

黄土半干旱区枣、榆水分利用效率的比较研究*

靳新红¹ 王百田^{2**} 郭红艳² 武晶² 廖行²

(1.北京市水利规划设计研究院 北京 100044; 2.水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 北京林业大学 北京 100083)

摘要 在黄土半干旱区，采用人工控制水分的方法，选择生长良好的枣树和榆树幼树，在晴天利用 LI-6400 便携式光合作用测定系统对其净光合速率、蒸腾速率、气孔导度进行了测定，并应用遮荫法测定不同太阳有效辐射下净光合速率、蒸腾速率，比较其水分利用效率。结果表明：不同土壤水分条件下，枣树和榆树的净光合速率日变化明显不同，枣树变化幅度大于榆树，枣树对水分的利用效率高于榆树。对枣、榆幼树连续时间内日蒸散量的测定结果表明，影响蒸散量的主要因素是土壤含水量，枣树耗水能力高于榆树，但当土壤含水量升高时枣树耗水能力反而降低，相对于枣树而言黄土半干旱区更有利于榆树生长。

关键词 枣树 榆树 土壤含水量 黄土高原 净光合速率 蒸腾速率 蒸散量 水分利用效率

中图分类号: S548; Q945 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)01-0090-04

Comparison of water use efficiency of *Zizyphus jujube* and *Ulmus pumila* in semi-arid zones of the Loess Plateau

JIN Xin-Hong¹, WANG Bai-Tian², GUO Hong-Yan², WU Jing², LIAO Hang²

(1. Beijing Institute of Hydraulic Engineering Planning, Design & Research, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract In semi-arid regions of the Loess Plateau, *Zizyphus jujube* and *Ulmus pumila* samples were selected to study the net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance using LI-6400 portable photosynthesis machine under different controlled soil water contents. Net photosynthetic and transpiration rates were observed under controlled solar radiation intensity through shading to determine water use efficiency. The results show obvious differences in the daily processes of net photosynthetic rate between *Z. jujube* and *U. pumila* under different soil water contents. The daily range of change in net photosynthetic rate and water use efficiency for *Z. jujube* is higher than that for *U. pumila*. Analysis of continuous daily transpiration rates show that soil water is a major influencing factor of evapotranspiration. *Z. jujube* has a higher water-consumption rate which decreases at high soil moistures. Therefore *U. pumila* is more suitable to semi-arid conditions of the Loess Plateau regions than *Z. jujube*.

Key words *Zizyphus jujube*, *Ulmus pumila*, Soil water content, Loess Plateau, Net photosynthetic rate, Transpiration rate, Evapotranspiration amount, Water use efficiency

(Received March 10, 2007; accepted June 20, 2008)

黄土高原干旱半干旱地区乔木树种造林成活率、材质及果树果实品质均受生态因子的影响。水分除维持树木生理生化反应外，还被光合作用所消耗，水分不足是树木光合、生长和生产力的限制因素。本研究以枣树和榆树为对象，进行了不同水分条件下两树种生理特性的研究。前人对枣树蒸腾作用及日变化规律的研究^[1]表明，金丝小枣在日均温

30.8 (6:00 ~ 20:00)、空气相对湿度 40.1% 的条件下，日均蒸腾速率为 $3.67 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ；高素华等对我国北方多沙区常见树种水分利用效率进行了研究，认为榆树的水分利用效率较低但蒸腾速率大^[2]。本研究的实验地山西省方山县地处黄土高原干旱区，干旱少雨，研究枣树和榆树蒸腾光合与外界环境条件的关系，比较其水分利用效率，对选择适合当地环境

* 国家科技支撑项目(2006BAD03A0301)资助

** 通讯作者: 王百田(1958~), 男, 汉族, 硕士, 教授, 主要研究方向为林业生态工程、水土保持。E-mail: wbaitian@bjfu.edu.cn

靳新红(1977~), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境工程。E-mail: jxhong630@163.com

