

日光温室番茄植株体温与气温差异研究

王 谦¹, 李胜利¹, 孙治强^{1*}, 陈景玲¹, 曹 静², 延 旭¹, 张 军¹

(1. 河南农业大学林学院园艺学院, 郑州 450002; 2. 广州气象卫星地面站, 广州 510640)

摘 要: 植物群体间隙的空气温度不能准确地反映植物体实际的温度。该文用热电偶测定了日光温室内番茄茎、叶、果实的温度与同高度空气温度的差异。结果表明, 日光温室番茄植株体温与同高度空气温度有明显的差异。不同部位二者差异不同。果实与空气温度差异最大, 其次是茎、叶。这样环境温度测定后, 结合植物体温与气温差异便可知植物体温。对番茄叶片测定了热时间常数, 其均值为 174 s, 绝对偏差为 73.1 s。热时间常数的测定, 间接测定了综合热阻项, 这为较难测定的植物表面传热热阻找到了一种易于得到的方式。

关键词: 日光温室; 番茄; 植物温度; 热时间常数

中图分类号: S16

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0185-05

王 谦, 李胜利, 孙治强, 等. 日光温室番茄植株体温与气温差异研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 185-189.

Wang Qian, Li Shengli, Sun Zhiqiang, et al. Difference between the tomato plant temperature and air temperatures in the solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 185-189. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

因为环境气温易于测量, 所以以往的农业气象研究普遍以植物群体内空气温度代表植物体温。如徐正进等^[1]在水稻群体生态环境研究中, 用自记温湿度计测群体温湿度; 杜宝华等^[2]在冬小麦冠层内二氧化碳浓度的变化规律研究中用 TL 系列玻璃热敏电阻测温; 申双和等^[3]、蔡焕杰等^[4]用通风干湿表研究棉花冠层微气象特征; 王秉昆^[5]等用通风干湿表测温, 研究热平衡与玉米高产高效关系; 林业上也有类似研究, 如刘和平等^[6]确定森林冠层空气动力学参数时, 也用通风干湿表测定林木群体内空气温度。这些测温仪器由于传感器体积大, 无法直接测定植物体温。罗卫红等^[7]研究南方温室黄瓜冬季蒸腾时, 使用热电偶测定温度, 但将热电偶安装于群体冠层高度上, 事实上测定的也是气温。另一种测定群体温度的方法是红外线测温仪, 如刘学著等^[8]在测定冬小麦水分胁迫系数时, 用 BAU-1 型红外测温仪测定群体温度。这种方法属于温度的间接测量, 必然会影响测温精度, 从而导致研究结果偏差。文献[9]用红外测温仪测定冬小麦温度时, 以距叶片 5 cm 和 50 cm 测得的温度分别代表叶温和冬小麦群体温度, 不同时间二者

测得的温度均不同, 仪器距被测物体的距离决定了测得的温度值, 而测得的温度是叶温还是群体空气温度没有确定依据。袁国富等^[10]估算冬小麦不同生育期最小冠层阻力时, 用手持式红外测温仪测定冠层温度, 预测冠-气温差与实际冠-气温差有 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 的波动。说明了红外法间接测量群体温度的不准确性。

据文献[11], 作物是变温有机体, 即其自身的温度趋向于其环境温度。作物体吸收的热量主要来自太阳辐射, 其体温是同环境进行能量交换的结果。这种能量交换又可以使作物地上部分的温度显著偏离于气温^[11]。

精确农业是现代农业的发展方向。日光温室管理精细化程度越来越高, 日光温室中作物的环境因子调控应尽可能准确地反映植物体本身的温度, 如低温时是否发生冷害, 用植物体温为指标势必比用群体内空气温度更直接, 所以有必要进行体温测量。热电偶传感器体积小, 对被测物体影响小, 适合要求精确温度测定的环境。Moshe 等^[12]研究了热电偶在叶温测量中的应用问题。S. Khabba^[13]等用热电偶测量玉米穗的温度。Thier-ry^[14]等用热电偶测量番茄叶片表面温度等, 预测粉虱的发生。这些研究说明了热电偶测定植物体温的可行性。温室内作物不同部位与环境温度的差异是不同的, 并且在一天中不同时间也是变化的, 了解这种规律, 就可以用较易测量环境温度, 得到植物不同部位的体温, 及时准确地反映环境对植物体的影响。另外, 测定叶片温度可以确定叶片的热时间常数^[11], 而热时间常数可用于计算叶片的综合热阻。由于热阻一般不易测定, 所以, 用叶片温度求热时间常数, 进而求综合热阻可以简

