

土壤水分变异对火炬树光合作用日变化的影响

郭二辉¹, 田朝阳², 刘保国^{2*}

(1. 河南农业大学 生命科学学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 通过盆栽模拟对比试验, 于 2008 年 8 月研究了城市居民区绿地、城区道路绿化带与郊区林地 3 种土壤条件下的水分变异对火炬树光合作用日变化规律的影响。结果表明: 随着模拟的郊区林地(土壤含水量 22.63%)—城市居民区绿地(14.21%)—城区道路绿化带(9.90%)的土壤水分含量变化, 火炬树的光合速率日变化曲线逐渐从“单峰型”转变成典型的“双峰型”, 出现了光合午休现象, 同时, 制约光合速率降低的主要因素也由气孔限制逐步转变为非气孔限制因素。火炬树的光合速率、气孔导度、蒸腾速率和细胞间 CO₂ 浓度日平均值均随土壤水分胁迫增强而降低, 但不同环境水分下光合气体交换参数变化的幅度不同。随土壤水分梯度的降低, 火炬树的水分利用效率有所提高, 说明火炬树在城区干旱环境下可以通过降低光合生长、气孔导度和蒸腾耗水, 来提高水分利用效率, 适应城区的干旱环境。

关键词: 火炬树; 城市—郊区土壤水分变异; 光合作用特征; 日变化规律

中图分类号: S79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-3268(2011)08-0177-06

Effects of Soil Moisture Variation on the Daily Dynamics of Photosynthesis of *Rhus typhina*

GUO Er-hui¹, TIAN Chao-yang², LIU Bao-guo^{2*}

(1. College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Through the comparative experiments, we studied the influence on the leaf daily dynamics of photosynthesis of *Rhus typhina* with the change of moisture's content in three different kinds of soil: suburban forest land, urban inhabited-area green space and the road greenbelts in August 2008 by using Li-6400 portable photosynthesis system. The results showed: Along with changes of the suburban-urban moisture gradient, the diurnal variation curve of photosynthetic rate of *Rhus typhina* gradually shifted from a typical single peaked curve to a double peaked one that signifies midday depression of photosynthesis. At the same time, according to the criteria suggested by Farquhar and Sharkey, the main factors affecting midday photosynthesis rate changed from stomata limitation to non-stomata limitation. The data of photosynthesis rate (Pn), stomata conductance (Gs), transpiration rate (Tr) and intercellular CO₂ concentration (Ci) of *Rhus typhina* reduced with the strength of drought stress. The variational scope of gases exchange parameter during photosynthesis was different under different soil moisture conditions. With the decrease of soil moisture, the water use efficiency (WUE) of *Rhus typhina* increased, implying that under the urban arid environment, *Rhus typhina* could raise the water use efficiency (WUE) and adapted to the arid environment, by reducing the photosynthesis rate (Pn), stomata conductance (Gs) and transpiration rate (Tr).

Key words: *Rhus typhina*; Urban-suburb soil moisture variation; Photosynthetic; Daily dynamics

收稿日期: 2011-04-10

基金项目: 国家科技部科技支撑计划资助项目(2007BAC28B04)

作者简介: 郭二辉(1984-), 男, 河南洛阳人, 在读博士研究生, 研究方向: 景观与植物生态学。E-mail: guoerhui@126.com

* 通讯作者: 刘保国(1975-), 男, 河南郑州人, 讲师, 硕士, 主要从事生态规划和风景园林设计的教学与研究。

E-mail: tcytcytcytcy@163.com

土壤水分状况是许多陆地生态系统中植物生长的主要限制因子,对植物的光合生理、形态结构都会产生较大的影响^[1-3]。由于我国降水的季节和地域分布极不均匀,水资源短缺日趋明显,土壤有效含水量逐年减少,这将严重影响植物的分布和生长发育^[4]。特别是在城市环境下,由于强烈人类活动的干扰如地表面硬化、建筑施工和自然枯枝落叶清除等,改变了城市地区植物赖以生存的环境条件,使城市土壤形成无层次、无规律、腐殖质层浅薄的土体构造,城市土壤密实板结,透水保水性能很差^[5-6]。再加上城市地区的“热岛”、“干岛”效应的影响,使得水分胁迫成为制约城市绿化植物生长发育的重要逆境因子。

