

DOI:CNKI:61-1390/S.20111216.1116.005

网络出版时间:2011-12-16 11:16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111216.1116.005.html>

水分对温室盆栽番茄叶片光响应特性的影响

陈凯利, 李建明, 贺会强, 韩瑞锋, 孙三杰, 姚勇哲

(西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】探讨水分对番茄叶片光响应特性的影响,为番茄栽培提供科学用水依据。【方法】以番茄品种“金棚 1 号”为材料,采用盆栽方式,分别按照单株日蒸腾蒸发量(ET)的 50%, 75%, 100% 和 125% 作为补充灌溉量设置 4 个水分处理,并利用 Li-6400XT 便携式光合仪测定番茄叶片的光响应曲线。【结果】随着灌溉量的增加,番茄叶片的净光合速率(P_n)、最大光合速率(P_{max})、光饱和点(LSP)、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)均呈现出增加的趋势,其中以 125% ET 处理的最高;水分利用效率(WUE)、叶片饱和水汽压亏缺(V_{pdl})、叶片温度(T_l)、气孔限制值(L_s)则呈下降趋势,其中以 50% ET 处理的最低;表观量子效率(α)、光补偿点(LCP)则呈先上升后下降的趋势。随着光合有效辐射强度(PAR)的增加,番茄叶片的 P_n 、 Tr 、 G_s 、 WUE 、 L_s 均呈先迅速升高后缓慢升高甚至下降的趋势; C_i 先急剧下降,后基本保持平稳; V_{pdl} 和 T_l 先略有下降后逐渐上升。【结论】气孔限制因素是水分影响番茄叶片光合作用的主要因素。按照 ET 的 125% 补充灌溉量,可明显提高番茄叶片的 P_n ,降低 WUE 。

【关键词】 补充灌溉量;水分;番茄;光响应特性;气孔限制;水分利用效率

【中图分类号】 S641.207+.1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)01-0157-07

Effect of water on characteristics of light response of tomato leaves in greenhouse

CHEN Kai-li, LI Jian-ming, HE Hui-qiang, HAN Rui-feng,
SUN San-jie, YAO Yong-zhe

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 In order to provide basis for theoretical water management of tomato cultivation, the effect of water on characteristics of light response of tomato leaves was discussed. 【Method】 With tomato “Jinpeng No. 1” as the experimental materials, and under the different water supplementary irrigation treatments of 50%, 75%, 100% and 125% of evapotranspiration for plant, the light response characteristics of tomato leaves were measured by Li-6400XT. 【Result】 With the increase of irrigation amount, net photosynthetic rate (P_n), light-saturated photosynthetic rate (P_{max}), light saturation point (LSP), transpiration rate (Tr), intercellular CO_2 concentration (C_i) and stomatal conductance (G_s) of tomato leaves all rose, and they were the highest under the supplementary irrigation treatment at 125% of evapotranspiration. While water use efficiency (WUE), leaf vapor pressure deficit (V_{pdl}), leaf temperature (T_l), stomatal limitation value (L_s) decreased, under the supplementary irrigation treatment at 50% of evapotranspiration, they were the lowest. At the same time, apparent quantum yield (α) and light compensation point (LCP) increased first and then decreased. With the increase of photosynthesis active radiation (PAR), P_n ,

* [收稿日期] 2011-06-30

[基金项目] 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD12B03-3)

[作者简介] 陈凯利(1987—),女,四川巴中人,在读硕士,主要从事设施园艺栽培生理生态研究。E-mail: cklzz369@163.com

[通信作者] 李建明(1966—),男,陕西洛川人,教授,博士,硕士生导师,主要从事设施园艺栽培与生理生态研究。

E-mail: lijianming66@163.com

Tr , G_s , WUE and L_s all rose rapidly first and then slowly decreased, and C_i fell sharply and then decreased slowly. While V_{pd} and T_l decreased slightly and then increased steadily. 【Conclusion】 Stomatal limiting factor was the main factor influencing photosynthesis of tomato leaves. Supplementary irrigation of 125% of evapotranspiration for plant improved P_n significantly but decreased WUE .

