

鲁绍伟, 丁杰, 李少宁, 等. 北京市 5 种园林树种蒸腾耗水特性研究 [J]. 福建农业学报, 2017, 32 (7): 739—745.

LU S-W, DING J, LI S-N, et al. Water Consumption by Transpiration of Landscape Trees in Beijing [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 32 (7): 739—745.

北京市 5 种园林树种蒸腾耗水特性研究

鲁绍伟^{1,2,3}, 丁杰⁴, 李少宁^{1,2,3*}, 杨超⁴, 陈波^{1,2,3}, 路森⁵

(1. 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093; 2. 北京林果业生态环境功能提升
协同创新中心, 北京 100093; 3. 北京燕山森林生态系统定位观测研究站, 北京 100093;
4. 河北农业大学林学院, 河北 保定 071000; 5. 河北省花卉管理中心, 河北 石家庄 050051)

摘要: 采用盆栽称重法研究白皮松、白蜡、银杏、山桃、枸杞的蒸腾耗水特性。结果表明: 5 种树种的蒸腾速率 Tr 、光合速率 Pn 、气孔导度 G_s 日变化均呈“M”型曲线, 存在“午休”现象, 水汽压亏缺 VPD 日变化为单峰曲线。树种蒸腾速率 Tr 与叶片气孔导度 G_s 、水汽压亏缺 VPD 呈线性正相关关系, 白皮松相关性显著 ($R^2 = 0.9795$ 、 $R^2 = 0.9884$)。蒸腾速率 Tr 为枸杞 ($3.33 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 白蜡 ($3.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) = 山桃 ($3.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 银杏 ($3.21 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 白皮松 ($2.21 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。树种耗水量为枸杞 ($0.090 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > 白蜡 ($0.080 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > 山桃 ($0.076 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) = 银杏 ($0.076 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > 白皮松 ($0.032 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。白蜡、银杏月耗水量呈倒“V”曲线, 白皮松、山桃、枸杞月耗水量呈“M”曲线, 耗水量为 7 月 ($0.083 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > 9 月 ($0.078 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > 8 月 ($0.075 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > 6 月 ($0.071 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > 10 月 ($0.060 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > 5 月 ($0.057 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。白皮松秋季耗水多, 其他树种为夏季耗水多。山桃、银杏抗旱能力强于枸杞、白蜡和白皮松。研究结果可为园林植物的合理配植与水分的合理利用等提供依据。

关键词: 园林树种; 蒸腾特性; 耗水量; 北京

中图分类号: S 718.43

文献标识码: A

文章编号: 1008-0384 (2017) 07-739-07

Water Consumption by Transpiration of Landscape Trees in Beijing

LU Shao-wei^{1,2,3}, DING Jie⁴, LI Shao-ning^{1,2,3*}, YANG Chao⁴, CHEN Bo^{1,2,3}, LU Sen⁵

(1. *Forestry and Pomology Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing* 100093, China; 2. *Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing* 100093, China; 3. *Beijing Yanshan Forest Ecosystem Research Station, Beijing* 100093, China; 4. *College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei* 071000, China; 5. *Flowers Management Center of Hebei, Shijiazhuang, Hebei* 050051, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the photosynthesis and the transpiration of 5 landscape trees commonly found in Beijing, *Pinus bungeana*, *Fraxinus chinensis*, *Ginkgo biloba*, *Prunus davidiana*, and *Lycium chinense*. The results showed that, with ample supply of water, the rates of photosynthesis (Pn), transpiration (Tr), and stomatal conductance (G_s) on leaves of the nursery stocks in a day consistently changed in an M-shape curve with a “lunch break” at noon time. The changes on vapor pressure deficit (VPD) exhibited a single peak curve. Tr linearly correlated with G_s as well as VPD . The correlation coefficient (R^2) between Tr and G_s of *P. bungeana* was 0.9795; and, that between Tr and VPD , 0.9884. Tr of the 5 species ranked *L. chinense* ($3.33 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > *F. chinensis* ($3.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > *P. davidiana* ($3.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) = *G. biloba* ($3.21 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > *P. bungeana* ($2.21 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). The water consumptions for the trees were *L. chinense* ($0.090 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > *F. chinensis* ($0.080 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) >