火炬树(*Rhus typhina*),属于漆树科盐肤木属落叶灌木或小乔木,原产于北美,现在欧洲、亚洲等许多国家都有栽培,是优良的园林观赏树木^[7-11]。采用盆栽模拟对比试验的方法,研究了不同环境下的土壤水分变化对火炬树光合生理生态行为的影响,分析了不同土壤环境水分变异胁迫下火炬树的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率等生理生态指标的变化响应关系,为促进对城市植被生态服务的适应性机制的理解和城市植物生态服务功能维护与管理提供科学依据和参考。

1 材料和方法

1.1 试验地区概况

试验地设在中国农业科学院院内的试验地中,地处北京市海淀区。气候属温带湿润季风气候区,冬季寒冷干燥,盛行西北风,夏季高温多雨,盛行东南风。年均气温 12.5℃,1 月份平均气温-4.4℃,极端最低气温为-21.7℃,7 月份平均气温为 25.8℃,最高气温为 41.6℃。年日照时数 2662 h,无霜期 211 d。年平均降水量 628.9 mm,集中于夏季的 6-8 月,降水量为 465.1 mm,占全年降水的 70%;冬季的 12 月-翌年 2 月降水量最少。

1.2 研究方法

1.2.1 试验处理 于 2008 年 4 月,选取生长良好、无病虫害、大小基本一致的 3 a 生火炬树树苗,栽植于口径 38 cm、地径 24 cm、高 30 cm 的花盆中,每盆装土 15 kg,盆栽用土为中国农业科学院内的裸地土壤,其主要的理化性质如下:土壤有机质含量为 10.9 g/kg,全氮为 0.65 g/kg,有效氮为 41.4 mg/kg,有效磷为 29.4 mg/kg,有效钾为 43.8 mg/kg。为了更好地模拟不同自然环境下的土壤水分情况,首先在城区道路绿化带(北京市北三环联想桥附近)、城市居民区绿地(北京市北三环附近住宅小区)和郊区林地(北

京市顺义区衙门村附近)分别采集 0~20 cm 表层土样,测定土壤的含水量。试验据此测定数据设置 3 个水分梯度处理:(1)水分条件 CK(土壤含水量为 22.63%)代表郊区林地土壤水分,(2)水分条件 MW(土壤含水量为 14.21%)代表城市居民区绿地土壤水分,(3)水分条件 LW(土壤含水量为 9.90%)代表城市道路绿化带土壤水分含量,共 3 个处理,每处理重复 6 次。栽植苗木后,正常浇水,使幼苗正常萌芽,待生长 2 个月后按照试验设计进行水分处理。晴天正常光照,雨天用遮雨棚防雨,每隔 2 d 在 17:00 左右,利用 HAW-30K(0.5 g)天平定时监测土壤含水量,并及时补充土壤水分,将土壤含水量控制在设定范围内。

1.2.2 测定方法 于 2008 年 8 月选择晴朗、无风的天气,采用美国 Li-cor 公司生产的 Li-6400 便携式光合测定仪在每天 6:00-18:00 每 2 h 测定 1 次,每处理选择健康植株 3~5 株,选取向阳面中上部生长方向基本一致的全展叶进行测定(每株取 3~5 片叶),待仪器稳定后,测定叶片的光合速率(P_n , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、气孔导度(G_s , cm/s)、细胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)、叶面水气压亏缺(V_{pd} , kPa)、大气 CO_2 浓度(C_a , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)、光合有效辐射(PAR , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、相对空气湿度(RH , %)、大气温度(T_a , $^{\circ}\text{C}$)等光合指标,每片叶子记录 3 个值。另外,计算水分利用效率(WUE , mmol/mol)= P_n/T_r ,气孔限制值(L_s , %)= $1-C_i/C_a$ 。测定时使用开放气路,空气流速为 0.5 L/min。

