (in Chinese with English abstract)
- [5] 彭世彰, 徐俊增, 丁加丽, 等. 节水灌溉条件下水稻叶气温差变化规律与水分亏缺诊断试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1503—1507. Peng Shizhang, Xu Junzeng, Ding Jiali, et al. Leaf-air temperature difference of rice and water deficit diagnose under water saving irrigation[J]. Shuili Xuebao, 2006, 37(12): 1503—1507. (in Chinese with English abstract)
- [6] Boroomand N S, Kashkuli H A, Zadeh F R. Irrigation scheduling using crop canopy-air temperature difference for sugarcane[J]. Crop Research (India), 2005, 30(3): 355—359.
- [7] 张平, 汪有科, 湛景武, 等. 充分灌溉条件下桃树茎直径最大日收缩量模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 38—43. Zhang Ping, Wang Youkez, Zhan Jingwu, et al. Simulation of stem diameter maximum daily shrinkage for peach under full irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 38—43. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张艳华, 郭天荣, 李东升. 植物叶片厚度日变化及其与生态因子相关性的研究[J]. 中国计量学院学报, 2010, 21(3): 278—282. Zhang Yanhua, Guo Tianrong, Li Dongsheng. Study on the diurnal variation of leaf thickness and its relations with ecological factors[J]. Journal of China University of Metrology, 2010, 21(3): 278—282. (in Chinese with English abstract)
- [9] 田英, 倪细炉, 于海宁, 等. 6 种抗旱灌木叶片形态解剖学特征[J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 113—117. Tian Ying, Ni Xilu, Yu Haining, et al. Studies on drought resistance on morphology anatomical structure of leave of six species shrubs[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(22): 113—117. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孔云, 崔思然, 姚允聪, 等. 遮光对温室番石榴新梢和叶片形态及其光合特性的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(5): 127—130. Kong Yun, Cui Siran, Yao Yuncong, et al. Effects of shading on shoot and leaf morphology and photosynthetic characters of guava under greenhouse conditions[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(5): 127—130. (in Chinese with English abstract)
- [11] 江淑琼, 周守标, 刘坤, 等. 盐胁迫对石蒜叶片形态结构和生理指标的影响[J]. 生物学杂志, 2010, 27(5): 26—30. Jiang Shuqiong, Zhou Shoubiao, Liu Kun, et al. Effects of salt stress on morphological structure and physiological index of Lycoris radiata leaves[J]. Journal of Biology, 2010, 27(5): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李素坤, 张秋芝, 郝玉兰, 等. 玉米成熟期茎秆石蜡切片方法的研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(8): 3935—3937. Li Sukun, Zhang Qiuzhi, Hao Yulan. Research on the method of paraffin section of the corn stalk in its maturity stage[J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2010, 38(8): 3935—3937. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张文忠, 韩亚东, 杜宏娟, 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, yiele components at flowering stage in rice[J].

- Chinese J Rice Sci, 2007, 21(1): 99—102. (in Chinese with English abstract)
- [14] Wang D, Gartung J. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(11): 1787—1794.
- [15] 王小丽, 王君, 严志勇. 影响红外测温精度原因分析[J]. 中国电力教育, 2010(增刊 1): 559—560.  
Wang Xiaoli, Wang Jun, Yan Zhiyong. The reason of Affect the infrared temperature measurement precision[J]. China Electric Education, 2010(Supp.1): 559—560. (in Chinese with English abstract)
- [16] 黄河, 李志强, 段辉. 铂热电阻在测温电路中的实际应用[J]. 煤炭技术, 2009, 28(4): 47—49.  
Huang He, Li Zhiqiang, Duan Hui. Application of platinum thermoelectric couple in temperature-measuring circuit[J]. Coal Technology, 2009, 28(4): 47—49. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郭琳. 植物叶气温差及气孔开度活体测量方法的研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2010.  
Guo Lin. Influence of Blade-Air Temperature Difference, Blade Water Content and Stomatal Opening on Blade Thickness[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张赤军, 刘智. 介绍一种应用在温度检测系统中的新器件—XTR105[J]. 农业与技术, 2001, 21(6): 102—104.  
Zhang Chi Jun, Liu Zhi. Introduction of a temperature detection system used in the New device XTR105[J]. Agriculture and Technology, 2001, 21(6): 102—104. (in Chinese with English abstract)
- [19] 龚福民. 电流环接器 RCV420 及其应用[J]. 国外电子元器件, 2000(2): 22—24.  
Gong Fuming. Current loop connector RCV420 and its application[J]. Foreign Electronic Components, 2000(2): 22—24. (in Chinese with English abstract)
- [20] JJG617-96, 数字温度指示调节仪检定规程[S].  
JJG617-96, Digital temperature indicating controller device test procedures[S]. (in Chinese with English abstract)

## Development of leaf temperature measuring instrument and its application in plant leaf parameter measurement

Li Dongsheng, Guo Lin, Guo Chongchong<sup>\*</sup>, Guo Tiantai

(China Jiliang University College of Metrology & Measurement Engineering, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to explore the reveal water state of plant, and research the plant canopy-air temperature difference and leaf thickness variation, the leaf temperature measuring instrument was developed, meanwhile, the YI-201020 leaf thickness precision instrument and leaf temperature measuring instrument were applied to monitor the leaf thickness and leaf temperature of chilies and peanuts at different stages, then the correlations between plant canopy-air temperature difference and leaf thickness after taking ambient temperature into consideration were analyzed. The experimental results showed that: the sensor linearity was 1%, the return error was 0.02 V, the sensitivity was 0.04 V/°C, the resolution was 0.3°C, the maximum indication error of instrument in the range of 0~90°C was 0.27°C, and the expanded uncertainty was 0.41°C; the leaf thickness was in negative relationship with canopy-air temperature difference at every stage of the two plants, especially during the growth stage. The results in this paper provide a reference for the plant physics research.

**Key words:** equipments, design, experiments leaf temperature measuring, plant canopy-air temperature difference, leaf thickness, correlation