收稿日期: 2017-03-18 初稿; 2017-05-04 修改稿

作者简介: 鲁绍伟 (1969—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 水土保持和森林生态服务功能 (E-mail: hblsw@163.com)

* 通讯作者: 李少宁 (1975—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 城市森林生态功能监测与评价 (E-mail: lishaoning@126.com)

基金项目: 北京市农林科学院青年基金项目 (QNJJ201532); 北京市农林科学院创新能力建设专项 (KJCX20150205); 北京市农林科学院科技创新团队项目 (JWKST201609)

Prunus davidiana ($0.076 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) = *G. biloba* ($0.076 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > *P. bungeana* ($0.032 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). The monthly water consumptions of *F. chinensis* and *G. biloba* exhibited in a V-shape curve; while, *P. bungeana*, *P. davidiana* and *L. chinense*, an M-shape curve with twin peaks. Seasonally, the water consumptions of the trees decrease in the order of July ($0.083 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > September ($0.078 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > August ($0.075 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > June ($0.071 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > October ($0.060 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) > May ($0.057 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). And, *P. bungeana* consumed the greatest amount of water in autumn, while others in summer. On draught resistance, *P. davidiana* and *G. biloba* were more tolerant to the stress than *L. chinense*, *F. chinensis* or *P. bungeana*.

Key words: landscape trees; transpiration; water consumption; Beijing

城市绿地可从一定程度上维持和改善城市生态环境,是现代城市生态文明建设的重要组成部分之一,成为现代城市生态文明建设的重要指标之一,是发挥生态功能、保持优美生态环境的一项重要措施^[1-2]。因此,北京市建立了多种绿地生态系统,来满足人们对优美、宜居、舒适的生态环境的渴望^[3]。在城市绿地生态系统中,园林植物是其中的重要组成部分,发挥着生态、景观等方面的多种功能,但是植物自身的耗水量也是不容忽视的。尽管如此水分对于植物的生长又是至关重要的,植物受自身遗传性的影响对水分胁迫产生极其复杂的响应^[4-5]。北京市自然降水量少,且分布极不均匀,全年 80% 的降雨都集中在 6~8 月,其他月份水资源短缺。因此,为了兼顾水资源不足与绿地生态建设,研究园林植物的水分运动及其消耗规律,选择培育耗水量低、耐旱的树种,为绿地中不同耗水型植物的合理配置,实现水资源的节约与充分利用等具有深远意义。目前研究植物蒸腾耗水特性的方法相继出现很多,例如盆栽称重法、快速称重法、整树容器法、热脉冲法、热扩散法、气孔计法、风室法、微气象法、同位素示踪法、遥感技术等^[6]。本研究对植物个体耗水量及不同树种间耗水量的差异进行比较,采用盆栽称重法,在典型天气条件下对 5 种园林绿化常用树种进行水分充足情况下的光合蒸腾耗水特性测定,以期在城市绿地中植物的合理配植,达到水分的合理、节约利用等提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于北京市农林科学院林业果树研究所的种质资源圃内,北纬 $39^{\circ}59'35'' \text{ N}$,东经 $116^{\circ}13'13'' \text{ E}$,占地面积约为 13.33 hm^2 。属于典型的北温带半湿润大陆性季风气候。年均降雨约 483.9 mm ,主要集中在 6~8 月,季节分配很不均匀。太阳辐射量全年平均为 $112 \sim 136 \text{ kcal} \cdot \text{cm}^{-1}$,年均日照时数 $2\,000 \sim 2\,800 \text{ h}$ 。种质资源圃内绿化树种有核桃 *Juglans regia*、水杉 *Metasequoia*

glyptostroboides、桤柳 *Tamarix chinensis*、稠李 *Prunus padus*、杜仲 *Eucommia ulmoides* 等。