收稿日期: 2006-08-25 收稿日期: 2007-04-12

基金项目: 河南省重大科技攻关项目(0322010900)资助

作者简介: 王 谦(1963-), 男, 吉林省辉南人, 副教授, 博士研究生, 主要从事农业气象学研究。郑州 河南农业大学林学院园艺学院, 450002。Email: wangqianhau@163.com

*通讯作者: 孙治强, 教授, 博士生导师, 主要从事设施园艺方面的研究。郑州 河南农业大学林学院园艺学院, 450002。

Email: sunzq@public.zz.ha.cn

化对热阻的确定。

本文用热电偶测温仪初步研究日光温室环境下番茄植株不同部位体温与气温的变化规律,并初步研究番茄叶片的热时间常数。以期使指导温室环境控制的温度指标更紧密结合植物本身的需求,为温室环境研究奠定理论基础。

1 材料和方法

1.1 温室与仪器

本试验在河南省郑州市(34.5°N, 113.5°S)西北郊绿金园内进行,温室长 70 m,跨度 10 m,前屋面为钢架结构,无滴膜覆盖。北墙厚度为 60 cm,内部为 24 cm 红砖墙,外部为 12 cm 红砖墙,中间为土壤填充。

温室管理:气温达到 30℃以上时放风,先打开前屋面顶窗通风设施,温度继续增高时,打开后墙通风口。温度若再升高,打开前屋面腰窗的棚膜。下午温度降至 18℃左右关闭风口,先关闭后墙通风口,温度再下降则关闭前屋面腰窗和顶窗通风设施。室外气温稳定在 12~13℃以上时,不关闭风口。夜间温室盖草苫保温。一般在上午 7~8 h 揭苫,下午 17:30~18:30 盖苫。阴天揭苫推迟,盖苫提前。

测温仪器为 CID(北京)生态科学仪器有限公司生产的 CB-0231 热电偶测温仪,该仪器传感器为探针式,体积小,本身热容量小,所以,测温时对被测物体温度影响小,适于快速追踪测量微小生物体温度的连续变化。该仪器显示分辨率为 0.01℃。为了确定该仪器的测温精度,在实验室内对该仪器与正式用于地面气象观测的玻璃液体温度表进行了对比试验。尽管玻璃温度表感应部分体积较大,所以会影响果实温度,但在稳定少变的空气温度下,持续足够时间,果实与两仪表的测温探头必将达到热平衡而处于相同温度下,当仪器示度稳定时读数。对测定的气温和番茄果实温度分别进行了对比检验,结果测温精度为 0.2℃。

1.2 监测方法

1) 体温-气温差监测

测点选在温室中部、南北行向的中间(距后墙 5 m),选择一株长势有代表性的番茄植株。由于室内影响作物生长发育的温度环境以低温为主,而室内温度较低的时段主要发生在傍晚至次日清晨。而且,植物体温-气温差正负转折也在此时段发生。故观测于下午最高温度出现后开始,至盖苫后一段时间温度稳定后结束;早晨于揭苫前 2 h 开始测定,至揭苫后 2 h 气温稳定上升时结束。每次连续测定 4 h。

热电偶传感器测点距地面高度:

① 外活动面(用冠层分析仪测得茎叶最密集处)主

茎(104 cm)

② 第一节果实(42 cm)

③ 外活动面叶上表面(104 cm)

④ 茎最上端(150 cm)和最下端内活动面(即地面附近)主茎(8 cm)

体温测定时传感器探针刺入植物体表皮下,同高度的群体内气温探针置于空气中。

测定时间及天气如下。

① 2006 年 2 月 22 日,晴转多云。16:43 开始自动采集茎表面温度,测点 104 cm 高(株高 127 cm)。17:30 盖苫。2 月 23 日,多云。5:37 开始自动采集茎表面(104 cm)温度,7:40 揭苫。

② 2006 年 2 月 24 日,多云。16:56 开始自动采集果实温度,测点高度:42 cm,盖苫时间:17:40。2 月 25 日,多云。5:7 开始自动采集果实温度,揭苫时间:7:40。