1.3 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel for Windows 软件绘图,用 SPSS 12.0 for Windows 进行统计分析,采用 One-way ANOVA 对数据进行方差分析和 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 火炬树生长的环境因子日变化规律

图 1 表明,在 6:00-18:00, PAR 、 T_a 和 C_a 的日变化基本上均为“单峰”曲线。 PAR 在 6:00-18:00 的变化范围为 300.25~1750.50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; T_a 变化范围在 23.15~39.31 $^{\circ}\text{C}$ 。 RH 的变化规律与 T_a 呈极显著负相关($R=-0.98$)。 RH 在 6:00 左右最高,为 46.20%,此后,随着 T_a 的升高而迅速下降,到 12:00 左右降到最低值 22.46%,之后随着 T_a 的下降又有所回升。 C_a 也呈现出有规律的日变化进程,变化范围在 385.34~395.12 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

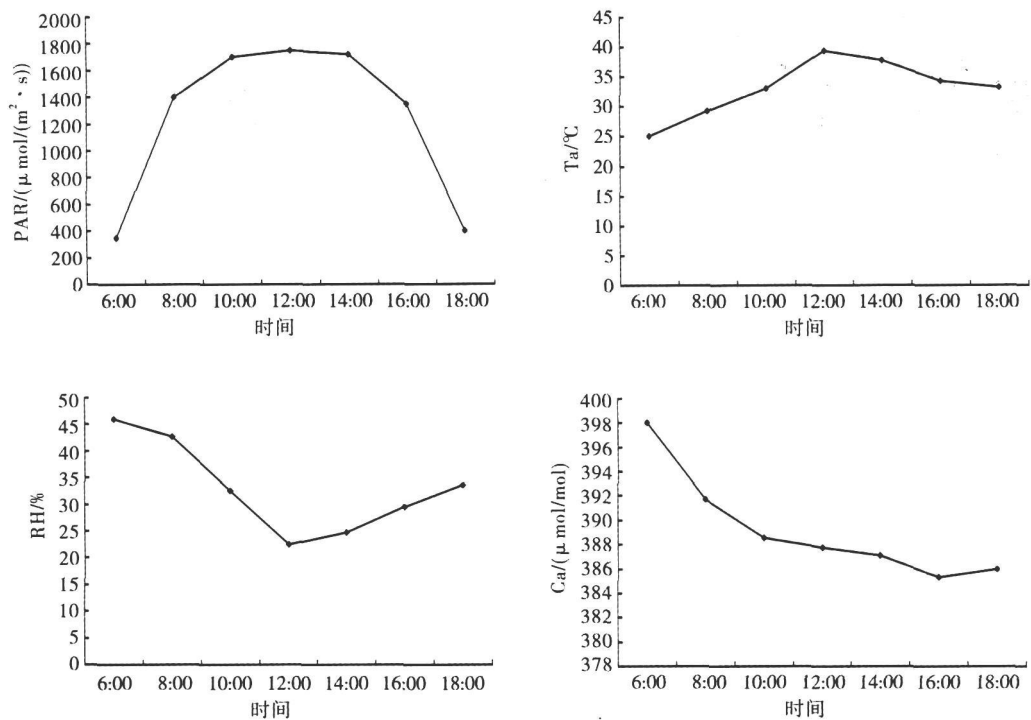


图 1 火炬树生长的环境因子日变化

2.2 不同环境下水分变化对火炬树的光合速率 (Pn) 和气孔导度 (Gs) 日变化的影响

由图 2 可见, 火炬树叶片 Pn 的日变化在郊区林地(CK)的水分条件下为单峰曲线, 在 8: 00 达到了全天的最大值, 为 13. 50 μmol/(m² · s), 表明不存在明显的“午休”现象。通常认为, “午休”现象是光照过强导致温度过高而使气孔关闭, 这就限制了 CO₂ 进入叶内, 并影响光化学反应, 从而对光合作用

