

基于冠层叶-气温差的温室土壤水分诊断

刘 婵^{1,3}, 范兴科^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 根据对日光温室条件下番茄全生育期的冠层温度、气温、土壤水分以及一些相关气象因素测定, 分析了冠层叶-气温差与土壤容积含水率、湿度之间的关系。结果表明: 在日光温室条件下, 番茄全生育期内冠层叶-气温差的日变化呈曲线分布, 冠层叶-气温差的最高值出现在每天的 13:00~15:00 之间。通过对主要生育期 13:00~15:00 的数据分析发现, 冠层叶-气温差(ΔT)与土壤容积含水率(SW)以及棚内湿度(RH)之间有较好的复相关关系, 结合容积含水率与湿度对冠层叶-气温差的综合影响, 可以得出 ΔT 与 SW 呈负相关关系, 与 RH 呈正相关关系, 相关系数 R^2 为 0.778。通过偏相关分析, 冠层叶-气温差与容积含水率的相关性最大, 呈负相关关系, 相关系数 R^2 为 0.778, 并通过数据验证, 实测值(Y)与模拟值(X)相关性较好, 相关系数 R^2 为 0.723。因此可通过监测 13:00~15:00 的冠层叶-气温差来了解作物的水分状况, 为农田土壤水分诊断提供科学依据。

关键词: 番茄; 冠层叶-气温差; 容积含水率; 气象因子; 蒸腾蒸发量

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-7601(2012)01-0090-04

水分是制约作物生长发育的重要环境因子, 其对作物的产量和品质有着重要的影响。水分亏缺不仅会造成作物减产, 而且还会影响其生理代谢, 降低其品质, 因而对作物水分状况的研究具有重要的意义。在作物的生长发育过程中, 水分不仅参与作物的生理代谢过程, 而且还对植株体温的调节具有重要的影响, 主要通过作物叶面的蒸腾作用调节其体温, 因而可以通过作物冠层温度变化来对其水分状况进行研究。早在 1963 年, Tanner^[1]就利用红外测温仪测定作物冠层温度, 以此来监测作物水分状况, 并指出冠层温度是反映作物水分状况的良好指标。作物冠层温度是由土壤-植物-大气连通体内的热量和水汽流决定的, 它反映了作物和大气之间的能量交换, 作物冠层温度与其能量的吸收和释放过程有关^[2]。近年来随着红外测温技术的发展, 通过冠层温度的变化来监测作物的水分状况越来越受到人们的关注, 冠层叶-气温差也成为观测土壤水分状况的重要指标。作物的冠层温度受气象环境的影响较大, 温室条件下的气象环境与大田差异较大。近年来对大田通过冠层叶-气温差来预报土壤水分的研究较多, 而对温室等设施农业条件下的研究较少。随着农业经济的发展, 温室作物越来越受到人们的关注, 因而本试验主要研究日光温室下作物的冠层叶-气温差与土壤水分的关系, 为作物灌溉决策提

供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2007 年 12 月至 2008 年 6 月在中国科学院水土保持研究所节水示范园内的日光温室进行, 土壤类型为砂壤土, 耕层土壤容重为 1.25 g/cm^3 , 田间持水量 23.22%, 有机质含量 14 g/kg , 碱解氮 63 mg/kg , 速效磷 127 mg/kg , 速效钾 146 mg/kg , pH 值为 7.8。温室面积为 $8 \times 60 \text{ m}^2$, 供试品种为番茄金盆一号, 番茄种植行距为 45 cm, 株距为 35 cm, 在番茄根部铺设滴灌设备, 补充水分。根据前人研究结果^[3-4], 番茄在不同生长期有各自适宜的土壤水分范围, 因而在试验中对不同时期的番茄设置适应的土壤水分条件(占田间持水量的百分比), 分别是苗期 55%~90%, 开花坐果期 65%~95%, 坐果期 70%~95%, 当测定的土壤含水量低于设置的下限时则对番茄进行灌溉。