1.2 供试材料

选取北京地区绿化常用的白皮松 *Pinus bungeana*、白蜡 *Fraxinus chinensis*、银杏 *Ginkgo biloba*、山桃 *Prunus davidiana*、枸杞 *Lycium chinense* 进行试验,每个树种选 5 株长势良好、大小近似且无病虫害的苗木移栽到盆中,取原生土培养,经过一段时间的缓苗和管理,对其苗木进行光合特性、蒸腾耗水特性等的测定。

1.3 试验方法

2016 年 5~10 月(其中 5 月计为春季,6~8 月为夏季,9~10 月为秋季),在水分充足的状况下,选择典型天气(晴天、半晴天、阴天)条件,在每个月份分别用手持式仪器 CI-340 超轻型便携式光合仪测定各树种的净光合速率(P_n ,单位: $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s ,单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r ,单位: $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)等,用 ACS-D11 电子秤(精度为 0.01 kg)称重,8:00 与 18:00 重量差值为树种的耗水量,再计算出单位叶面积的蒸腾耗水量。叶面积(S ,单位: cm^2)利用 EPSON Scan 扫描仪及其该分析软件对图像进行处理计算。每个树种设置 3 组重复,为了消除盆栽内土壤蒸发和渗漏的影响,以空盆栽作为对照。光合特性于 7:00~17:00 测定,选取苗木树冠外层向阳中上部且健康完整的 5 片叶子进行测定,每片叶子测定 3~5 个瞬时值,最终结果取平均值。称重于 8:00~18:00 测定。

水分利用效率 $\text{WUE} = \text{光合速率 } P_n / \text{蒸腾速率 } T_r$

1.4 数据处理

所得数据用 Microsoft Excel 2013 软件对数据进行处理统计,用 SPSS 22.0 进行相关性分析和绘图,统计中用到的数据均是试验所得数据的平均值。

2 结果与分析

2.1 蒸腾耗水量

2.1.1 典型天气变化特征 树木对水分的消耗主

要是通过叶片蒸腾作用散失的,蒸腾作用又受到气孔导度的影响。如图1所示,典型天气条件下,各树种耗水量呈一致趋势,其耗水量均值为枸杞($0.090 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)>白蜡($0.080 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)>山桃($0.076 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)=银杏($0.076 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)>白皮松($0.032 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),耗水量与蒸腾速率呈对应关系,即水分消耗的多少受蒸腾速率直接影响。5种树种在典型天气耗水量均值晴天最多 $0.079 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,依次为半晴天 $0.071 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、阴天 $0.063 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,主要是由于晴天树种的蒸腾速率与气孔导度大,水分消耗多造成的。

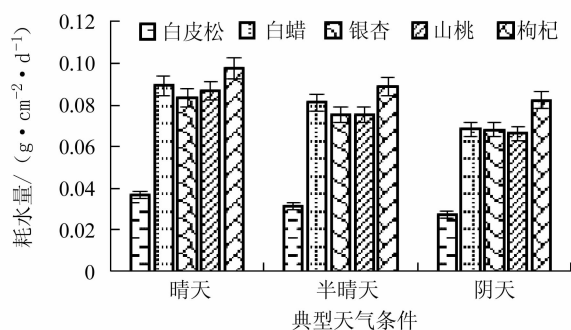


图1 典型天气条件下树种耗水量

Fig. 1 Water consumptions of landscape trees under typical weather conditions

2.1.2 月变化特征 如图2所示,白蜡、银杏月耗水量呈倒“V”曲线变化,峰值出现在7月份,分别为 0.089 、 $0.093 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。白皮松、山桃、枸杞月耗水量呈“M”曲线变化,峰值出现在7月份、9月份,第1次峰值分别为 0.035 、 0.091 、 $0.106 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,第2次峰值分别为 0.047 、 0.089 、 $0.101 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,谷值出现在8月份,分别为 0.031 、 0.082 、 $0.093 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。树种月耗水量:枸杞 $0.090 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、白蜡

$0.080 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、山桃 $0.076 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、银杏 $0.076 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、白皮松 $0.032 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。7月份 $0.083 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、8月份 $0.075 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、9月份 $0.078 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 树种耗水量最大,6月份 $0.071 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、10月份 $0.060 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 耗水量有所减少,5月份耗水量最小($0.057 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