造成影响, 使 Pn 显著降低^[1, 12]。在城市居民区绿地(MW)和城市道路绿化带(LW)的水分环境下, Pn 的日变化转变为双峰曲线, Pn 的日平均值的顺序依次为: CK (9. 79 μmol/(m² · s)) > MW(7. 40 μmol/(m² · s)) > LW(5. 69 μmol/(m² · s))。方差分析表明, CK 和 MW、MW 和 LW 之间无显著性差异, 但 CK 和 LW 有显著性差异(P< 0. 05), 说明火炬树对干旱环境有一定的适应能力。

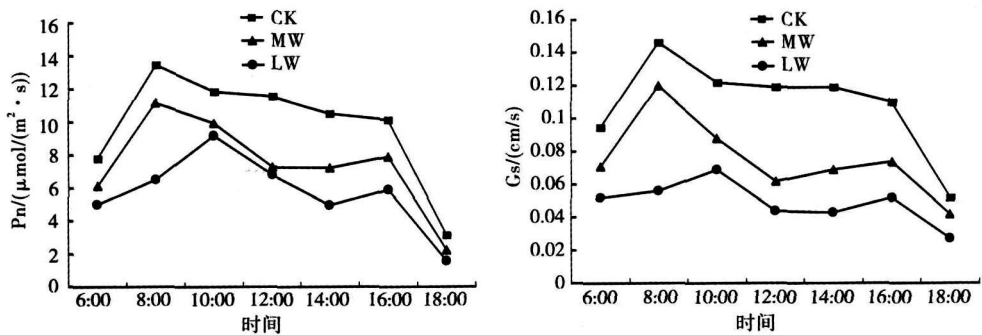


图 2 不同环境水分条件下火炬树叶片的光合速率、气孔导度日变化

火炬树的 Gs 日变化在郊区林地(CK)的水分条件下为单峰曲线, 在 8: 00 达到了全天的最大值, 为 0. 146 cm/s; 在城市居民区绿地(MW)和城市道路绿化带(LW)的水分环境下, Gs 的日变化呈现为双峰曲线。不同水分处理的 Gs 日平均值的顺序依次为: CK (0. 109 cm/s) > MW (0. 075 cm/s) > LW (0. 049 cm/s)。方差分析表明, CK 和 MW、MW 和

LW 之间有显著性差异(P< 0. 05), CK 和 LW 有极显著差异(P< 0. 01)。

2.3 不同环境下水分变化对火炬树蒸腾速率 (Tr) 和细胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 的影响

由图 3 可见, 在郊区林地(CK)的水分条件下, Tr 为单峰曲线, 在 12: 00 左右达到了最大值 5. 43 mmol/(m² · s); 在城市居民区绿地(MW)下,

Tr 也为单峰曲线, 在 12: 00 左右达到了最大值 3.22 mmol/(m²·s); 城市道路绿化带(LW)土壤水分下, Tr 为双峰曲线, 在上午 10: 00 和下午 16: 00 左右出现 2 个峰值, 分别为 2.23 mmol/(m²·s) 和 2.21 mmol/(m²·s)。Tr 的日平均值顺序依次为: CK(3.4377 mmol/(m²·s)) > MW(2.4489 mmol/(m²·s)) > LW(1.6424 mmol/(m²·s))。方差分析表明, CK 和 MW, MW 和 LW 之间无显著性差