1.2 测定内容

1.2.1 温室小气候和土壤水分观测 在温室内选择里、中、外三个具有代表性的位置, 分别在其每行的中部埋设土壤水分传感器, 埋设三层, 深度分别为 5、15、25 cm, 通过水分传感器测定土壤含水率。同时, 每隔 15 d 左右采用人工取土烘干法测定土壤含

收稿日期: 2011-06-10

基金项目: “十二五” 863 计划课题“作物需水信息采集与智能控制灌溉技术”(2011AA100509); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介: 刘 婵(1986—), 女, 陕西渭南人, 在读硕士, 主要从事节水灌溉新技术研究。E-mail: liuchan511@163.com。

通讯作者: 范兴科(1964—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉新技术和灌溉产品开发。E-mail: gizk@vip.sina.com。

水率, 作为水分校正依据。考虑到试验是在温室大棚内进行, 日光温室所覆盖的薄膜对太阳辐射有一定影响, 所以本试验不设计太阳辐射测定, 由于棚内风速较小, 也可以忽略不计。但在相应位置的番茄顶部 1~ 1.5 m 处悬挂干湿温度计, 分别测定空气温度、湿度。

1.2.2 冠层温度的观测 冠层温度的测定选择晴天进行, 采用红外测温传感器进行测定, 一般每隔 1 h 测定一次。将红外测温传感器的探测窗口对向番茄冠层顶部, 使探测窗口与番茄冠层保持在 20 cm 左右的高度, 并通过联接的计算机记录测定的数据。为了确定番茄冠层温度的变化规律, 于每个生长阶段选择一个晴天日观测冠层温度的日变化, 观测时间为 6:00~ 18:00。

2 结果与分析

2.1 温室条件下棚内冠层叶- 气温差随时间的变化规律

根据土壤-植物-大气连续体(Soil- Plant- Atmosphere Continuum, 简称 SPAC) 理论, 水分经由土壤到达植物根系, 被根系吸收, 通过细胞传输, 进入植物茎, 由植物木质部到达叶片, 再由叶片气孔扩散到空气层, 最后参与大气的湍流变换, 形成一个统一的、动态的、互相反馈的连续系统。所以植物蒸腾作用的产生源于太阳辐射及环境条件, 通过蒸腾作用不仅实现了土壤养分向植物茎叶的输送, 完成各种生理和光合代谢, 而且有利于降低叶面温度, 避免由于高温而造成叶面烧伤, 而植物蒸腾所消耗的水分则需要作物根区的土壤水分补充。所以作物冠层温度除了受环境气象因子的影响外, 还受土壤含水率的影响, 因此了解冠层叶- 气温差的变化规律及其与土壤含水率之间的关系, 对于监测作物的水分供需状况十分重要。

为了确定番茄冠层叶- 气温差的日变化规律, 本研究通过选择典型晴天日, 对 6:00~ 18:00 的番茄冠层叶面、气温和湿度进行观测。试验主要选择了 2008 年 1 月 22 日、2 月 26 日、3 月 22 日、4 月 23 日和 5 月 23 日五个晴天日进行测定并对结果分析。图 1 为番茄冠层叶- 气温差的日变化图。

由图 1 可以看出, 冠层叶- 气温差 (ΔT) 的日变化形状呈现曲线分布, 主要在负值范围内变动, 在不同时间段内的变化规律性不同, 这主要是由于在上午 10:00 以前以及下午 16:00 之后, 由于外界温度较低, 大棚处于关闭状态, 而其他时间则处于打开状态, 所以 ΔT 受到环境因子的影响程度不同。