收稿日期: 2007-03-10 接受日期: 2008-06-20

的树种至关重要。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在山西省方山县圪洞镇国营苗圃, 该地属黄土丘陵沟壑区, 位于 $N37^{\circ}36'58''$ 、 $E111^{\circ}02'55''$, 海拔 1 200 m, 属暖温带大陆性季风气候。年均降雨量 416 mm, 年内分配不均, 6~9 月降水占全年的 60% 以上; 多年平均蒸发量 1 857.7 mm, 最大蒸发量出现在 5~6 月, 具典型春旱特征; 年均大气相对湿度 50%, 干燥度 1.3, 年均气温 7.3, 年均无霜期 140 d, 年均风速 2~4 $m \cdot s^{-1}$ 。土壤为中壤质黄绵土, pH 8.0~8.4, 平均土壤容重 1.21 $g \cdot cm^{-3}$ 。

1.2 研究方法

供试苗木为长势良好、无病虫害的 2 年生枣树苗和榆树苗。枣树平均苗高 1.3 m, 平均胸径 1.5 cm; 榆树平均苗高 1.5 m, 平均胸径 1.6 cm。2005 年 10 月将苗木分别栽入塑料桶内, 桶内土壤取自同一地区。2006 年 7 月起取样、观测。每天按时取土, 用烘干法测每桶的土壤含水量, 以此为依据加水补充蒸散损失以控制不同水分梯度。试验分别设 $5\% \pm 0.5\%$ 、 $8\% \pm 0.5\%$ 、 $11\% \pm 0.5\%$ 、 $14\% \pm 0.5\%$ 、 $17\% \pm 0.5\%$ 、 $20\% \pm 0.5\%$ 6 个水分梯度, 依次用 A、B、C、D、E、F 表示; 同时设置对照组, 使苗木在充足的水分条件下生长。在光照最强的中午, 利用不同厚度的纱网遮荫, 形成不同的太阳有效辐射强度

($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$): 50 ± 10 、 100 ± 10 、 200 ± 10 、 300 ± 10 、 400 ± 10 、 500 ± 10 、 700 ± 10 、 800 ± 10 、 $1 000 \pm 10$ 、 $1 200 \pm 10$, 以比较水分利用效率。日蒸散量采用早晚称重法测定。桶栽苗木放置于防雨大棚内, 下雨时用透明塑料遮雨, 其余时间露天生长。

1.3 测定项目与数据处理

2006 年 7 月, 选择晴朗天气使用 LI-6400 便携式光合作用测定系统定时进行净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)、气温(Ta)、叶温(T)、空气相对湿度(RH)、光合有效辐射(PAR)、大气 CO_2 浓度等环境因子及叶片与空气之间的水蒸汽压差(VPD)的测定。选择每株苗木中上部暴露在阳光下的健康、完整的 2 个叶片, 每个叶片测量 3 个稳定数值, 观测时间为 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00。测定数据利用 Excel 进行分析。

2 结果和分析

2.1 不同土壤水分条件下枣树、榆树净光合速率与气孔导度日变化规律

光合速率反映树木积累营养物质的能力, 是影响叶片水分利用效率的直接因子^[3]。苗木的气孔导度是对水分和光热胁迫敏感的因子, 也是苗木自我调节的一种生理机制^[4], 是制约光合效率的重要因素。