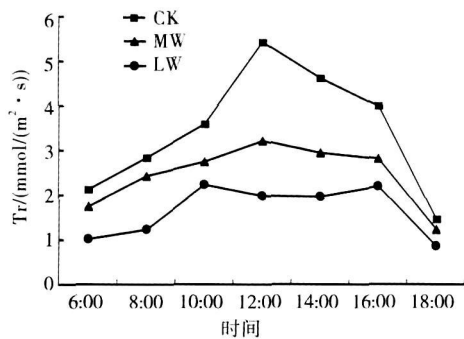
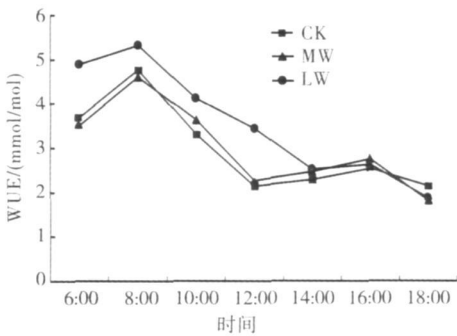


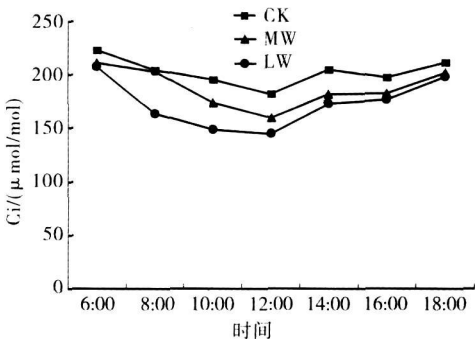
图 3 不同环境水分条件下火炬树叶片的蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度日变化

2.4 不同环境水分变化对火炬树水分利用效率(WUE) 和气孔限制值(Ls)的影响

水分利用效率(WUE) 是光合速率和蒸腾速率的比值, WUE 的大小可以反映植物对逆境适应能力的强弱^[12-15]。由图 4 可见, 在郊区林地(CK) 水分条件下, 火炬树的 WUE 日变化均为单峰曲线, 在 8: 00 达到了峰值 4.76 mmol/mol; 在城市居民区绿



地(MW) 和城市道路绿化带(LW) 水分环境下, WUE 日变化均为双峰曲线, 在 8: 00 和 16: 00 左右出现了 2 个峰值。WUE 的日平均值的顺序依次为: CK(2.976 mmol/mol) < MW(3.005 mmol/mol) < LW(3.535 mmol/mol)。在不同水分条件下, Ls 日变化规律也有所不同。Ls 的日平均值顺序依次为: CK(0.47) < MW(0.51) < LW(0.55)。



地(MW) 和城市道路绿化带(LW) 水分环境下, WUE 日变化均为双峰曲线, 在 8: 00 和 16: 00 左右出现了 2 个峰值。WUE 的日平均值的顺序依次为: CK(2.976 mmol/mol) < MW(3.005 mmol/mol) < LW(3.535 mmol/mol)。在不同水分条件下, Ls 日变化规律也有所不同。Ls 的日平均值顺序依次为: CK(0.47) < MW(0.51) < LW(0.55)。

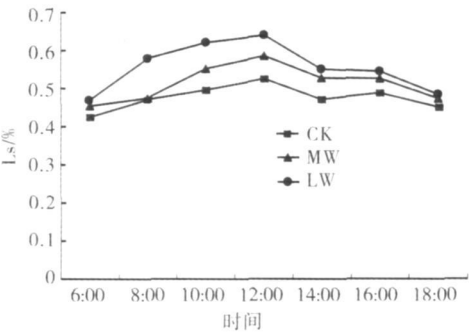


图 4 不同环境水分条件下火炬树叶片的水分利用效率和气孔限制值日变化

3 讨论

水分胁迫是制约我国北方城市区域绿化植物生长发育的主要逆境因子。由于城市人类活动干扰的时空异质性, 导致了城市不同区域的土壤环境发生了重大改变。城市不同的环境下如郊区林地、居民区绿地和城市道路绿化带的土壤水分特征也具有很强的异质性, 研究这种变异特征对植物光合生理生态行为的影响具有很大的现实意义。