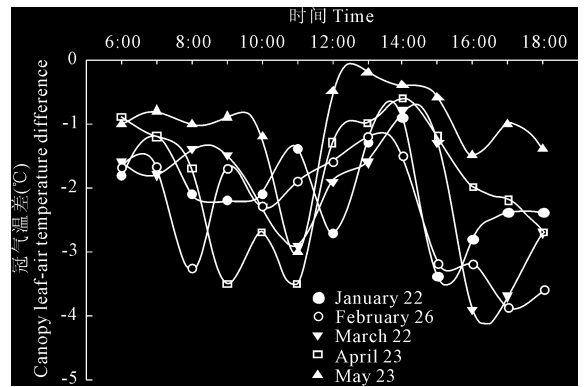


图 1 冠层叶- 气温差日变化

Fig. 1 The diurnal variation of canopy leaf-air temperature difference

一般在上午 9:00~ 10:00 以前, 一方面由于太阳辐射较弱, 使得番茄本身的蒸腾过程比较缓慢, 另一方面由于棚内湿度较高, 也可能抑制了作物的蒸腾产生, 因此冠层温度相对较高, 接近气温, 使得冠层叶- 气温差较高; 10:00~ 16:00 之间大棚部分打开通气, 大棚内外温度和水汽发生交换, 番茄的蒸腾作用进入正常状态, 冠层叶- 气温差受棚内环境影响出现起伏变化, 总体趋势表现为抛物线形状; 16:00 之后随着太阳辐射减弱和外界温度的降低, 大棚需关闭保温, 作物的蒸腾作用再次进入抑制状态, ΔT 有升高的趋势, 但随后冠层温度受到温度的影响较大, 降低较快, 从而使 ΔT 降低。因此比较在这三个时间段内的 ΔT 的变化情况, 只有在大棚处于打开的状态下才能准确反映作物的蒸腾状态。另外从图 1 还可以看到番茄 ΔT 在 13:00~ 15:00 时间段内最高, 表明在这段时间内番茄冠层的蒸腾作用相对较弱。其原因是由于在该段时间内环境气温较高, 番茄冠层温度要维持在一个相对较低的水平, 就必须通过叶面蒸腾消耗大量的水分降温, 然而可能由于土壤的水分供应不能完全满足作物实际蒸腾量的需求值, 就会导致气孔关闭, 减少蒸腾量, 使得番茄冠层温度随之上升, 造成冠层叶- 气温差升高, 这与大多数学者^[5-8]的研究一致。高鹭等^[9]还提出土壤含水率越低, 冠层叶- 气温差越偏向于正值, 并认为当冠层叶- 气温差为零时是作物缺水的界限。

对于冠层叶- 气温差的日变化也可以从图 2 的湿度的日变化图来解释, 图 2 湿度日变化的数据选取日期与图 1 相同。从图中可以看出湿度在早上温室大棚未打开时最大, 随着时间的推移大棚逐渐打开, 湿度也随着逐渐降低, 在 13:00~ 15:00 时间段内达到最低, 之后随着气温的降低, 大棚逐渐关闭, 湿度又逐渐增加。根据图 1 和图 2 的对比可以看

出,在上午 10:00 之前,光照强度和气温较小,大棚处于关闭状态,而此时的湿度值最大,抑制作物的蒸腾,使得冠层温度增加,冠层叶-气温差值较高;10:00 之后随着大棚的打开,蒸腾增加,冠层叶-气温差逐渐降低,但从图 1 中可以看出在 11:00 之后冠层叶-气温差又逐渐升高,而图 2 中的湿度却在逐渐降低,这主要是由于在中午时分,随着湿度降低,蒸腾虽然在不断增加,但作物的蒸腾却要受到土壤水分的限制,而且随着光照强度和气温的增加,冠层温度迅速增加,接近气温,冠层叶-气温差在 13:00~15:00 达到最高;在 15:00~16:00 之间冠层叶-气温差逐渐降低,可能是由于在该段时间内大棚处于打开状态,蒸腾依然强烈,但由于光强和气温的降低,使得冠层温度降低,从而导致冠层叶-气温差降低;而到 16:00 以后,随着大棚的逐渐关闭,湿度增加,光强和气温也在迅速降低,从而使得蒸腾量降低,冠层温度升高,冠层叶-气温差也缓慢升高,但由于气温迅速降低的影响,冠层叶-气温差随之又降低。

