

不同光环境下辣椒光合特性和瞬时水分利用效率

钟平安¹ 邵东¹ 黄英金² 王强¹ 杨小龙³ 叶子飘^{4*}

(¹江西农业大学生物科学与工程学院, 南昌 330045; ²江西农业大学农学院, 南昌 330045; ³复旦大学环境与工程系, 上海 200433; ⁴井冈山大学数理学院, 江西吉安 343009)

摘要 以遮阴和大棚处理下的辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 为研究对象, 用 LI-6400 光合仪测定了这两种光环境下辣椒的气体交换数据, 然后利用光响应模型拟合它们的光合作用和瞬时水分利用效率对光的响应曲线, 研究叶片的净光合速率和瞬时水分利用效率在不同光照环境下的变化规律。结果表明: 大棚辣椒较遮阴辣椒的最大净光合速率 (P_{nmax}) 和蒸腾速率 (T_r) 均有所下降; 而大棚辣椒的最大瞬时水分利用效率 ($WUE_{inst-max}$) 大于遮阴辣椒, 其对应的饱和光强 ($I_{inst-sat}$) 要小于遮阴辣椒, 但不存在显著差异 ($P > 0.05$)。此外, 研究结果还揭示, 两种光环境下辣椒净光合速率达到最大时的饱和光强 (I_{sat}) 与瞬时水分利用效率达到最大时的饱和光强 ($I_{inst-sat}$) 之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 且前者的饱和光强大于后者的饱和光强, 表明这种光照条件下辣椒的光合作用和瞬时水分利用效率对光的响应发生过程并不同步。

关键词 辣椒; 瞬时水分利用效率; 蒸腾速率; 光合作用

The photosynthesis characteristics and instantaneous water-use efficiency of *Capsicum annuum* under different light conditions. ZHONG Ping-an¹, SHAO Dong¹, HUANG Ying-jin², WANG Qiang¹, YANG Xiao-long³, YE Zi-piao^{4*} (¹School of Biological Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; ²Department of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; ³Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; ⁴College of Math & Physics, Jinggangshan University, Ji'an 343009, Jiangxi, China).

Abstract: Gas exchange of *Capsicum annuum* L. under shading and greenhouse conditions was measured by LI-6400 Portable Photosynthetic System. The light-response curves of photosynthesis and instantaneous water-use efficiency were fitted by light-response models. The change tendency of the net photosynthetic rate and instantaneous water-use efficiency of leaves were measured under different light conditions. The results showed that the maximum net photosynthetic rate (P_{nmax}) and transpiration rate (T_r) of *C. annuum* leaves in greenhouse were lower than that under shading, whereas the maximum instantaneous water-use efficiency ($WUE_{inst-max}$) of *C. annuum* in greenhouse was higher than that under shading, and the corresponding saturating light intensity ($I_{inst-sat}$) was lower than that under shading. There was no significant difference of $WUE_{inst-max}$ and $I_{inst-sat}$ between the conditions in greenhouse and in shading ($P > 0.05$). Furthermore, there was significant difference between I_{sat} (corresponding to P_{nmax}) and $I_{inst-sat}$ (corresponding to $WUE_{inst-max}$) ($P < 0.05$), and the values of I_{sat} were greater than the values of $I_{inst-sat}$. Our results indicate that both photosynthesis and instantaneous water-use efficiency of *C. annuum* leaves are not synchronized for each of two different light conditions.

Key words: *Capsicum annuum* L.; instantaneous water-use efficiency; transpiration rate; photosynthesis.