Key words: supplementary irrigation; water; tomato; characteristics of light response; stomatal limitation; water use efficiency

番茄(*Lycopersicon esculentum*)是温室栽培的主要果蔬之一,其属于半耐旱蔬菜,既需要较多的水分,又不必经常大量灌溉。我国西北地区水资源匮乏已成为番茄栽培的主要限制因素之一,水分供应与番茄光合作用效率密切相关。光合作用是番茄生育和产量形成的基础,而光合作用既受植株本身内在因素的制约,又与各种环境因素密切相关。土壤水分是番茄生长发育及产量形成的非常重要的环境因素。在干旱和半干旱地区,水分不足经常是植物进行光合作用的主要限制因素^[1]。光合有效辐射是光合作用的能量来源,近年来,光响应特性逐渐成为植物光合生理生态研究的热点。由光响应曲线可得到光饱和时的最大光合速率(P_{max})、表观量子效率(α)、光补偿点(LCP)以及光饱和点(LSP)等描述植物光合作用特征的重要生理生态特征参数,其既是植物生理生态学研究的基础,也是研究植物光合作用等生理生态过程对全球环境响应的依据^[2]。目前,关于水分对小叶扶芳藤^[3]、地黄^[4]、玉米^[5]、茄子^[6]等植物的光合响应特性的研究表明,适度水分胁迫下植物光合速率的降低是由气孔限制因素引起的,而重度水分胁迫下由非气孔限制因素引起。目前,关于水分对番茄光合特性影响的研究却仅局限于普通光合特性和光合日变化进程^[7-11],对番茄光合响应特性的研究较为少见。为此,本研究以番茄单株日蒸腾蒸发量为灌溉依据,采用盆栽试验对番茄进行补充灌溉,分析不同土壤水分条件下番茄光合生理特性对不同光强的动态响应,探讨不同土壤水分对番茄光合作用影响的机理,旨在为番茄栽培提供科学灌水依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试番茄品种为“金棚 1 号”,由西安金棚种苗有限公司提供种子,陕西杨凌新天地公司提供种苗。

1.2 试验设计

试验在陕西杨凌西北农林科技大学园艺学院文

洛型玻璃温室内进行。试验采用盆栽方式,定植盆为 30 cm×30 cm 塑料花盆。定植基质为土壤和牛粪的混合物,定植前先将土壤和牛粪分别过筛,再按 1:1 体积比混合,混匀后装盆,每盆 5 kg。于 2011-04-19 番茄幼苗 5 叶 1 心时定植,每盆定植 1 株,共 20 盆,浇饱和水缓苗。

试验设置 4 个水分处理,即分别按照单株日蒸腾蒸发量(ET)的 50%, 75%, 100%, 125% 进行补充灌溉,每处理重复 5 盆(盆下铺有托盘,可回收渗漏至盆底的水分),完全随机设计。2011-04-26 开始水分处理,采用称质量法^[12]获取 ET 。初始灌溉量的确定方法为:在处理前 1 d 早上 08:00,对植株充分灌水使土壤水分达到过饱和状态(有水从盆底渗出),24 h 后,用上海杰力电子秤(最大量程为 30 kg,精度为 0.001 kg)称量花盆质量(W_1);经过 24 h 后再次称量花盆质量(W_2),计算质量差($\Delta W = W_1 - W_2$),假设所得的质量差值全部通过植株前 1 d 的蒸腾蒸发散失,求质量差的平均值($\overline{\Delta W}$),即得前 1 d 植株的 ET_0 ,也即水分处理的初始灌溉量(ET_0)。得出 ET_0 后再按照试验设计计算不同水分处理应补充的灌溉量,每天灌水 1 次。因天气情况和植株的生长发育,植株蒸腾蒸发量有较大变化,不同水分处理导致基质含水量不同,基质含水量不同植株的蒸腾蒸发量也不同,但均以补充灌溉量为 100% ET 处理组为灌溉基准。因此,以后每天早上 08:00 用上海杰力电子秤对补充灌溉量为 100% ET 处理组称质量,然后由前 1 d 浇水后花盆质量减去当日花盆质量,即得前 1 d ET ,然后对各处理用量筒量取相应灌溉量,精确灌溉。其他田间管理按常规栽培管理措施进行。于水分处理第 15 天,番茄开花期测定光响应曲线。

1.3 叶片光合作用-光响应特征的测定

于 2011-05-11,外界光强和空气湿度相对稳定的阴天,使用 Li-6400XT 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)测定供试番茄植株 17 d 叶龄叶片的第 3 小叶(以顶叶为第 1 片小叶,然后从一侧往叶腋方向数的第 3 片小叶)的光响应曲线,每处理重复 3

次。

测定时采用 Li-6400-2B 光源,在气体流速 500 $\mu\text{mol/s}$ 、叶温 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,设置光合有效辐射强度 (PAR) 梯度为 2 000,1 700,1 400,1 100,800,500,200,150,100,50,20,0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。测定前用 1 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的 PAR 对叶片进行光诱导。采用“Light-curve”程序自动测定,每个 PAR 下稳定 120 s。仪器自动记录不同 PAR 下净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、蒸腾速率(Tr , $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、气孔导度(G_s , $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)和胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)等光合指标和叶面温度(T_l , $^{\circ}\text{C}$)、叶面水汽压亏缺(V_{pdl} , kPa)等环境因子。番茄叶片水分利用效率(WUE , $\mu\text{mol}/\text{mmol}$)和气孔限制值(L_s , $\%$)分别通过公式 $WUE = P_n/Tr$ 及 $L_s = 1 - C_i/C_a$ 得到^[13],其中 C_a 为空气 CO_2 浓度($\mu\text{mol}/\text{mol}$)。