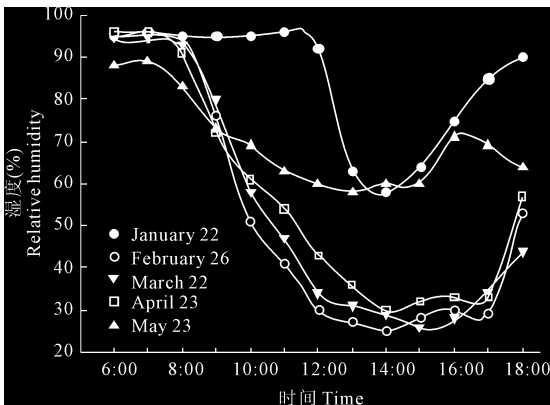


图 2 湿度日变化

Fig. 2 The diurnal variation of relative humidity

根据上述分析,可以通过 13:00~15:00 时间段内的冠层叶-气温差来预测土壤水分。选择这段时间主要是因为中午时分,大棚打开,内外空气发生对流,空气湿度降低,饱和差增大,气温和光照强度达到最大,而且在该时段内大棚内作物的蒸腾量最大,如果这个时间段内的土壤水分能够满足作物的生长需求,那就表明作物在全天的生长过程中不受水分的限制。

2.2 冠层叶-气温差与环境因子之间的关系

2.2.1 冠层叶-气温差与湿度和土壤含水率之间的关系

冠层叶-气温差除了受作物水分的作用外,还受气象因子的影响。通过 2008 年观测到的湿度(RH %)因子,与同时期的冠层叶-气温差

(ΔT)、土壤容积含水率(SW)进行多元回归分析,发现他们之间有很好的复相关关系,方程式如式(1):

$$\Delta T = 6.912 - 56.32 SW + 0.003 RH \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.778, n = 40, F = 65.02 > F_{0.01}(2, 38)$$

$$= 5.21, P < 0.01)$$

从公式(1)中可以看到土壤容积含水率与冠层叶-气温差呈负相关关系,而湿度与冠层叶-气温差呈正相关关系,这主要是由于随着土壤含水率的增加,作物蒸腾量增加,而冠层温度与蒸腾量呈负相关关系,所以冠层温度随之降低,冠层叶-气温差减小,因而两者呈现负相关关系;湿度主要是通过调节空气饱和水汽压差来影响冠层温度。随着空气湿度的增加,作物蒸腾量减小,从而使冠层温度升高,冠层叶-气温差增大,所以两者呈正相关关系。通过偏相关分析得冠层叶-气温差(ΔT)与湿度(RH)和土壤容积含水率(SW)的偏相关系数分别为 0.039 和 -0.870,通过比较各因子与冠层叶-气温差的偏相关系数,可以看出土壤容积含水率对冠层叶-气温差的影响最大。

2.2.2 冠层叶-气温差与土壤容积含水率之间的关系 通过分析发现冠层叶-气温差(ΔT)与容积含水率(SW)的相关性较其他环境因子好,这与孟平^[10]、陈佳^[11]等的研究一致。本试验主要目的是通过冠层叶-气温差来预测土壤容积含水率,为农田作物水分诊断提供依据,所以通过对 2008 年上半年 14:00 的番茄试验相关数据分析发现,日光温室番茄的冠层叶-气温差(ΔT)与容积含水率(SW)有较好的负相关关系,如图 3。

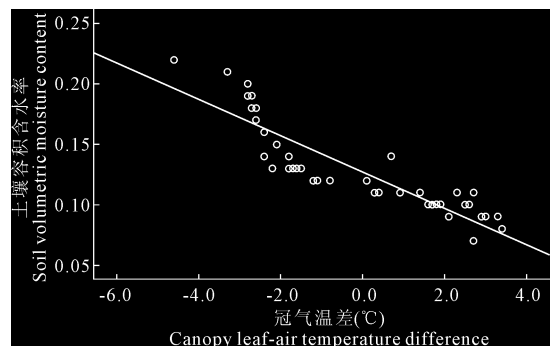


图 3 番茄土壤容积含水率与冠层叶-气温差的关系

Fig. 3 The relationship of tomato's soil volume moisture content and canopy leaf-air temperature difference

通过番茄土壤容积含水率与冠层叶-气温差的关系图可以看出两者有着较好的负相关关系,如同前面分析,主要是由于随着土壤含水率的增加,土壤水吸力降低,作物根系从土壤中吸水变得更容易,吸