本试验通过盆栽模拟的方法, 研究了城镇不同区域土壤水分环境对火炬树光合作用的影响, 结果表明, 随郊区林地- 城市居民区绿地- 城市道路绿化带土壤水分含量的降低, 火炬树的光合速率日变化规律曲线逐渐从“单峰型” 转变成典型的“双峰型”, 在城市居民区绿地(MW) 和城市道路绿化带(LW) 水分环境下, 出现了较明显的光合“午休” 现象。植物叶片 Pn 中午降低的自身因素主要有两个: 即气孔因素和非气孔因素。根据 Farquhar 和

Sharkey 等的观点, 只有当光合速率(P_n)和细胞间 CO_2 浓度(C_i)变化方向相同, 两者都减小, 且气孔限制值(L_s)增大, 才可认为光合速率的下降主要由气孔导度(G_s)引起的。若细胞间 CO_2 浓度(C_i)和光合速率(P_n)变化方向相反, 气孔限制值(L_s)减小, 则光合速率下降应归因于叶肉细胞同化能力的降低^[15-16]。试验表明, 在城市居民区绿地水分条件下, 火炬树在 10:00–12:00, P_n 、 G_s 和 C_i 都呈下降趋势, 说明 P_n 的下降主要是受气孔因素限制。在城市道路绿化带的土壤水分条件下, 火炬树在 10:00–12:00, P_n 的下降也是受气孔因素限制; 在 12:00–14:00 阶段, P_n 的下降伴随着 C_i 的上升, 说明 P_n 的下降主要是受非气孔因素限制。根据许大全等的总结, 在许多轻度和中度水分胁迫条件下, 叶片光合速率的降低主要是气孔部分关闭的结果; 在严重水分胁迫下, 由于叶绿体和细胞失水, 叶绿体中一些参与碳固定的酶活性受到抑制, 导致叶绿体发生不可逆的破坏, 从而严重降低了植物的光合速率^[17-19]。本试验的结果与上述观点相符合, 在试验的 3 种土壤水分环境中, 城区道路绿化带区域受人类活动的干扰最重, 由于城市交通安全和景观卫生等的需要, 道路绿化带中的自然枯枝落叶、修剪枝叶皆被清除, 造成了土壤结构的破坏, 持水保水能力严重降低; 再加上周边道路大量水泥硬化区的存在, 对区域大气–土壤水热交换平衡造成了很大负面影响。这些综合因素严重影响了道路绿化带植物的生长发育和生态服务功能的发挥。相比之下, 城市居民区绿地面积一般比道路绿化带稍大, 受人类活动的干扰也较弱, 因此植物的生长也较好, 但与郊区林地环境相比还有一定的差异。

气孔导度(G_s)的变化对植物水分状况及 CO_2 同化有着重要影响^[20-21]。 G_s 的大小对 P_n 和 T_r 均有一定程度的制约, 进而影响水分利用率。本试验的结果表明, 在城市居民区绿地(MW)和城市道路绿化带(LW)的水分胁迫下, 火炬树的气孔导度(G_s)也随之下降, 水分胁迫程度不同, 气孔导度的下降幅度不同, 这与付士磊等对杨树, 朱教君等对樟子松的研究结果相似^[3, 20]。不同水分条件下, 火炬树 G_s 的变化趋势与 P_n 基本一致, 呈正相关关系。

有研究认为, 适度的水分胁迫能使植物的水分利用效率(WUE)显著提高, 这是以在降低光合速率的同时通过更大程度的降低蒸腾作用来实现的^[20-22]。植物能否适应干旱的环境条件, 主要是看它们能否很好地协调碳同化和水分消耗之间的关系, 因此 WUE 的大小也可以反映植物对逆境适应能力的强弱^[14, 20-21]。本试验结果表明, 火炬树在城