1.4 数据处理与参数确定

Peat^[14]认为,利用指数模型描述番茄叶片光合作用对光强的响应较好,因此本试验依据 Bassman 等^[15]的指数模型拟合光响应曲线方程:

$$P_n = P_{\max} \times (1 - C_0 \times e^{-\frac{\alpha \times PAR}{P_{\max}}}) \quad (1)$$

式中: $P_{\max}$ 为最大光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), C_0 为度量弱光下净光合速率趋近于 0 的指标, α 为表观量子效率。

光补偿点(LCP)按下式计算:

$$LCP = P_{\max} \times \ln(C_0) / \alpha \quad (2)$$

假定 P_n 达到 $P_{\max}$ 的 99% 时, PAR 即为光饱和点 LSP ,则有:

$$LSP = P_{\max} \times \ln(100C_0) / \alpha \quad (3)$$

运用 DPS 分析软件(Marquardt 算法)拟合光响应曲线得到番茄叶片的 $P_{\max}$ 、 α 、 LCP 、 LSP 等光合参数,暗呼吸速率 R_d 为实测值,并对这些参数进行单因素方差分析,采用新复极差法对各处理在 5% 水平上进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 水分对番茄叶片净光合速率的影响

由图 1 可以看出,不同水分条件下 P_n 均随着 PAR 的增强而发生明显变化。在不同 PAR 条件下, P_n 总是 125% $ET > 100\% ET > 75\% ET > 50\% ET$,尤其是在高光强下($PAR > 1\ 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),差异更加明显。不同水分处理均在 PAR 增强初始阶段($PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), P_n 呈线性增大;在 $200 \leq PAR < 800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

时, P_n 随 PAR 的增强而快速增大;当 PAR 继续增强时, P_n 增大速度减缓,并在 $PAR > 1\ 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,50% ET 、75% ET 处理均随 PAR 的增强而缓慢下降,说明水分亏缺在高光强下使番茄叶片发生了光抑制,而 100% ET 、125% ET 处理的 P_n 逐渐趋于饱和。

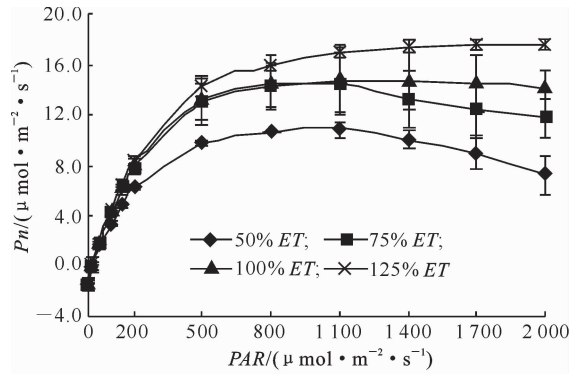


图 1 水分对番茄叶片净光合速率光响应过程的影响
Fig. 1 Effect of water on light response curve of net photosynthetic rate for tomato leaves

光饱和时的 $P_{\max}$ 、 α 、 R_d 、 LCP 、 LSP 是描述植物光合作用重要生理生态特征参数,并随着植物的属性、种类、生长阶段、环境的差异均会表现出不同的特征。 $P_{\max}$ 是叶片光合能力的一个度量。由表 1 可以看出,不同水分条件下, $P_{\max}$ 随着灌溉量的增加而增大,与 50% ET 处理相比,75% ET 、100% ET 、125% ET 处理的 $P_{\max}$ 分别增加了 37.9%、51.2% 和 80.1%,除 75% ET 与 100% ET 处理之间无显著差异外,其他各处理间差异均达到显著水平($P < 0.05$)。 α 反映了植物光合作用对弱光的利用效率。由表 1 可知, α 随着灌溉量的增加先增大后减小。各水分处理间的 R_d 和 LCP 均无显著差异。而 LSP 随着灌溉量的增加而上升,其中 75% ET 、100% ET 、125% ET 处理的 LSP 较 50% ET 处理分别增加 10.4%、17.9% 和 55.9%。