水效率提高, 随着外界气温的提高, 作物蒸腾量增加, 从而使冠层温度降低, 冠层叶- 气温差值减小, 所以两者呈负相关关系, 通过回归分析可以得出方程式(2):

$$SW = -0.015 \Delta T + 0.127 \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.778, n = 49, F = 164.7 > F_{0.01}(1, 48) = 7.2, P < 0.01)$$

以上分析可以看出, 土壤容积含水率(SW)与冠层叶- 气温差(ΔT) 有较好的负相关关系, 为了验证方程的可靠性, 可以通过一些已观测到的数值来模拟验证, 如图 4 所示。

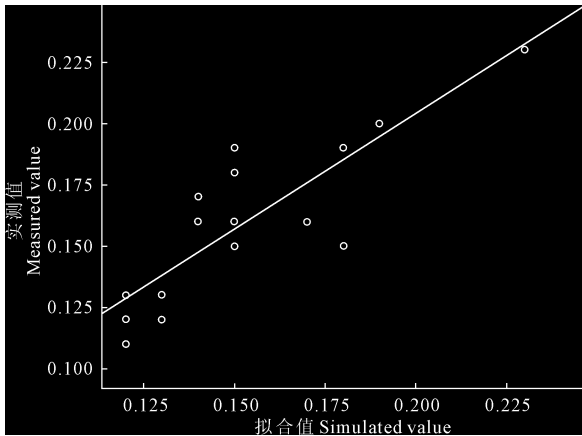


图 4 土壤容积含水率实测值和拟合值的比较

Fig. 4 Comparison between the measured and the calculated soil volume moisture content

由图 3 可以看出番茄土壤容积含水率实测值(Y)和模拟值(X) 有较好的线性相关性, 通过回归分析得出方程式(3):

$$Y = 0.016 + 0.941X \quad (3)$$

$$(R^2 = 0.723, n = 20, F = 47.0 > F_{0.01}(1, 19) = 8.18, P < 0.01)$$

以上分析结果表明, 可以采用 13:00~15:00 时间段内的冠层叶- 气温差来预测土壤水分状况, 这为农田实现高效灌溉提供理论依据。

3 结 论

本试验主要针对在日光温室下研究番茄的冠层叶- 气温差与土壤容积含水率的关系, 根据数据分

析发现冠层叶- 气温差的日变化虽然呈现曲线分布, 但在大棚打开期间, 其整体趋势满足抛物线结构, 而且冠层叶- 气温差的最高值出现在 13:00~15:00 左右, 这与其他学者的研究一致。

通过试验分析发现晴天的冠层叶- 气温差与湿度和土壤容积含水率有较好的复相关关系, 但通过偏相关分析土壤容积含水率对冠层叶- 气温差的影响最大, 两者的关系为负线性相关关系, 并通过 0.01 显著性检验, 该关系式并通过了其他时间的数据验证, 相关性显著。因而可以通过 14:00 的冠层叶- 气温差来预测土壤水分变化, 及时补给水分。

本试验主要研究了番茄在生长阶段的整体情况, 没有涉及到各个生育阶段的研究, 作物的冠层温度变化规律不仅与土壤含水率和气象因素有关, 还与其生长发育阶段有关系, 因而对于这一方面的研究还有待于进一步提高。

参 考 文 献:

- [1] Tanner C B. Plant temperature[J]. Agronomy Journal, 1963, 55: 210-211.
- [2] 梁银丽, 张成娥. 冠层温度-气温差与作物水分亏缺关系的研究[J]. 生态农业研究, 2000, 8(1): 24-26.
- [3] 王贺辉, 赵 恒, 高 强, 等. 温室番茄滴灌灌水指标试验研究[J]. 节水灌溉, 2005, (4): 22-23.
- [4] 曾向辉, 王慧峰. 温室西红柿滴灌灌水制度试验研究[J]. 灌溉排水, 1999, 18(4): 23-26.
- [5] 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.
- [6] 史宝成, 刘 钰, 蔡甲冰. 冠层温度指导冬小麦灌溉的试验研究[J]. 节水灌溉, 2008, (4): 11-14.
- [7] 黄晓林, 李 妍, 李国强. 冠层温度与作物水分状况关系研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(4): 1511-1512.
- [8] Patel NR, Mehta AN, Shekh AM. Canopy temperature and water stress quantification in rainfed pigeonpea[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 109(3): 223-232.
- [9] 高 馨, 陈素英, 胡春胜. 喷灌条件下冬小麦冠层温度的试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 1-4.
- [10] 孟 平, 张劲松, 高 峻, 等. 苹果树冠层-空气温差变化及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2030-2034.
- [11] 陈 佳, 张文忠, 赵晓彤, 等. 水稻灌浆期冠-气温差与土壤水分和气象因子的关系[J]. 江苏农业科学, 2009, (2): 284-285.

(英文摘要下转第 137 页)

Effects of different cultivation and balanced fertilization on spring wheat yield and water use efficiency in semiarid areas

ZHANG Ping-liang^{1,2}, GUO Tian-wen^{1,2,3}, HOU Hu-zhi^{1,2}, LU Jun-feng^{1,2}

(1. Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Key laboratory of High Efficiency Water Utilization in Dry Farming Region, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Key Laboratory of Northwest Drought-resistant Crop Farming, Ministry of Agriculture, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Field trials were conducted to study different cultivation and balanced fertilization on wheat yield and water use efficiency in semiarid areas. The results showed that cultivation of the whole film casing mode bunch helped synthesis of carbohydrates of wheat plants and increased dry matter accumulation, and the effect of implementation of N, P and K fertilization was obvious; Compared with whole film a small furrow bunch, whole film not overburden bunch and open field dibble, wheat yield increased by 3.7% ~ 6.7%, 9.4% ~ 10.3% and 30.7% ~ 35.4% in the whole film casing mode bunch; In the application of respectively 180 kg/hm², 120 kg/hm² and 90 kg/hm² of N, P₂O₅ and K₂O (Z₀F₁ treatment), the wheat yields were the highest, achieving 4 034 kg/hm²; The water use efficiency of wheat in the whole film casing mode bunch was significantly higher than that of the open field dibble, increased by as significantly as 33.7% ~ 48.3% at the same level of fertilization. These show that balanced fertilization can significantly increase grain yield, and increase water use efficiency in the whole film casing mode bunch.

Keywords: cultivation; whole film casing mode bunch; balanced fertilization; water use efficiency

(上接第 93 页)

Diagnosis of soil moisture in greenhouse based on canopy leaf-air temperature difference

LIU Chan^{1,3}, FAN Xing-ke^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to measured result of canopy temperature, air temperature, soil moisture and some relevant meteorological factors during tomato's whole growth in sunlight greenhouse conditions, analysis was made respectively of the relationship between canopy leaf-air temperature difference and soil water content and relative humidity. The result showed that: In the sunlight greenhouse condition, there were some peaks in the diurnal curve of canopy leaf-air temperature difference from tomato's seedling stage to fruiting period, and the maximum of canopy leaf-air temperature difference's value appeared during 13 00~ 15 00 each day. According to the data at 13: 00~ 15: 00 in tomato's main growth period, we found that there was a significantly good correlation among canopy leaf-air temperature difference (ΔT), water content (SW) and relative humidity (RH), combined with water content and relative humidity on the comprehensive influence of the ΔT . We can get a result which is the ΔT has a negative relationship with water content and has a positive with relative humidity, R^2 is 0.778. By partial correlation analysis, we concluded that the SW was the most important factor which affected ΔT , which was a negative linear correlation equation, and the R^2 is 0.778. After validated with the measured data, it was found that the measured SW (Y) was well correlated with the simulated one (X), and R^2 is 0.723. Therefore, we could get scientific basis for diagnosis of farmland soil moisture from the water status data which was monitored from canopy leaf-air temperature difference at 13 00~ 15 00.

Keywords: tomato; canopy leaf-air temperature; soil volumetric moisture content; meteorological factor; evapotranspiration