市居民区绿地(MW)和城市道路绿化带(LW)的水分环境下的 WUE 日平均值均大于郊区林地(CK), 说明火炬树在干旱环境下, 可以通过降低光合生长、气孔导度和蒸腾耗水, 提高水分利用效率, 增强抗旱性来适应环境, 具有较强的抗旱能力。在水分充足的条件下, 火炬树以较大的气孔导度、蒸腾耗水, 来增加植物的生物量; 在干旱的环境条件下, 火炬树以降低蒸腾, 提高水分利用效率来抵抗干旱, 维持生命。

如何改善城市区域土壤的质量如持水保水能力、土壤有机质等, 充分发挥城市植被的生态服务功能是新时期建设生态城市的重大现实需求。城市绿地中的动植物残体、自然枯枝落叶及修剪枝叶的原地归还还是改善土壤结构和质量的一个重要途径, 因而如何改进这些资源的利用方式, 变废为宝, 同时又不影响城市道路交通安全、景观卫生的要求是城市管理者面临的一个重要生态环境问题。由于植物的光合作用受很多内部生理机制和外部环境条件的影响, 本试验由于时间和条件的限制, 仅模拟了不同环境下土壤水分变化对光合生理生态的影响, 具有很大的不足, 因此植物对不同城镇区域环境的适应性研究还有待进一步的深入。

参考文献:

- [1] 韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 等. 紫花苜蓿对干旱胁迫的光合生理响应[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5229–5237.
- [2] 王云龙, 许振柱, 周广胜. 水分胁迫对羊草光合产物分配及其气体交换特征的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 803–809.
- [3] 付士磊, 周永斌, 何兴元, 等. 干旱胁迫对杨树光合生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 2016–2019.
- [4] 姬兰柱, 肖冬梅, 王森. 模拟水分胁迫对水曲柳光合速率及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 408–412.
- [5] 尹幸福, 杨朗生, 任玉英. 城市土壤对园林树木生长的影响[J]. 四川林业科技, 2005, 26(3): 74–75.
- [6] 杨瑞卿, 汤丽青. 城市土壤的特征及其对城市园林绿化的影响[J]. 江苏林业科技, 2006, 33(3): 52–54.
- [7] 喻晓丽, 邸雪颖, 宋丽萍. 水分胁迫对火炬树幼苗生长和生理特性的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(11): 57–61.
- [8] 张明如, 翟明普, 贾黎明, 等. 火炬树克隆植株生长和生物量特征的研究[J]. 林业科学, 2004, 40(3): 39–45.
- [9] 张川红, 郑勇奇, 李继磊, 等. 北京地区火炬树的萌芽繁殖扩散[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 978–985.

(下转第 185 页)

植株健壮生长的基础上, 防治蚜虫、茶黄螨、白粉虱等传毒害虫尤为重要, 同时向叶面喷洒 1.5% 植病灵 600 倍液和氨基酸复合肥 300 倍液。对辣椒疫病、炭疽病、疮痂病等病害, 可选用 75% 百菌清 500 倍或 80% 新万生 800 倍液等保护性药剂交替使用, 每 8~10 d 一遍。对于土传病害, 要防止大水漫灌和使用未腐熟的有机肥, 防止耕层过浅、肥料过度集中在根际周围, 及雨水串棚。提倡实行起垄栽培, 结合整地撒施硫酸铜。发现病株及时用药液灌根 (70% 甲基托布津 800 倍+ 硫酸链霉素 4000 倍)。

秋延大棚辣椒栽培中, 茶黄螨、红蜘蛛危害较大, 要采用淋溶式喷药防治, 药剂可选用 1.8% 阿维菌素 4000 倍+ 20% 达螨灵 1500 倍。对菜青虫、小菜蛾等食心虫, 在幼龄期及时喷洒 0.5% 甲维盐 2000 倍液有特效。白粉虱繁殖快, 虫口数量大, 喷药时注意杀卵, 可选用 25% 阿克泰 4500 倍+ 功夫菊酯 2000 倍。

参考文献:

- [1] 刘建华. 杂交辣椒大田主要病虫害及其防治措施[J]. 湖南农业科学, 1990(3): 39-40.
- [2] 姜俊, 胡应北, 王梦扬. 辣椒新品种驻椒 18 的选育[J]. 中国瓜菜, 2010(4): 24-26.
- [3] 孙显芳, 郭国雄, 邢芳, 等. 干辣椒无公害高产栽培技术[J]. 耕作与栽培, 2005(4): 48-49.
- [4] 陈远良, 李建华. 辣椒新品种新椒 16 号的选育[J]. 中国瓜菜, 2010(1): 16-17.
- [5] 何晓明, 巩振辉, 王鸣, 等. 辣椒抗病育种的进展与展望[J]. 中国蔬菜, 1995(2): 55-59.
- [6] 刘建华, 周叶方, 刘勇, 等. 辣椒主要灾害性病害及其全期控制措施[J]. 植物保护, 1998(2): 31-33.
- [7] 袁风亭. 大棚辣椒关键栽培技术[J]. 现代农业科技, 2010(23): 127.
- [8] 李彩雄, 张志坚, 钟运源. 夏季辣椒病害症状及防治措施[J]. 现代农业科技, 2010(23): 175, 179.
- [9] 李勤华. 无公害辣椒高产栽培技术[J]. 现代农业科技, 2010(21): 125, 138.
- [10] 姜文华. 小辣椒优质高产栽培技术[J]. 现代农业科技, 2010(19): 113.
- [11] 申爱民, 赵香梅, 李永辉, 等. 辣椒新品种郑椒 11 号的选育[J]. 中国瓜菜, 2009(3): 21-23.
- [12] 邓琼芳, 王怀松, 吴秀芳, 等. 大棚辣椒秋延后高效栽培技术[J]. 中国瓜菜, 2009(3): 45-46.
- [13] 胡洽, 俞世敏. 甜杂二号甜椒的选育[J]. 华北农学报, 1990, 6(4): 72-76.
- [14] 郭富常, 加藤彻. 关于青椒整枝方法的研究[J]. 华北农学报, 1989, 5(4): 67-72.
- [10] 郭二辉, 胡聘, 田朝阳. 外来种火炬树光合作用日变化与环境因子的关系[J]. 河南农业科学, 2010(6): 109-113, 159.
- [11] 樊巍, 高喜荣, 赵东, 等. 太行山退化山地火炬树群落物种多样性与土壤特性变化的研究[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(3): 299-302.
- [12] 刘玉华, 史纪安, 贾志宽, 等. 旱作条件下紫花苜蓿光合蒸腾日变化与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1811-1814.
- [13] 刘金祥, 麦嘉玲. CO₂ 浓度增强对沿阶草光合特性的影响[J]. 中国草地, 2004, 26(3): 13-18.
- [14] 刘玉华, 贾志宽, 史纪安, 等. 旱作条件下不同苜蓿品种光合作用的日变化[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1468-1477.
- [15] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [16] Xu D Q, Li D Y, Shen Y G, et al. Studies on midday depression of photosynthesis in wheat leaves under field conditions [J]. Acta Phytophysiology Sinica, 1984, 10(3): 1-11, 269-276.
- [17] 许大全. 光合作用测定及研究中一些值得注意的问题[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(6): 1163-1167.
- [18] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241-244.
- [19] 许大全, 沈允钢. 植物光合作用效率的日变化[J]. 植物生理学报, 1997, 23(4): 410-416.
- [20] 朱教君, 康宏樟, 李智辉, 等. 水分胁迫对不同年龄沙地樟子松幼苗存活与光合特性影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2527-2532.
- [21] 郭卫华, 李波, 黄永梅, 等. 不同程度的水分胁迫对中间锦鸡儿幼苗气体交换特征的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2716-2722.
- [22] 崔晓阳, 宋金凤, 张艳华. 不同土壤水势条件下水曲柳幼苗的光合作用特征[J]. 应用生态学报, 2004, 28(6): 794-802.

(上接第 181 页)