2.2 水分对番茄叶片蒸腾速率和水分利用效率的影响

由图 2 可以看出,4 个水分处理的 Tr 均随 PAR 的升高而呈增大趋势,在 $PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, Tr 随 PAR 的增加呈直线上升,其变化趋势与 P_n 相似。在不同 PAR 下, Tr 总是 125% $ET > 100\% ET > 75\% ET > 50\% ET$, PAR 越大 Tr 差异越大,这表明 125% ET 处理土壤含水量较高,可供水量较大, Tr 增大;而 50% ET 处理土壤含水量较低,可供水量较低,植株受到水分胁迫导致气孔关闭, Tr 变小。 $PAR = 1\ 400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,

75% ET、100% ET、125% ET 处理 Tr 分别为 2.01, 2.66, 3.24 mmol/(m² · s)), 较 50% ET 处理

分别提高了 37.6%, 82.2%, 113.0%。

表 1 水分对番茄叶片光合作用-光响应特征生理参数的影响

Table 1 Effect of water on parameters of light responses for tomato leaves

处理 Treatment	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) P_{max}	表观量子效率/ ($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) α	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) R_d	光补偿点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) LCP	光饱和点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) LSP
50% ET	9.72±0.72 c	0.055 6±0.009 6 b	-1.04±0.32 a	20.5±2.0 a	838.8±128.1 b
75% ET	13.41±2.02 b	0.068 1±0.002 8 a	-1.45±0.45 a	22.6±6.7 a	926.1±107.7 b
100% ET	14.70±1.31 b	0.067 7±0.002 6 a	-1.33±0.38 a	19.0±4.0 a	1 022.4±124.9 b
125% ET	17.51±0.39 a	0.062 8±0.005 3 ab	-1.46±0.36 a	19.5±5.2 a	1 307.9±80.9 a

注:同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different small letters meant significant difference among different treatments at 0.05 level.

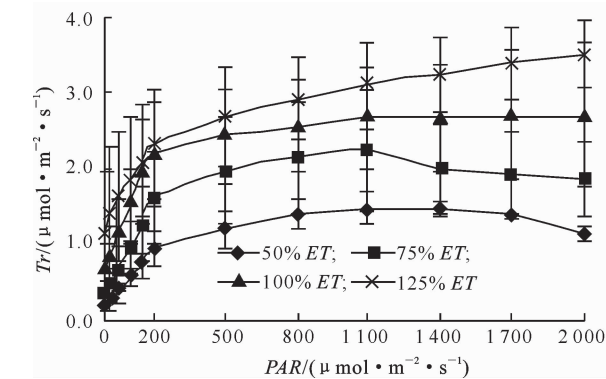


图 2 水分对番茄叶片蒸腾速率光响应过程的影响
Fig. 2 Effect of water on light response curve of transpiration for tomato leaves

由图 3 可知,在 $PAR<150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,4 个水分处理的 WUE 均随 PAR 的增加而急剧上升,之后随着 PAR 的增加,50% ET 处理的 WUE 总大于其他水分处理,在 $PAR=500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,其 WUE 达到最高值(8.09 $\mu\text{mol}/\text{mol}$),之后开始缓慢下降;而其他 3 个水分处理 WUE 则趋于饱和, WUE 不再随 PAR 的增强而发生明显改变。值得注意的是,100% ET 和 125% ET 处理的 WUE 一直非常接近,只是后者略高于前者;而 50% ET 处理在 $PAR>1\ 400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,与 75% ET WUE 几乎相等。表明水分亏缺提高了番茄的 WUE 。

2.3 水分对番茄叶片胞间 CO_2 浓度和气孔导度的影响

由图 4 可以看出,当 $PAR<200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,各水分处理的 C_i 随 PAR 的增强先急剧下降; PAR 在 $200\sim500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, C_i 缓慢下降;当 $PAR>500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,各水分处理间 C_i 表现出一定的差异,但并不再随 PAR 的增强而发

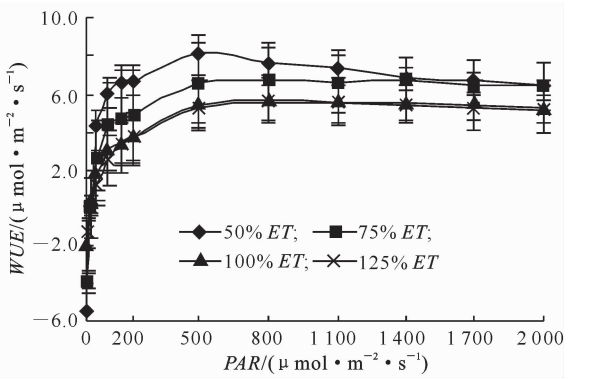


图 3 水分对番茄叶片水分利用效率光响应过程的影响
Fig. 3 Effect of water on light response curve of water use efficiency for tomato leaves

生明显变化,这是 P_n 趋于饱和的原因。 PAR 增大的初始阶段,正是叶片光合作用急速增加阶段,消耗 CO_2 较大,导致 C_i 急速下降, PAR 超过一定强度之后,光合作用增幅变缓,光合消耗 CO_2 与外界扩散达到平衡, C_i 趋于稳定。