③ 2006 年 3 月 2 日,晴天。早晨 5:38 开始自动采集叶片温度,测点高度 104 cm,揭苫时间 7:30。

④ 2006 年 3 月 3 日,晴天。14:45 开始自动采集距地面 8 cm 和 150 cm 茎温。

⑤ 2006 年 3 月 7 日,晴天。05:31 开始自动采集距地面 8 cm 和 150 cm 茎温。

2) 热时间常数的计算

在叶片温度随环境温度上升或下降时,叶温变化量随时间呈指数规律变化,据文献[11],叶温 T_l (℃) 开始在平衡温度 T_{e1} (℃) 下,由于环境的变化又达到一新的平衡温度 T_{e2} (℃),可以导出

$$T_l = T_{e2} - (T_{e2} - T_{e1}) \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \quad (1)$$

式中 τ ——热时间常数, s; t ——时间, s。 τ 表示在一变化的环境中植物组织温度跟踪环境温度的情况。它依赖于植物器官的形状、植物组织热容量、气孔阻抗, τ 可表示为

$$\tau = \frac{\rho^* \cdot C_p^* \cdot l^*}{\rho_a \cdot C_p \left[\frac{1}{r_{HR}} + \frac{\Delta}{\gamma(r_{aw} + r_{lw})} \right]} \quad (2)$$

式中 ρ^* ——叶组织的密度, kg/m³; C_p^* ——叶组织的比热, J/(kg·K); l^* ——叶片体积和面积的比值, m; ρ_a ——空气的密度, kg/m³; C_p ——空气定压热容量, J/(kg·K); r_{HR} ——辐射和对流热阻, s/m; r_{aw} 和 r_{lw} ——分别为空气对水汽和叶对水汽传输的阻抗, s/m; Δ ——饱和水汽压曲线的斜率, Pa/K; γ ——湿度计常数, Pa/K。 $\frac{1}{r_{HR}} + \frac{\Delta}{\gamma(r_{aw} + r_{lw})}$ 为综合热阻项, 这里用 R 表示。

有了 τ 值,则根据(3)式^[11],可得

$$R = \frac{\rho^* \cdot C_p^* \cdot l^*}{\rho_a C_p \tau} \quad (3)$$

式中 R ——综合热阻, m/s。

在测定了番茄的叶片密度和热容量的情况下,可以求出此综合热阻项的数值。

定压热容量的测定可据文献[15],用热平衡法测定。

将(1)式,变为

$$\tau = \frac{l}{\ln \left[\frac{T_{e2} - T_{e1}}{T_{e2} - T_1} \right]} \quad (4)$$

用(4)式可计算番茄叶片热时间常数。

2 结果分析

2.1 植物体温与群体温度的差异

1) 茎-气温度差

早晨茎与空气温度差异不大,平均为 0.5°C ,茎温高于气温。7:30揭苫,温度明显下降。可以看出气温先下降,茎温滞后于气温,从观测数据中得7:30揭苫后,气温于7:51分达最低值,茎温在7:59分达最低值,滞后8 min。在增温过程中气温于8:38分超过了茎温,显示了白天植株除了通过吸收太阳辐射得到热量而升温外,还与空气间进行热交换而得到热量(图1)。

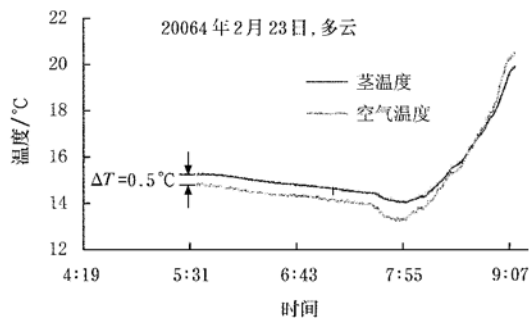


图1 早晨茎温度与同高度空气温度

Fig. 1 Contrast of the stem temperature and the air temperature in the morning

傍晚盖苫前气温和茎温均下降,观测到的茎温与气温温差为 2.6°C ,比早晨要大得多。盖苫后两者温度均有上升。空气温度上升幅度大,茎温度上升幅度小。这一点与早晨揭苫时温度变化有类似之处。盖苫后持续一段时间茎温气温均降低到了盖苫时的温度。茎温气温差稳定在 0.7°C ,以后差值逐渐变小,直到早晨的 0.5°C (图2)。