水分利用效率 (water-use efficiency, WUE), 是耦合植物叶片光合与水分生理过程的重要指标, 是表征植物利用水分的能力强弱和植物在等量水分消耗情况下固定 CO_2 的能力, 是植物叶片水分利用特征的基本生理参数, 植物叶片水平的 WUE 研究不仅可揭示植物叶片内在的耗水机制, 明确植物自身光合能力大小, 还能反映植物有效利用水分的能力 (Ogutu, 2013; 侍瑞等, 2018)。同时, WUE 也是描述植物在不同生境中水分适应策略的一个重要参数, 是决定植物在干旱、半干旱地区生存、生长和物种分布的重要因素之一 (熊伟等, 2005)。此外, 植物的抗旱性与 WUE 有密切关系, 高 WUE 是作物抗旱性的一种重要基础, 有利于作物在缺水条件下保持产量。植物叶片 WUE 的高低取决于气孔控制的光合作用和蒸腾作用两个相互耦合的过程。因此, 模拟水分利用效率对环境变化的响应特征和机制是理解生态系统碳循环和水循环及其耦合关系的基础 (王建林等, 2008; Islam *et al.*, 2012)。

WUE 在不同的研究尺度和范畴上的定义有所差异, 在叶片层面上有瞬时水分利用效率 (WUE_{inst}) 和内禀水分利用效率 (WUE_i)。其中, 瞬时水分利用效率和内禀水分利用效率主要用于叶片尺度, 瞬时水分利用效率以净光合速率 (P_n) 与蒸腾速率 (T_r) 的比值来描述, 其数学表达式为 $WUE_{\text{inst}} = P_n / T_r$, 单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$, 内禀水分利用效率是 P_n 与气孔导度 (G_s) 的比值 (Plénet *et al.*, 2000; Flexas *et al.*, 2013; Franco *et al.*, 2018; 叶子飘等, 2018), 单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。近年来, 利用植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究植物水分利用效率的文献很多, 在中国也有利用该方法对树木的水分利用效率进行研究的报道 (Cabrera-Bosquet *et al.*, 2007; 陈平等, 2014; 李景浩等, 2016; 李雪松等, 2018; 朱林等, 2018; 曾欢欢等, 2019)。然而, 用该方法不能实时研究和监测植物叶片的水分利用效率对光的响应变化规律。为了弥补同位素方法研究植物叶片的水分利用效率存在的不足, 人们利用叶片净光合速率和蒸腾速率的日变化来定量估算水分利用效率, 且已有不少报道 (Centritto *et al.*, 2000; Hsiao *et al.*, 2000; 于文颖等, 2015; 刘佳等, 2017; 李晨曦等, 2017; 白海波等, 2017)。这些研究方法和研究成果对推动植物水分利用效率的研究起着积极的作用。然而, 国内外通过叶片的净光合速率和蒸腾速率耦合得到植物叶片的 WUE_{inst} , 并由此研究它对光的响应变化规律则鲜有报道 (叶子飘

等, 2017)。研究表明, 在光强较低时, 植物叶片的 WUE_{inst} 随光强的增加而快速增加, 在中等光强下, WUE_{inst} 就达到最大值, 然后随光强的增加而非线性下降 (叶子飘等, 2016)。但不同光照环境下辣椒的 WUE_{inst} 对光的响应规律是否也遵循同样的规律尚不清楚, 还有待于进一步的研究。此外, 尚未见到有文献报道植物叶片光合作用对光的响应过程与瞬时水分利用效率对光的响应过程是否同步的问题, 而这个问题对进一步了解植物光合生态具有重要的意义。

为了揭示不同环境下叶片瞬时水分利用效率的变化规律以及探讨通过叶子飘模型定量研究瞬时水分利用效率的适用性, 本文以测定分析不同光环境下辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 的净光合速率、蒸腾速率和瞬时水分利用效率对光的响应数据, 其研究的主要目的有: (1) 定量研究不同光照环境下辣椒的光合作用和瞬时水分利用效率对光的响应规律, 同时获得辣椒的重要光合参数 (如饱和光强 (I_{sat})、最大净光合速率 (P_{mmax}) 和蒸腾速率 (T_r) 及 $WUE_{\text{inst-max}}$ 和对应的饱和光强; (2) 比较由光合作用对光的响应曲线得到的饱和光强以及由瞬时水分利用效率对光的响应曲线得到的饱和光强的大小, 研究辣椒光合作用与瞬时水分利用效率对光的响应是否同步的问题。研究结果将有助于进一步理解辣椒叶片的光合作用和瞬时水分利用效率在不同光照条件下的变化规律, 为辣椒的高产和水分管理提供理论依据和数学工具。