由图 5 可以看出,不同水分条件下番茄叶片的 G_s 均在 $PAR<200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时呈直线上升,随后缓慢升高,在 PAR 达到 $1\ 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之后,除 125% ET 处理 G_s 仍缓慢增加外,其他水分处理的 G_s 均呈下降趋势。各处理 G_s 随 PAR 变化的趋势与 P_n 、 Tr 相似,这是因为气孔是植物叶片与外界进行气体交换的主要通道, O_2 、 CO_2 、 H_2O 都是通过气孔扩散,其闭合程度直接影响了 P_n 和 Tr ,间接影响了 WUE 。在不同 PAR 下, G_s 表现为 $125\% \text{ ET}>100\% \text{ ET}>75\% \text{ ET}>50\% \text{ ET}$,表明 G_s 随着灌溉量的增加而增大。50% ET 处理土壤含水量较低,植株在水分胁迫下,脱落酸通过叶绿体中贮存的 ABA 或快速合成的 ABA 或根系缺水产生的 ABA 诱导气孔关闭, G_s 减小。

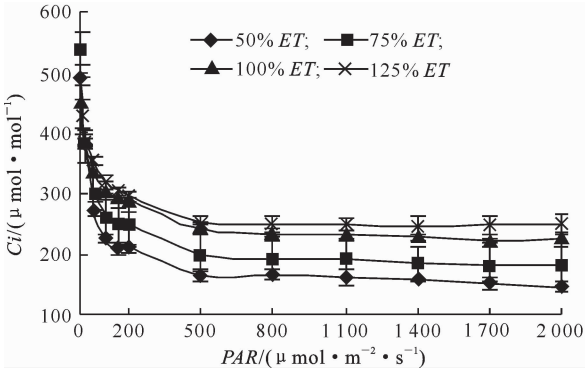


图 4 水分对番茄叶片胞间 CO₂ 浓度光响应过程的影响
Fig. 4 Effect of water on light response curve of intercellular CO₂ concentration for tomato leaves

2.4 水分对番茄叶片叶面水汽压亏缺和叶片温度的影响

水分对番茄叶片叶面水汽压亏缺和叶片温度的影响如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知,4 个水分条件下, *V_{pdl}* 均呈先下降后上升的趋势。不同 PAR 下, *V_{pdl}* 均表现为 50% ET > 75% ET >

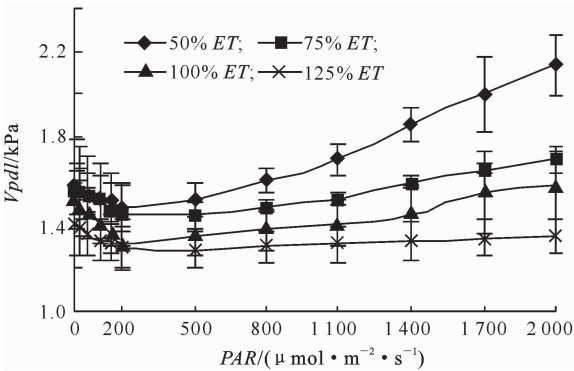


图 6 水分对番茄叶片叶面水汽压亏缺光响应过程的影响
Fig. 6 Effect of water on light response curve of leaf vapor pressure deficit for tomato leaves

由图 7 可知,在弱光条件 ($PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 下,4 个水分处理的 *T_l* 并不随 *PAR* 的增加而变化,但 75% ET > 50% ET > 100% ET > 125% ET; 当 $PAR > 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,50% ET 处理 *T_l* 迅速上升并超过 75% ET 处理,其他各处理 *T_l* 均有不同程度的上升。这表明在弱光条件下,虽然 *PAR* 增强,但随着 *P_n* 和 *T_r* 的增加, *T_l* 基本保持不变;但随着 *PAR* 的进一步增强,50% ET 处理 *T_r* 趋于稳定不再增加,导致 *T_l* 持续升高。

2.5 水分对番茄叶片气孔限制值的影响

水分对番茄叶片气孔限制值光响应过程的影响如图 8 所示。

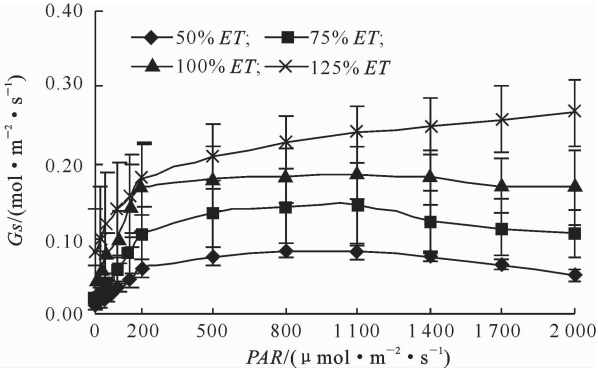


图 5 水分对番茄叶片气孔导度光响应过程的影响
Fig. 5 Effect of water on light response curve of stomatal conductance for tomato leaves