2) 叶-气温差

相同高度的叶温与气温差异早晨平均为 0.7°C ,与茎-气温差相当,这与一般认为叶气温差小于茎气温差

的观点不同(图3)。

3) 果实温度-气温差

果实体温与气温差异显著高于叶-气温差、茎气温差。早晨平均为 1.0°C (图4),下午盖苫前为 4.4°C (图5),盖苫后一段时间为 2.3°C 。盖苫时,气温波动显著,而果温波动非常小。

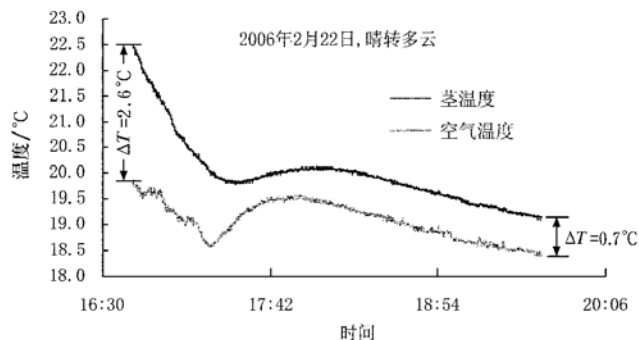


图2 傍晚茎温度与同高度空气温度

Fig. 2 Contrast of the stem temperature and the air temperature towards evening

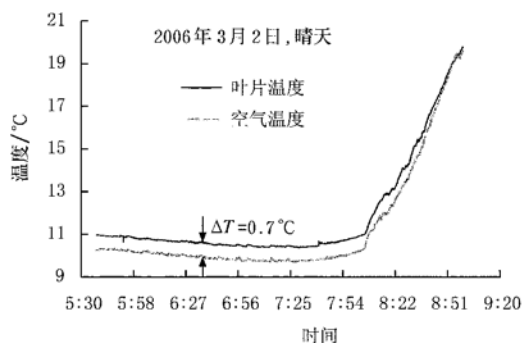


图3 早晨叶片温度与同高度空气温度

Fig. 3 Contrast of the leaf temperature and the air temperature in the morning

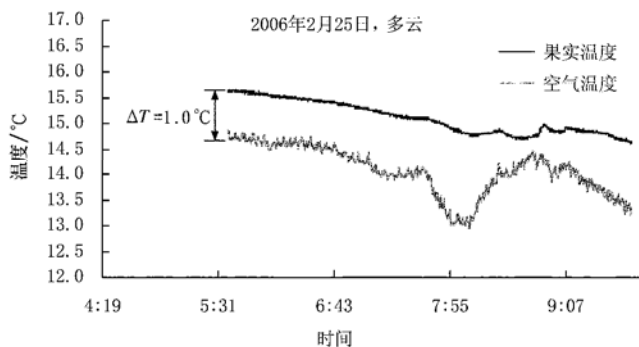


图4 早晨果实温度与同高度空气温度

Fig. 4 Contrast of the fruit and the air temperature in the morning

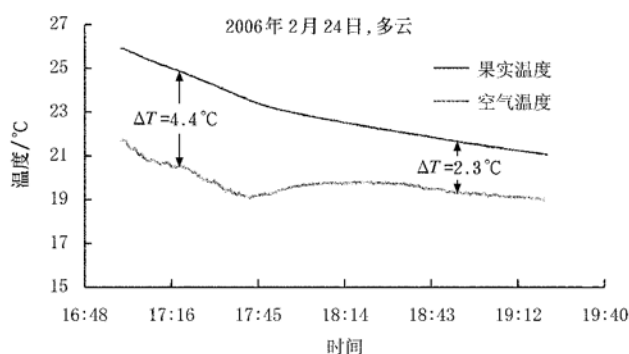


图5 傍晚果实与同高度空气温度

Fig. 5 Contrast of the fruit temperature and the air temperature towards evening

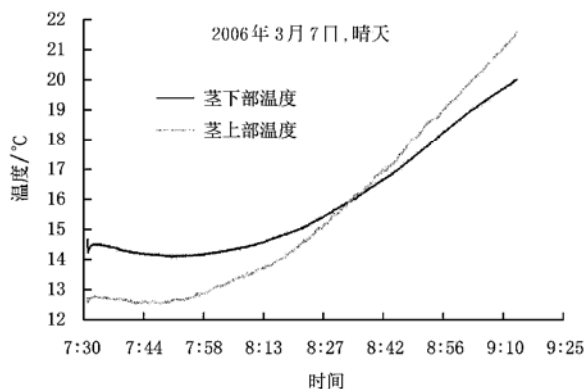


图6 早晨茎上下部温度对比

Fig. 6 Contrast of the temperature at above and below parts of the stem in the morning