从图 1 可以看出: 当土壤含水量为 14%~20% 时, 即 D、E、F 水平, 土壤水分充足, 不是植株生长

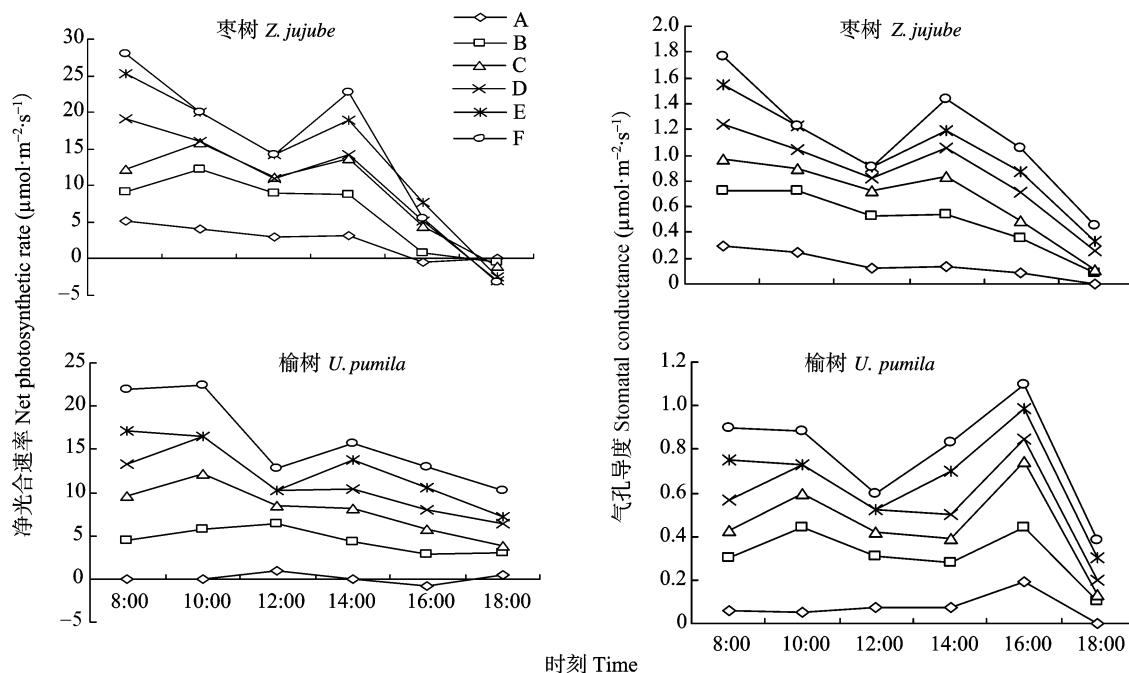


图 1 不同土壤水分条件下枣树、榆树叶片净光合速率和气孔导度日变化

Fig. 1 Daily changes of photosynthetic rate and stomatal conductance of *Z. jujube* and *U. pumila* under different soil water contents

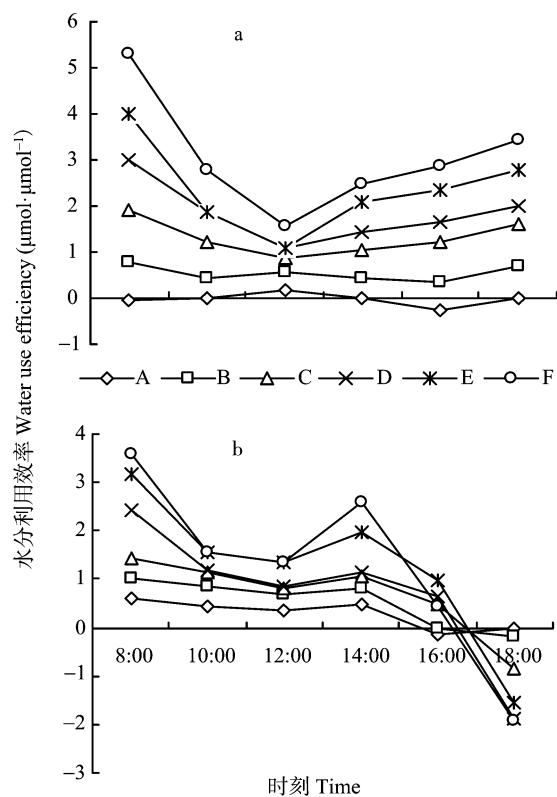


图 2 不同水分条件下枣树(a)、榆树(b)水分利用效率的日变化

Fig. 2 Daily changes of water use efficiency of *Z. jujube*(a) and *U. pumila*(b) under different soil water contents

的限制性因素,一天中枣树的净光合速率呈先降后升再降趋势,主要受太阳有效辐射、空气湿度及CO₂浓度的影响;但当土壤含水量在8%~11%之间时,即B、C水平,土壤水分缺乏,是限制植株生理活动的主要因素,一天中随时间推移,枣树净光合速率呈增大减小再增大减小的趋势,18:00左右为负值;土壤含水量为5%时(A),水分严重缺乏,光合作用受到抑制,一天中净光合速率呈直线下降趋势。气孔导度的变化趋势与净光合速率基本一致,在8:00和14:00出现两个最大值,12:00前后由于光合有效辐射增强,气温持续升高而相对湿度降低,大部分气孔关闭,气孔导度降低;随后空气相对湿度逐步升高,光照减弱,关闭的气孔张开,气孔导度增加;14:00后,光照进一步减弱,气孔导度降低,到18:00左右降至一天中的最低值。