100% ET > 125% ET。在弱光条件下 ($PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),4 个水分处理的 *V_{pdl}* 都逐渐降低,125% ET 处理 *V_{pdl}* 降低到最低 (1.29 kPa) 后便趋于稳定,而 50% ET 处理 *V_{pdl}* 则呈指数曲线升高,其他 2 处理 *V_{pdl}* 介于 50% ET 处理和 125% ET 处理之间。

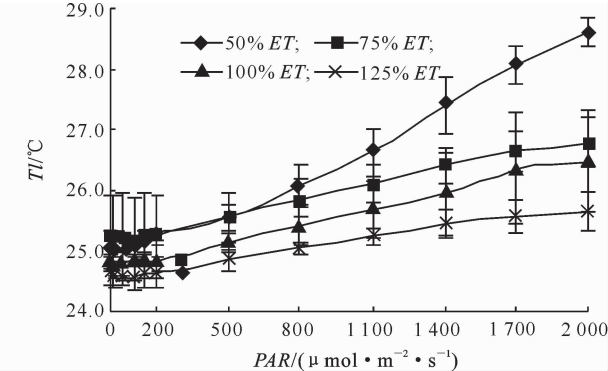


图 7 水分对番茄叶片叶面温度光响应过程的影响
Fig. 7 Effect of water on light response curve of leaf temperature for tomato leaves

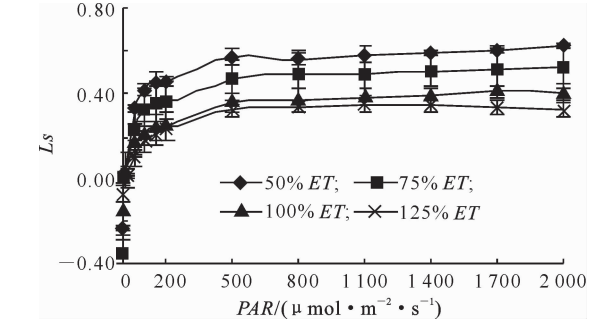


图 8 水分对番茄叶片气孔限制值光响应过程的影响
Fig. 8 Effect of water on light response curve of stomatal limitation of tomato leaves

由图 8 可知,各水分处理 *L_s* 随 *PAR* 的变化趋势与 *P_n*、*T_r* 相似。当 $PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

时,各处理 L_s 呈直线上升,其中 50% ET 处理的 L_s 增幅最大; PAR 在 200~500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,各水分处理 L_s 缓慢增大;当 $PAR > 500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,各水分处理 L_s 趋于平缓,不再增大。除当 $PAR = 0 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,各水分处理 L_s 表现为 125% $ET > 100\% ET > 75\% ET > 50\% ET$ 外,其他 PAR 下,各水分处理 L_s 表现为 50% $ET > 75\% ET > 100\% ET > 125\% ET$,这说明灌溉量较低使土壤含水量较低,从而导致较高的 L_s ,并进一步引起 P_n 下降。

3 讨论与结论

水分是光合作用的直接参与者,其缺乏时可导致植物细胞体积和膨压下降,并且光合活性减低,光合作用下降。水分亏缺会影响到光合作用的供应和需求两方面的功能。 G_s 的下降会降低光合作用的供应功能(C_i 降低),随着水分亏缺程度的加重而下降,而光合作用需求功能的变化主要是 $P_{\max}$ 下降^[16]。 $P_{\max}$ 反映了强光下叶片潜在的光合利用能力, α 则反映了植物光合作用对弱光的吸收和转换效率。本研究中,与其他水分处理相比,125% ET 处理 $P_{\max}$ 最大,说明 125% ET 处理光合作用效率最高;其 α 也较高,但与 75% ET 处理差异未达到显著水平,说明 125% ET 处理也有利于番茄叶片对弱光的利用。此外, $P_{\max}$ 和 α 是光合模型中 2 个重要参数,本研究中,50% ET 、75% ET 、100% ET 和 125% ET 的 $P_{\max}$ 和 α 分别为 9.72,13.41,14.70,17.51 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 0.055 6,0.068 1,0.067 7,0.062 8 mol/mol,可以为不同灌溉量条件下番茄光合作用模型的建立提供参考。