1 材料与方法

1.1 试验材料

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 系茄科 (Solanaceae) 辣椒属 (*Capsicum*) 一年生或多年生草本植物, 为典型的喜温性蔬菜, 果实有芬芳的辛辣味, 并富含辣椒素、维生素 C 等多种营养物质, 是一种世界性的重要蔬菜和调味品。辣椒胎座组织和果皮中含有丰富的胡萝卜素和维生素 C, 辣椒中的辣椒素具有增强人体抵抗力和食欲的功效。是中国设施栽培的主要蔬菜之一。江西是我国辣椒 6 个种植大省之一, 所以, 我们选用辣椒作为本实验的供试材料。

1.2 试验设计

本试验是在江西吉安井冈山大学生态园内进行, 位于 $27^{\circ}06'N$, $115^{\circ}02'E$, 平均海拔 53 m, 属中亚热带季风湿润性气候区, 年均气温 $17.1 \sim 18.6^{\circ}\text{C}$,

1月平均气温3~10℃,7月平均气温26~35℃,平均日照时间1814h,年无霜期277d,年均降水量1458mm,6—8月平均降水量为470mm,占年均降水量的32%。土壤类型主要为红壤,土层厚度多为20~100cm,腐殖质层厚3~20cm,有机质含量1%~5%,pH值4~7,偏酸性。

为了研究光照和温度环境对辣椒光合特性和水分利用效率特性,我们分别用塑料大棚和遮阴网对辣椒进行了两种光照和温度环境处理。此时大棚内白天的温度为26~32℃(大棚内装有水帘进行通风降温系统),光照强度约为400~600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;此时遮阴网下白天的温度为32~38℃,光照强度约为600~800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,且在辣椒生长期以及后来的测量时期光照和温度条件下保持相对稳定。测量时间为2017年7月26日到2017年8月8日上午9:00—11:00,用Li-6400XT便携式光合作用测定系统分别随机选取生长在大棚条件下和遮阴条件下五株长势一致的辣椒,分别测定了它们开花结果期的功能叶,结果取平均值。

1.3 气体交换数据的测量

自然光诱导0.5~1h后,采用开放式气路,叶面积指数为4.1,日均气温34~43℃,空气相对湿度为32%~38%,应用LI-6400XT便携式光合测定系统分别设光合有效辐射为1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、200、100、50和0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 在控制流速为500 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$,CO₂浓度为390 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 下测定光响应曲线,每个光合有效辐射下适应3~5min后测定其净光合速率,3次重复。然后用光响应机理模型(Ye *et al.*, 2013)拟合光响应曲线,由此得到植株叶片的光合参数,如初始斜率(α)、饱和光强(I_{sat})、最大净光合速率(P_{max})、光补偿点(I_c)和暗呼吸速率(R_d)。然后根据瞬时水分利用效率模型公式得到 $I_{\text{inst-sat}}$ 和 $WUE_{\text{inst-max}}$,详细推导见文献(叶子飘等,2016)。

1.4 数据处理

所测定遮阴和大棚处理下辣椒的实验数据处理由Excel完成,作图由Origin 9.0完成,采用Origin 9软件进行统计分析并对光响应特征参数进行单因素的方差分析(One-way ANOVA),光合作用和瞬时水分利用效率对光响应曲线的实验数据分别用光响应机理模型(Ye *et al.*, 2013)和叶子飘新模型(叶子飘等,2016)进行拟合得到相应的光合参数。所有结果皆表示为平均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 光合作用对光的响应曲线

由图1可知,大棚辣椒在1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右达到一个平台期,然后随着光强的增加净光合速率不再增加;而遮阴辣椒在1300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右达到平台期(图1)。此外,在光强小于400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时遮阴辣椒和大棚辣椒的净光合速率增长几乎遵循相同的规律,但在光强超过1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,大棚辣椒曲线趋于平缓,而遮阴辣椒在高光强情况时其净光合速率随着光强的增加而略有下降,出现轻微的光抑制现象。

由表1可以看出,遮阴条件下辣椒的最大净光合速率较大大棚条件下辣椒增加27.69%、光补偿点增加31.54%以及暗呼吸速率增加39.09%,但大棚条件下辣椒的饱和光强则比遮阴条件下高出14.06%。此外,两种处理下辣椒的光合参数均无显著差异($P>0.05$)。