10:00之前,土壤含水量为20%、14%、11%、8%(F、D、C、B)时,榆树的净光合速率呈缓慢增加趋势,而土壤含水量为17%(E)时微有下降,土壤含水量为5%(A)时变化趋势不明显;在12:00,E、F、D、C的净光合速率降至低谷,之后在14:00达到第2个峰值。榆树各水分处理气孔导度的变化趋势与净光合速率基本一致,8:00~10:00呈增加趋势,之后到12:00

降低;E、F随后一直增加在16:00达到峰值,D、C、B水平则先降低后增加,在16:00增至一天中的最高点,A水平变化趋势不明显。总体来看,由于叶片中光合产物达到一定积累时会产生反馈抑制作用,两树种高含水量下的净光合速率和气孔导度明显高于低含水量,且上午高于下午。

2.2 不同土壤水分条件下枣、榆水分利用效率日变化

从图2a可以看出:当土壤含水量为A、B时,一天中枣树的水分利用效率近直线,变化不明显,且A<B;当土壤含水量为C、D、E、F时,枣树的水分利用效率日变化呈“凹”形曲线,变化幅度较大。高土壤含水量的水分利用效率大于低含水量,良好的土壤水分条件有利于植株生长及干物质积累,反之则限制植株生长。枣树的最大水分利用效率出现在8:00,因为从凌晨到8:00,太阳辐射强度增加,空气相对湿度较大,净光合速率远大于蒸腾速率,故水分利用效率最高;最小值出现在12:00,此时光照强度、气温均较高,空气湿度很小,气孔关闭限制了CO₂的吸收,影响了光合作用,而蒸腾处于持续上升状态,故水分利用效率低,这也是植物“午睡”现象的真实反映。14:00后枣树的水分利用效率呈递增趋势,递增速度为F>E>D>C。

从图2b可知:当土壤含水量为A、B时,榆树的水分利用效率在14:00前呈微弱的递减趋势,且A<B,之后呈下降趋势直至趋于零;当土壤含水量为C、D、E、F时,榆树的水分利用效率14:00之前的变化趋势与枣树相似,之后与枣树相反,呈递减趋势,直至负值。

2.3 辐射强度对枣树、榆树水分利用效率的影响

从表1可知,水分利用效率与太阳有效辐射强度的关系较为复杂,辐射强度为50 μmol·m⁻²·s⁻¹时,枣树、榆树净光合速率均为负值,由于太阳辐射强度很弱,植物光合作用几乎停止,呼吸作用消耗的物质大于光合作用产生的物质;随辐射强度增强,在500 μmol·m⁻²·s⁻¹之前,枣树、榆树的净光合速率和蒸腾速率基本呈增强趋势,榆树变化幅度大于枣树,说明榆树对光的敏感性高于枣树;当辐射强度为500~1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹时,枣树、榆树的各项指标上下波动,榆树变化幅度大于枣树。从水分利用效率来看:枣树和榆树的最大值分别出现在辐射强度为300 μmol·m⁻²·s⁻¹和500 μmol·m⁻²·s⁻¹,此时正值上午10:00左右,苗木的各项生理活动均处于旺盛阶段。

2.4 不同土壤水分条件下枣树、榆树日平均蒸散量

不同土壤含水量下枣树和榆树的日平均蒸散量差异极显著(表2)。相同土壤含水量条件下,枣树和榆树

表1 不同辐射强度下枣树、榆树的水分利用效率
Tab. 1 Water use efficiency of *Z. jujube* and *U. pumila* under different radiations