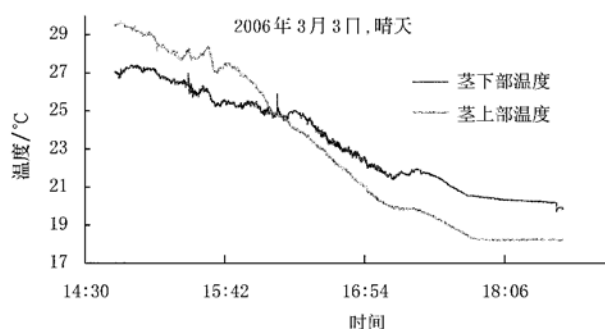


图7 傍晚番茄茎上下部温度对比

Fig. 7 Contrast of the temperature at above and below parts of the stem in the afternoon

4) 茎上、下部温度对比

观测时段内茎上下部温度差异最大值在 2℃ 左右, 一个明显的特点是: 茎上下部温度高低对比出现转换的时间, 正是揭盖苫前后。早晨是揭苫后, 先下部温度高, 以后上部温度升温快, 超过下部 (图 6); 傍晚是盖苫前温度转变, 由上部高转为下部温度高 (图 7)。

2.2 热时间常数

用 2006 年 3 月 2 日早晨 5:38 开始自动采集的叶片温度, 按公式 (4) 计算热时间常数。由于仪器设计为每秒监测一个数据, 数据较密, 而仪器输出的数据每 100 s 数据为一组, 为计算方便取每 100 s 平均值计算, 得到番茄叶片的热时间常数结果如图 8, 除个别数据偏大外, 数据稳定在均值 172 s 附近。对热时间常数与时间作线性回归, 得图 8 中回归直线和回归方程, 可见回归直线的斜率很小, 热时间常数与观测时间的相关系数也非常小。在观测的 245 min 时间内, 按回归直线计算, 热时间常数总变化量为 60 s。这说明了所计算出的热时间常数的可靠性。其统计量如表 1。

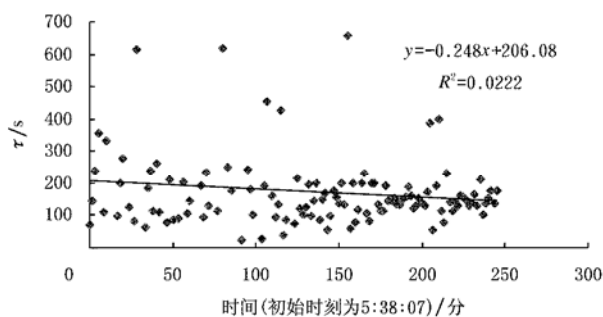
图8 计算的番茄叶片热时间常数 τ

Fig. 8 Calculated heat time constant of the tomato leaf

表1 番茄叶片的热时间常数统计值

Table 1 Statistic values of the heat time constant of tomato leaf

样本数	热时间常数均值/s	绝对偏差/s	标准差/s
121	172	73.1	117.9

由于时间常数不表现为时间趋势项, 因而综合热阻项在 7:30~9:50 和观测时段内也不表现为时间趋势项, 因式 (2) 右边各项除 τ 外, 对于固定的叶片各参数均为定值。

3 结论和讨论

1) 观测表明, 日光温室番茄植株体温与同高度空气温度有明显的差异。不同部位二者差异不同。果实与空气温度差异最大, 其次是茎、叶。且均为植物体温高于同高度气温。彭致功^[16]研究了茄子冠气温差与水分的关系, 结果冠-气温差均为负值, 这里的研究结果与之有明显的不同。