2.2 蒸腾速率响应曲线

由图2可知,遮阴辣椒和大棚辣椒的蒸腾速率随着光强的增加而近似线性地增加,在所设定光强范围内尚未达到平台期的现象。遮阴条件下辣椒的蒸腾速率一直比大棚辣椒的高。通过直线拟合得到大棚辣椒的蒸腾速率对光的响应曲线为 $T_r = 0.0022I + 6.3345$ ($R^2 = 0.994$);遮阴辣椒的蒸腾速率对光的响应曲线为 $T_r = 0.0033I + 9.0776$ ($R^2 = 0.909$)。由此可知,遮阴条件下的辣椒不仅蒸腾速率的增长斜率大于大棚辣椒,截距也大于大棚辣椒截距约43.3%,这些因素都将影响着瞬时水分利用效率。同时,当光照强度大于100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

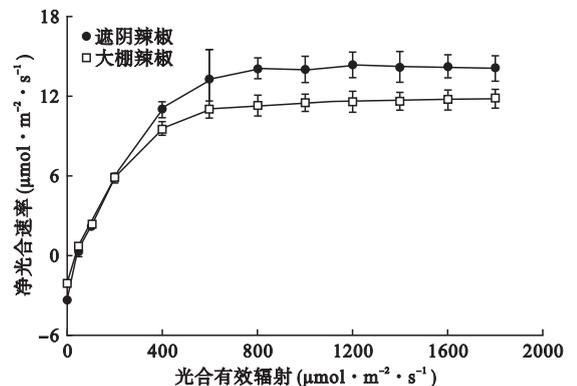


图1 大棚辣椒和遮阴辣椒的光响应曲线
Fig.1 Light-response curves of *Capsicum annuum* (P_n - I curves) in greenhouse and shading conditions

表1 大棚辣椒和遮阴辣椒的光合参数

Table 1 Photosynthetic parameters of *Capsicum annuum* in greenhouse and shading conditions

光照环境	初始斜率 (α)	最大净光合速率 (P_{max} , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光补偿点 (I_c , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	饱和光强 (I_{sat} , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率 (R_d , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	决定系数 R^2
大棚辣椒	0.075±0.004 a	11.99±0.75 a	37.64±3.53 a	1503.89±42.45 a	2.43±0.24 a	0.993
遮阴辣椒	0.078±0.001 a	15.31±0.95 a	49.51±4.50 a	1318.50±80.03 a	3.38±0.28 a	0.995

同列数值不同小写字母表示同一光合参数在0.05水平差异显著。“±”号后数值为标准误差。下同。

时,两种光环境下辣椒的蒸腾速率之间存在着显著性差异($P<0.05$)。

2.3 瞬时水分利用效率对光的响应曲线

由图3可知,光强低于 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时大棚辣椒和遮阴辣椒的瞬时水分利用效率随着光强的增加呈现出几近相同的生长趋势,与光合作用对光响应曲线相似。当光强达到 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 大棚辣椒和遮阴辣椒的 WUE_{inst} 均出现随光强增加而非线性下降的现象,且大棚辣椒的瞬时水分利用效率随光强的增加而下降的速度更快一些,在光