辐射强度 Radiation intensity ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	树种 Species	净光合速率 Net photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用效率 Water use efficiency ($\mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$)
50 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	-1.16	1.72	-0.67
	榆树 <i>U. pumila</i>	-1.50	2.05	-0.73
100 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	1.09	2.47	0.44
	榆树 <i>U. pumila</i>	1.94	2.54	0.77
200 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	5.55	4.58	1.21
	榆树 <i>U. pumila</i>	7.80	8.18	0.95
300 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	5.16	3.73	1.38
	榆树 <i>U. pumila</i>	3.95	4.12	0.24
400 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	2.97	4.02	0.74
	榆树 <i>U. pumila</i>	3.94	9.33	0.42
500 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	4.96	7.77	0.64
	榆树 <i>U. pumila</i>	9.30	5.70	1.63
700 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	3.68	7.37	0.50
	榆树 <i>U. pumila</i>	2.86	4.29	0.67
800 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	5.99	6.83	0.88
	榆树 <i>U. pumila</i>	4.87	11.38	0.43
1000 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	2.47	5.17	0.48
	榆树 <i>U. pumila</i>	6.00	11.36	0.53
1200 ± 10	枣树 <i>Z. jujube</i>	2.54	5.43	0.47
	榆树 <i>U. pumila</i>	2.73	6.63	0.41

表2 不同土壤水分条件下枣树、榆树蒸散量
Tab. 2 Evapotranspiration of *Z. jujube* and *U. pumila* under different soil water contents

项目 Item	土壤含水量 Soil water content (%)											
	5 ± 0.5		8 ± 0.5		11 ± 0.5		14 ± 0.5		17 ± 0.5		20 ± 0.5	
	枣树 <i>Z. j</i>	榆树 <i>U. p</i>	枣树 <i>Z. j</i>	榆树 <i>U. p</i>	枣树 <i>Z. j</i>	榆树 <i>U. p</i>	枣树 <i>Z. j</i>	榆树 <i>U. p</i>	枣树 <i>Z. j</i>	榆树 <i>U. p</i>	枣树 <i>Z. j</i>	榆树 <i>U. p</i>
蒸散量 ET (mL)	172	122	299	250	433	285	499	362	346	508	379	422

的日蒸散量也存在较大差异。土壤含水量为 11%时枣树的日蒸散量最大, 其次是 14%水平; 当土壤含水量小于 14%时, 枣树的蒸散量大于榆树, 高出 50~130 mL。土壤含水量为 17%时, 榆树的蒸散量最大, 其次是 14%水平; 当土壤含水量大于 14%时, 枣树蒸散量小于榆树。

3 小结和讨论

不同土壤含水量条件下枣树的水分利用效率早晨最大, 中午递减, 之后又递增, 上午均值大于下午; 榆树的水分利用效率早晨最大, 至中午递减, 14:00 之前递增后呈下降趋势至负值。就树种而言, 枣树的水分利用效率高于榆树。但榆树的耐旱性强于枣树, 水分胁迫严重, 枣树的生长受到严重抑制, 而榆树叶片虽也萎蔫, 但只是暂时适应不良外界环境的一种反映; 且连续干旱后榆树的恢复程度优于枣树。对枣、榆幼树日蒸散量连续测定的结果表明, 影响蒸散量的主要因素是土壤含水量。蒸散量大有

利于植株的生长以及有机物质的积累, 植株生长旺盛。综合各指标的测定结果可以看出, 枣树耗水能力高于榆树, 但当土壤含水量升高时, 枣树耗水能力反而降低, 相对于枣树而言黄土半干旱区更利于榆树生长。上述结论只是以桶栽幼树为试验对象, 植株成林后的结果有待进一步研究。

参考文献

- [1] 温陟良, 王永蕙. 枣树蒸腾作用及日变化规律研究[J]. 河北农业大学学报, 1991, 14(1): 36~38
- [2] 高素华, 郭建平, 康玲玲, 等. 我国北方多沙粗沙区常见树种水分利用效率的研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 90~92
- [3] 蒋高明, 何维明. 一种在野外自然光照条件下快速测定光合作用-光响应曲线的新方法[J]. 植物学通报, 1999, 16(6): 712~718
- [4] 方圆, 徐锡增, Robert D. Guy. 水分和热胁迫处理对 4 种针叶树苗木气体交换和水分利用效率的影响[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 38~44