由于灌溉量直接影响土壤含水量,当土壤水分未饱和时,土壤含水量随灌溉量的增加而上升,反之则下降。土壤含水量对番茄光合作用会产生非常明显的影响。前人研究了不同土壤水分对番茄^[9-11]、杂交杨树^[17]、生姜^[18]、甜椒^[19]、黄瓜^[20]等植物光合作用的影响,结果表明,在适宜土壤水分条件下,随着土壤水分的增加,植物 P_n 、 Tr 、 G_s 都有明显升高的趋势,而 WUE 却降低^[10,11,14,20-21],与本研究结果一致。

水分供应不足成为限制番茄光合作用的因素,这并不是光合原料的供应受到了限制,而是由于水分亏缺引起的气孔或者非气孔因素所致。前者在水分亏缺时,气孔部分关闭, G_s 下降,导致进入叶片内的 CO_2 减少,从而使光合速率降低。非气孔因素主要是由于在水分亏缺时,光合产物输出变慢、光合机

构受损、RuBP 羧化酶活性降低等导致了光合速率降低。Farqhar 等^[22]认为,只有当 C_i 降低和 L_s 增大时, P_n 的降低主要是由 G_s 的降低引起的。相反,如果 P_n 的降低伴随着 C_i 的提高,光合作用的主要限制因素则是非气孔因素。本研究中,随着灌溉量的增加,番茄叶片的 C_i 降低,而 L_s 增大,这与高方胜等^[23]在番茄上的研究结果一致。本研究结果表明,在灌溉量为 50% ET 条件下,番茄处于水分亏缺状态,叶片的 C_i 降低伴随着 L_s 增大,说明 P_n 的降低是由气孔因素引起的。

蒸腾作用对 Tr 有很大的影响。叶片通过蒸腾作用散失水分,且同时降低了 Tr 。 V_{pd} 是水蒸汽从叶片蒸散到空气中的动力,低空气湿度会使 V_{pd} 和 Tr 升高。本研究中,随着 PAR 的增加,各水分处理 V_{pd} 和 Tr 变化趋势基本一致。随着灌溉量的降低, Tr 下降,说明水分亏缺和强光条件使 V_{pd} 和 Tr 升高, G_s 和 P_n 降低。

综上所述,灌溉量的增加能提高番茄叶片的光响应特性。本研究中,补充灌溉量为 ET 的 125% 时,番茄叶片的 $P_{\max}$ 最高, α 也较高,提高了番茄叶片对强光和弱光的利用能力。由于本试验设计的最高补充灌溉量为 125% ET ,进一步提高补充灌溉量是否还可以提高 P_n ,尚有待进一步研究。本研究采用盆栽试验分析了水分对番茄叶片光响应特性的影响,在试验的中后期,每天浇水后,125% ET 处理都有多余的水渗出,采用托盘收集的办法回收渗出的水可以减少试验误差。

参考文献

- [1] 许大全. 光合作用效率 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.
Xu D Q. Photosynthesis efficiency [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 于贵瑞, 王秋凤. 植物生理学、植物光合、蒸腾和水分利用的生理生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2010, 192.
Yu R G, Wang Q F. Ecophysiology of plant photosynthesis, transpiration and water use [M]. Science Press, 2010, 192. (in Chinese)
- [3] 张淑勇, 周泽福, 夏江宝, 等. 不同土壤水分条件下小叶扶芳藤叶片光合作用对光的响应 [J]. 西北植物学报, 2007, 27(12): 2514-2521.
Zhang S Y, Zhou Z F, Xia J B, et al. The responses of *Euonymus fortunei* var. *radicans* Sieb. leaf photosynthesis to light in different soil moisture [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(12): 2514-2521. (in Chinese)
- [4] 贾媛媛, 何玉杰, 梁宗锁, 等. 不同水分处理对地黄光合特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(8): 182-186.