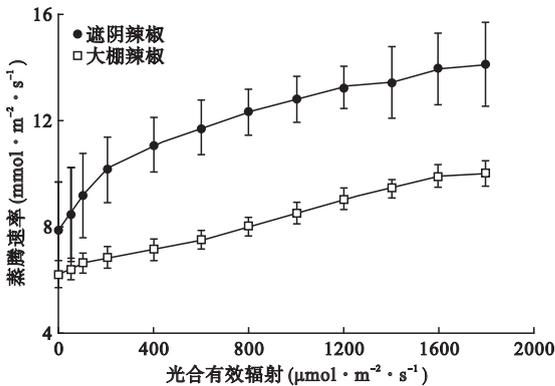


图2 大棚辣椒和遮阴辣椒蒸腾速率的光响应曲线

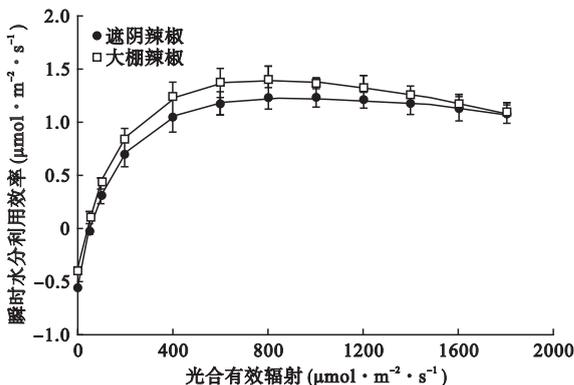
Fig.2 Light-response curves of transpiration rate of *Capsicum annuum* (T_r - I curves) in greenhouse and shading conditions

图3 大棚辣椒和遮阴辣椒瞬时水分利用效率的光响应曲线

Fig.3 Light-response curves of instantaneous water-use efficiency of *Capsicum annuum* (WUE_{inst} - I curves) in greenhouse and shading conditions

强约为 $1800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时迅速下降并接近于遮阴辣椒的瞬时水分利用效率。

由表2可知,虽然遮阴辣椒与大棚辣椒的最大瞬时水分利用效率之间不存在显著差异($P>0.05$),但前者比后者低10.14%。

2.4 叶片光合作用和瞬时水分利用效率饱和和光强同步比较

由表3可知,大棚和遮阴处理条件下的辣椒的最大净光合速率所对应的饱和光强分别为 $1503.89 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1318.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;最大瞬时水分利用效率所对应的饱和光强分别为 $916.02 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $946.37 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,前者的饱和光强分别比后者的饱和光强大64.18%和39.32%,且两者都存在显著差异($P<0.05$)。这表明在瞬时水分利用效率达到最大时叶片的净光合速率还远未达到饱和,即光合作用对光的响应过程与瞬时水分利用效率对光的响应过程并不同步。

表2 大棚辣椒和遮阴辣椒的最大瞬时水分利用效率和饱和光强

Table 2 The maximum instant water use efficiency and saturation irradiance greenhouse *Capsicum annuum* and shaded *C. annuum*

光照环境	最大瞬时水分利用效率 ($WUE_{inst-max}$, $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)	饱和光强 ($I_{inst-sat}$, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	决定系数 R^2
大棚辣椒	1.38±0.11 a	916.02±80.43 a	0.991
遮阴辣椒	1.24±0.10 a	946.37±59.58 a	0.998

表3 辣椒叶片光合作用和最大瞬时水分利用效率对应饱和和光强

Table 3 The saturated light intensity corresponding to the maximum photosynthesis and maximum instantaneous water-use efficiency of *Capsicum annuum* leaves

光照环境	饱和光强 (I_{sat} , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大瞬时饱和光强 ($I_{inst-sat}$, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
大棚辣椒	1503.89±42.45 a	916.02±80.43 b
遮阴辣椒	1318.50±80.03 a	946.37±59.58 b

同行数值不同小写字母表示同一光合生理参数在0.05水平差异显著。

3 讨论

叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和水分利

用效率(WUE)直接反映了群落内植被物质生产与水分消耗关系,是表征植被抗旱性和水分利用特征的基本生理参数(王庆伟等,2010)。植物光合作用是对环境变化较为敏感的生理过程,受到光照强度、温度、水分等许多环境因素的影响。在逆境条件下,植物自身会沿着有利于光合作用的方向发展以适应环境变化。本研究中,由图1和表1可知,遮阴辣椒的最大净光合速率 P_{nmax} 、光补偿点 I_c 和暗呼吸速率 R_d 较大棚辣椒均有增加,而饱和光强 I_{sat} 则小于大棚辣椒的饱和光强;光饱和点的提高有利于辣椒在较高的光强下生长,而光补偿点的下降有利于辣椒植株充分利用弱光(赵花荣等,2017),这也与姚玉璧等(2018)的研究结果一致。如,姚玉璧等发现,单独增温条件下,光饱和点降低,暗呼吸速率升高,马铃薯物异化作用(即分解代谢)增强。