2) 揭、盖苫后引起温室内温度波动, 气温波动大, 植物体温波动小; 而植物体温波动以茎最明显。

3) 茎的上部和下部温度对比在清晨和傍晚时段均有一次高低转换。早晨是揭苫后, 先下部温度高, 以后上

部温度升温快,超过下部;傍晚是盖苫前温度转变,由上部高转为下部温度高。

4) 番茄叶片热时间常数在观测的时段内随时间变化比较稳定,而除个别数据偏大外,数据稳定在其均值172 s附近。由于热时间常数易于测量,热阻不易测量,因而热时间常数的测定,间接测定了综合热阻项,所以热时间常数测定有意义。

5) 文献[11]指出,低的热传导率和叶两面辐射量的不同,会导致叶片的上下表面温度不同,使上表面的温度大大高于下表面温度。本文所测为叶上表面的温度。

6) 文献[11]认为除大的叶片外,叶的 τ 值一般小于1 min,这里测得的时间常数大于1 min,可能与番茄叶片较大有关。

[参 考 文 献]

- [1] 徐正进,陈温福,张龙步,等.不同穗型水稻群体生态环境的比较研究[J].植物生理学通讯,1996,32(3):191-195.
- [2] 杜宝华,全乘风,杨 平,等.冬小麦冠层内二氧化碳浓度的变化规律[J].中国农业气象,1996,17(6):24-29.
- [3] 申双和,李秉柏.棉花冠层微气象特征研究[J].气象科学,1999,19(1):50-56.
- [4] 蔡焕杰,康绍忠.棉花冠层温度的变化规律及其用于缺水诊断研究[J].灌溉排水,1997,16(1):1-5.
- [5] 王秉昆,刘 江,戴俊英,等.热平衡与玉米高产高效关系的分析研究[J].玉米科学,1996,4(3):54-60.
- [6] 刘和平,刘树华,朱廷曜,等.森林冠层空气动力学参数的确定[J].北京大学学报,1997,33(4):522-528.
- [7] 罗卫红,汪小昆,戴剑峰,等.南方现代化温室黄瓜冬季蒸腾测量与模拟研究[J].植物生态学报,2004,28(1):59-62.
- [8] 刘学著,张连根.基于冠层温度的冬小麦水分胁迫指数的实验研究[J].应用气象学报,1995,6(4):449-453.
- [9] 赵春江,黄文江,王之杰.不同水肥处理下冬小麦冠层含水率与温度关系的研究[J].农业工程学报,2002,18(2):25-28.
- [10] 袁国富,罗 毅,唐登银,等.冬小麦不同生育期最小冠层阻力的估算[J].生态学报,2002,22(6):930-934.
- [11] 韩湘玲.作物生态学[M].北京:气象出版社,1991:40-42.
- [12] Moshe Tarnopolsky, Ido Seginer. Leaf temperature error from heat conduction along thermocouple wires [J]. Agricultural and forest meteorology, 1999, 93: 185-194.
- [13] Khabba S, Ledent J F, Lahrouni J. Development and validation of model for estimating temperature within maize ear[J]. Agricultural and forest meteorology, 2001, 106: 131-146.
- [14] Thierry Boulard, Marie Mernier, Jacques Jargues, et al. Tomato leaf boundary layer climate: implications for microbiological whitefly control in greenhouses [J]. Agricultural and forest meteorology, 2002, 110: 159-176.
- [15] 易维明.生物质比热容的测量方法[J].山东工程学院学报,1996,10(1):7-10.
- [16] 彭致功,杨培岭,段爱旺,等.日光温室茄子冠气温差与环境因子之间的关系研究[J].华北农学报,2003,18(4):111-113.

Difference between the tomato plant temperature and air temperatures in the solar greenhouse

Wang Qian¹, Li Shengli¹, Sun Zhiqiang^{1*}, Chen Jingling¹, Cao Jing², Yan Xu¹, Zhang Jun¹

(1. Forestry and Horticulture College, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Guangzhou Meteorological Satellite Ground Station, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The temperature difference between the stem, leaf, fruit of tomato and the air at the same height was measured using the thermocouple temperature instrument, and the heat time constant of the tomato leaf was calculated. The result shows that the difference was clear, which was different at different parts of the plant. Fruit had the biggest temperature difference with the air at the same height whereas stem and leaf had the lower difference. The heat time constant of the tomato leaf was 172 s, whereas the absolute deflection is 73.1 s. The heat time constant is valuable because it is easier to be measured than the heat resistance and the general heat resistance can be obtained through its measurement.

Key words: solar greenhouse; tomato; plant temperature; heat time constant