- Jia Y Y, He Y J, Liang Z S, et al. Effect of different moisture treatments on photosynthetic characteristics of *Rehmannia glutinosa* Libosch [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2009, 37(8): 182-186. (in Chinese)
- [5] 郭江, 郭新宇, 王纪华, 等. 不同株型玉米光响应曲线的特征参数研究 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(8): 1612-1617.
- Guo J, Guo X Y, Wang J H, et al. Characteristic parameters of light responses of corn varieties with different plant shapes [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2005, 25(8): 1612-1617. (in Chinese)
- [6] 高志奎, 高荣孚, 何俊萍, 等. 日光温室茄子光合的光强响应特性研究 [J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(3): 26-30.
- Gao Z K, Gao R F, He J P, et al. Studies on response characteristics of photosynthetic available radiation on photosynthesis in greenhouse eggplant [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2005, 28(3): 26-30. (in Chinese)
- [7] 翟亚明, 邵孝侯, 徐徐, 等. 不同灌溉制度对温室番茄光合特性的影响 [J]. 节水灌溉, 2009(11): 46-47.
- Zhai Y M, Shao X H, Xu X. Study on the photosynthetic characteristics of tomato in greenhouse under different irrigation schedule [J]. Water Saving Irrigation, 2009(11): 46-47. (in Chinese)
- [8] 姜凤超, 石磊, 李玉欣, 等. 水分和锌对番茄叶水势、光合特性及蒸腾效率的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 125-127.
- Jiang F C, Shi L, Li Y X, et al. Effects of water and Zinc on leaf potential, photosynthetic characteristics and transpiration efficiency of tomato [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 125-127. (in Chinese)
- [9] 王磊, 任树梅, 毕勇刚, 等. 土壤水分及有机肥料对番茄叶片光合特性及叶绿素含量影响的试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 66-68, 80.
- Wang L, Ren S M, Bi Y G, et al. Effects of soil water and organic manure to the photosynthesis and chlorophyll of tomato in the greenhouse [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 66-68, 80. (in Chinese)
- [10] 夏秀波, 于贤昌, 张琳. 水分对有机基质栽培番茄生长、生理特性和产量的影响 [J]. 中国蔬菜, 2007(2): 16-18.
- Xia X B, Yu X C, Zhang L. The effect of water content on growth, photosynthetic characteristics and yield of tomato grown in organic substrates [J]. China Vegetables, 2007(2): 16-18. (in Chinese)
- [11] 郭艳波, 冯浩, 吴普特. 水分亏缺对番茄生理特性及水分生产效率的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 52-55.
- Guo Y B, Feng H, Wu P T. Effects of water stress on physiological characteristic and water production efficiency of tomato [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(3): 52-55. (in Chinese)
- [12] 李建明, 王平, 李江. 灌溉量对亚低温下温室番茄生理生化与品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 129-134.
- Li J M, Wang P, Li J. Effect of irrigation amount on physiology, biochemistry and fruit quality of greenhouse tomato under sub-low temperatures [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 129-134. (in Chinese)
- [13] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis [M]. New York: Academia Press, 1982: 263-343.
- [14] Peat W E. Relationships between photosynthesis and light intensity in the tomato [J]. Annals of Botany, 1970, 34: 319-328.
- [15] Bassman J H, Zwier J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *Populus trichocarpa* $\times$ *Populus deltoides* clone [J]. Tree Physiology, 1991, 8: 145-149.
- [16] Lambers H, Chapin F S, Pons T L. 植物生理生态学 [M]. 张国平, 周伟军, 译. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 29.
- Lambers H, Chapin F S, Pons T L. Plant physiological ecology [M]. Translated by Zhang G P, Zhou W J. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 29. (in Chinese)
- [17] Dickmann D I, Liu Z, Nguyen P V, et al. Photosynthesis, water relations, and growth of two hybrid *Populus* genotypes during a severe drought [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1992, 222: 1094-1106.
- [18] 徐坤, 郑国生. 水分胁迫对生姜光合作用及保护酶活性的影响 [J]. 园艺学报, 2000, 27(1): 47-51.
- Xu K, Zheng G S. Effects of soil water stress on photosynthesis and protective enzyme activity of ginger [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2000, 27(1): 47-51. (in Chinese)
- [19] 陈金平, 刘祖贵, 段爱旺, 等. 土壤水分对甜椒叶片某些生理特性的影响 [J]. 山地农业生物学报, 2005, 24(1): 48-52.
- Chen J P, Liu Z G, Duan A W, et al. Effects of soil moisture on physiological characteristics of sweet pepper leaves [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2005, 24(1): 48-52. (in Chinese)
- [20] 王绍辉, 张福漫. 不同土壤含水量对日光温室黄瓜生理特性的影响 [J]. 中国蔬菜, 2000(增刊): 26-29.
- Wang S H, Zhang F M. Effect of different soil water content treatment on physiological characters of cucumber in solar greenhouse [J]. China Vegetables, 2000(S1): 26-29. (in Chinese)
- [21] 王聪聪, 孙磊, 郭凤台. 土壤水分状况对温室滴灌番茄水分利用效率及果实品质的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(2): 86-89.
- Wang C C, Sun L, Guo F T. Response of tomato yield, quality, and water use efficiency to soil water status under drip irrigation in greenhouse [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(2): 86-89. (in Chinese)
- [22] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and Photosynthesis [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317-345.
- [23] 高方胜, 徐坤, 王磊. 土壤水分对不同季节番茄叶片水和二氧化碳交换特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 371-375.
- Gao F S, Xu K, Wang L. Effects of soil water content on H_2O and CO_2 exchange in tomato leaves in different seasons [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 371-375. (in Chinese)