本研究中,遮阴和大棚条件下,除光照环境不同外,温度环境也不相同。例如,辣椒在遮阴条件下环境的温度为32~38℃,比大棚条件下辣椒的26~32℃最少高6℃。而温度升高对植物的主要影响体现在对作物的光合作用和蒸腾作用两个方面。本研究结果表明:在光强超过400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,大棚下辣椒的净光合速率低于遮阴下辣椒(图1);光强在0~1800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,遮阴辣椒的蒸腾速率增长明显高于大棚辣椒(图2),即遮阴条件下辣椒的蒸腾速率对光响应曲线的直线斜率比大棚里辣椒的斜率高50%,且当光强等于1800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,遮阴下辣椒的蒸腾速率比大棚辣椒高约43.3%。表明环境温度与蒸腾速率成明显的正相关。这与前人的研究结果相似(Avola *et al.*, 2008; Gratani *et al.*, 2009; 张锦春等, 2005; 赵晨光等, 2017; 刘龙等, 2018; 齐长雪等, 2018)。

植物叶片的瞬时水分利用效率是净光合速率与蒸腾速率的比值,能反映出植物叶片的瞬间反应能力以及植物对水分的利用情况(靳新红等,2007; Flexas *et al.*, 2013; Franco *et al.*, 2018)。同时,它也是显示植物耐旱性的指标,即在相同条件下,水分利用效率高的植物的抗旱能力强(Centritto *et al.*, 2000; Alexander *et al.*, 2007; 董智等, 2009; 曾欢欢等, 2019)。因此,高瞬时水分利用效率也是今后作物选育和培育的重要指标之一(Flexas *et al.*, 2013)。由图3可知,辣椒叶片的 WUE_{inst} 对光响应的变化规

律:在较低光强时叶片的 WUE_{inst} 随着光强的增加而非线性增加达到最大值,然后随着光强的增加而下降。这与已有的研究结果类似(常宗强等,2011; 孙景宽等,2013; Schull *et al.*, 2015)。例如,孙景宽等(2013)发现,不同浓度盐分胁迫下二色补血草的 WUE_{inst} 达到最大值($WUE_{inst-max}$)所对应的饱和光强($I_{inst-sat}$)皆为800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本研究中,由表2和表3可知,大棚辣椒和遮阴辣椒的最大瞬时水分利用效率及所对应的饱和光强均无明显差异,但大棚辣椒和遮阴辣椒达到最大净光合速率时的饱和光强(I_{sat})与达到最大瞬时水分利用效率时的饱和光强($I_{inst-sat}$)均有显著性差异($P < 0.05$)(表3)。对比遮阴辣椒和大棚辣椒可以发现,尽管遮阴辣椒的最大净光合速率(15.31 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)大于大棚辣椒的最大净光合速率(11.99 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),但由于随着光强的增加蒸腾速率一直在上升而净光合速率的增长逐渐达到平台期,说明净光合速率的增长幅度小于蒸腾速率的增幅使得遮阴辣椒的最大瞬时水分利用效率(1.24 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)低于大棚辣椒的最大瞬时水分利用效率(1.38 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$),从而导致了辣椒叶片光合作用和瞬时水分利用效率达到最大时对应的饱和光强不同步,即在中等光强下大棚和遮阴下辣椒叶片的瞬时水分 WUE_{inst} 就达到最大值,而两种光照条件下辣椒叶片的净光合速率在较高的光强下才达到最大值(表3)。这表明无论是遮阴还是大棚条件下辣椒叶片的 WUE_{inst} 要比其对应的 P_n 先到最大值。

4 结论

本研究中,两种不同光照环境下的辣椒的光合作用变化趋势相近;遮阴处理下的辣椒和大棚辣椒蒸腾速率随着光强的增加不断地增加且在所测光强范围内并未出现减缓或平台期;两种光照环境下的瞬时水分利用效率随着光强的增加快速增加,达到最大瞬时水分利用效率后均下降,在光强约为1800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时两者瞬时水分利用效率趋于相等;两种不同光照条件下的辣椒光合作用和瞬时水分利用效率达到最大时的光强均存在显著性差异,揭示了两种光照条件下辣椒的光合作用与瞬时水分利用效率不同步。

参考文献

- 白海波, 吕学莲, 惠建, 等. 2017. 灌水量对宁夏春小麦光合特性及产量构成因素的影响. 中国农学通报, **33**(34): 9-14.
- 常宗强, 冯起, 张秀凤, 等. 2011. CO₂浓度升高对极端干旱区多枝桧柳叶片水分利用效率的影响. 干旱区地理, **34**(3): 499-504.
- 陈平, 孟平, 张劲松, 等. 2014. 两种药用植物生长和水分利用效率对干旱胁迫的响应. 应用生态学报, **25**(5): 1300-1306.
- 董智, 马宇飞, 李红丽, 等. 2009. 4个紫花苜蓿品种分枝期光合速率、蒸腾速率日变化及其影响因子分析. 中国草地学报, **31**(3): 67-71.
- 姬慧娟, 贾会霞, 章小铃, 等. 2016. 干旱胁迫对红皮柳光合特性日变化及生长的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, **40**(6): 41-46.
- 靳新红, 王百田, 吴瑞菊, 等. 2007. 土壤水分对核桃幼树蒸腾特性的影响. 山西林业科技, **36**(2): 5-8.
- 李晨曦, 何章, 许永华, 等. 2017. 不同遮荫棚下农田人参叶片光合特性的生育期变化. 吉林农业大学学报, **39**(1): 32-37.
- 李景浩, 李慧, 魏亚伟, 等. 2016. 樟子松、油松、蒙古栎水分利用效率种间变化及其对环境因子的响应差异. 植物研究, **36**(4): 581-587.
- 李雪松, 贾德彬, 钱龙娇, 等. 2018. 基于同位素技术分析不同生长季节杨树水分利用. 生态学杂志, **37**(3): 840-846.
- 刘佳, 刘雅琴, 李靖, 等. 2017. 碱胁迫对山桃叶片形态结构及光合特性的影响. 西南农业学报, **30**(2): 327-332.
- 刘龙, 姚云峰, 郭月峰, 等. 2018. 准格尔旗砒砂岩区沙棘蒸腾耗水与环境因子的关系. 中国农业大学学报, **23**(6): 108-120.
- 齐长雪, 张丹蓉, 赵磊, 等. 2018. 毛乌素沙地沙柳蒸腾特征研究. 陕西农业科学, **64**(10): 1-5, 11.
- 侍瑞, 苏培玺, 周紫鹃, 等. 2018. 三种不同类型草甸生态系统下鹅绒委陵菜的光合特性. 生态学杂志, **37**(7): 1943-1951.
- 孙景宽, 陆兆华, 夏江宝, 等. 2013. 盐胁迫对二色补血草光合生理生态特性的影响. 西北植物学报, **33**(5): 992-997.
- 王建林, 于贵瑞, 房全孝, 等. 2008. 不同植物叶片水分利用效率对光和CO₂的响应与模拟. 生态学报, **28**(2): 525-533.
- 王庆伟, 于大炮, 代力民, 等. 2010. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展. 应用生态学报, **21**(12): 3255-3265.
- 熊伟, 王彦辉, 于澎涛. 2005. 树木水分利用效率研究综述. 生态学杂志, **24**(4): 417-421.
- 姚玉璧, 雷俊, 牛海洋, 等. 2018. CO₂浓度升高与增温对半干旱区马铃薯光合特性的协同影响. 环境学报, **27**(5): 793-801.
- 叶子飘, 康华靖, 段世华, 等. 2018. 不同CO₂浓度下大豆叶片的光合生理生态特性. 应用生态学报, **29**(2): 583-591.
- 叶子飘, 杨小龙, 康华靖. 2016. C3和C4植物光能利用效率和水分利用效率的比较研究. 浙江农业学报, **28**(11): 1867-1873.
- 叶子飘, 张海利, 黄宗安, 等. 2017. 叶片光能利用效率和水分利用效率对光响应的模型构建. 植物生理学报, **53**(6): 1116-1122.
- 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 2015. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应. 生态学报, **35**(9): 2902-2909.
- 曾欢欢, 刘文杰, 吴骏恩, 等. 2019. 西双版纳地区丛林式橡胶林内植物的水分利用策略. 生态学杂志, **38**(2): 394-403.
- 张锦春, 赵明, 张应昌, 等. 2005. 灌溉植被梭梭、白刺光合蒸腾特性及影响因素研究. 西北植物学报, **25**(1): 70-76.
- 赵晨光, 孟和巴雅尔, 程业森. 2017. 阿拉善白刺蒸腾速率的影响因子分析. 防护林科技, **14**(9): 35-38, 47.
- 赵花荣, 任三学, 齐月. 2017. 高湿和干旱对夏玉米灌浆期叶片光合特性的影响. 中国农学通报, **33**(31): 15-21.
- 朱林, 高雪, 张会丽, 等. 2018. 苜蓿叶片碳同位素分辨率与水分利用效率的关系. 中国草地学报, **40**(1): 17-23.
- Alexander G, Haldimann P, Feller U. 2007. Photosynthetic performance and water relations in young pubescent oak (*Quercus pubescens*) trees during drought stress and recovery. *New Phytologist*, **174**: 799-810.
- Avola G, Cavallaro V, Cristina P, et al. 2008. Gas exchange and photosynthetic water use efficiency in response to light, CO₂ concentration and temperature in *Vicia faba*. *Journal of Plant Physiology*, **165**: 796-804.
- Cabrera-Bosquet L, Molerol G, Bort J, et al. 2007. The combined effect of constant water deficit and nitrogen supply on WUE, NUE and $\delta^{13}\text{C}$ in durum wheat potted plants. *Annals of Applied Biology*, **151**: 277-289.
- Centritto M, Loreto F, Massacci A, et al. 2000. Improved growth and water use efficiency of cherry saplings under reduced light intensity. *Ecological Research*, **15**: 385-392.
- Flexas J, Niinemets Ü, Gallé A, et al. 2013. Diffusional conductances to CO₂ as a target for increasing photosynthesis and photosynthetic water-use efficiency. *Photosynthesis*

- Research*, **117**: 45–59.
- Franco JG, King SR, Volder A. 2018. Component crop physiology and water use efficiency in response to intercropping. *European Journal of Agronomy*, **93**: 27–39.
- Gratani L, Varone L, Crescente MF. 2009. Photosynthetic activity and water use efficiency of dune species: The influence of air temperature on functioning. *Photosynthetica*, **47**: 575–585.
- Hsiao TC, Xu LK. 2000. Predicting water use efficiency of crops. *Acta Horticulturae*, **537**: 199–206.
- Islam MR, Garcia SC. 2012. Effects of sowing date and nitrogen fertilizer on forage yield, nitrogen-and water-use efficiency and nutritive value of an annual triple-crop complementary forage rotation. *Grass and Forage Science*, **67**: 96–110.
- Ogutu BO, Dash J, Dawson TP. 2013. Developing a diagnostic model for estimating terrestrial vegetation gross primary productivity using the photosynthetic quantum yield and earth observation data. *Global Change Biology*, **19**: 2878–2892.
- Plénet D, Etchebest S, Mollier A, *et al.* 2000. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. *Plant and Soil*, **223**: 117–130.
- Schull MA, Anderson MC, Houborg R, *et al.* 2014. Thermal-based modeling of coupled carbon, water, and energy fluxes using nominal light use efficiencies constrained by leaf chlorophyll observations. *Biogeosciences*, **11**: 14133–14171.
- Ye ZP, Suggett DJ, Robakowski P, *et al.* 2013. A mechanistic model for the photosynthesis-light response based on the photosynthetic electron transport of photosystem II in C₃ and C₄ species. *New Phytologist*, **199**: 110–120.
- Ye ZP. 2007. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, **45**: 637–640.
-
- 作者简介** 钟平安,男,1977年生,博士研究生,讲师,主要从事植物光合作用生理生态研究。E-mail: zpa778210@163.com
- 责任编辑** 李凤芹
-