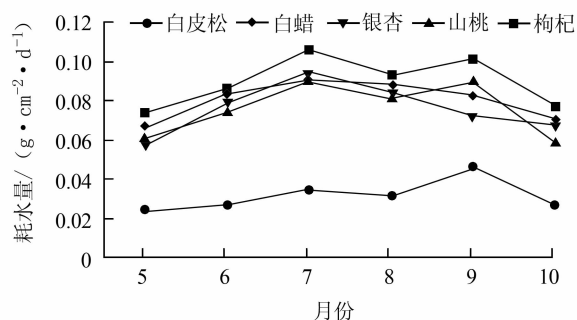


图2 树种耗水量月变化

Fig. 2 Changes on monthly water consumption of landscape trees

2.1.3 季节变化特征 如图3所示,树种耗水量夏季($0.076 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)高于秋季($0.069 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)和春季($0.057 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。夏秋季树种处于旺盛生长时期,水分消耗大,春季树种刚刚萌芽,水分消耗相应减小。春、秋季树种耗水量变化趋势一致,均为枸杞、白蜡、山桃高于银杏、白皮松,而夏季耗水量银杏($0.086 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)高于山桃($0.083 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),主要与气孔导度影响蒸腾速率,银杏气孔导度值大于山桃的气孔导度值有关,且银杏蒸腾速率受气孔导度影响大于山桃。不同树种蒸腾速率存在季节差异。白皮松为秋季耗水最多,耗水量为 $0.037 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,春、秋季分别为 0.025 、 $0.031 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,其他4种树种均为夏季耗水最多。

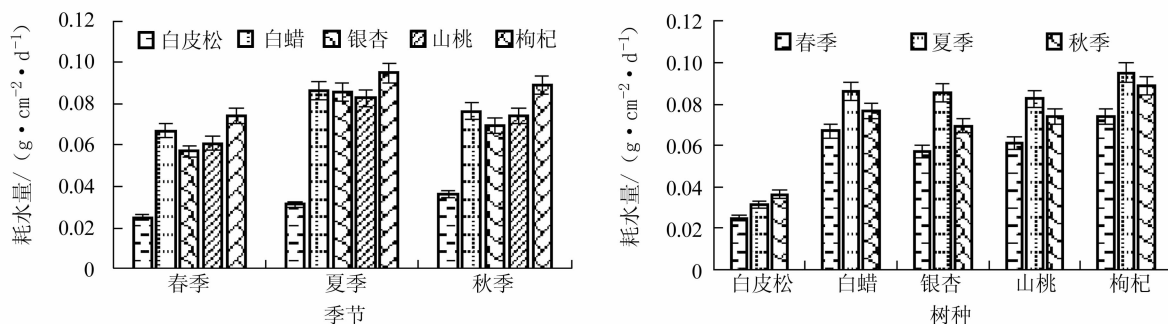


图3 树种耗水量季节变化

Fig. 3 Seasonal changes on water consumption of landscape trees

2.2 蒸腾速率 Tr 与光合速率 Pn 日变化

如图 4 所示, 5 种树种的 Tr 和 Pn 日变化趋势呈“M”曲线变化, 且变化呈一致趋势。在相同时间内开始上升, 在 11:00 左右同时达到第一个峰值, Tr 峰值为白蜡 (5.25 ± 1.05) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、银杏 (4.90 ± 1.50) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、枸杞 (4.66 ± 1.19) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、山桃 (4.53 ± 0.81) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、白皮松 (3.50 ± 0.71) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 随后均呈下降趋势, 在 13:00 左右到达谷值, 即出现“午休”现象, “午休”过后于 15:00 左右达到第 2 个峰值, 峰值分别为白蜡 (4.47 ± 0.72) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、银杏 (4.10 ± 1.77) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、山桃 (3.92 ± 0.91) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、枸杞 (3.43 ± 1.42) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、白皮松 (2.75 ± 0.99)

$\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 随后呈降低趋势。 Tr 日均值为枸杞 (3.33 ± 0.92) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} >$ 白蜡 (3.22 ± 1.47) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} >$ 山桃 (3.22 ± 0.94) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} >$ 银杏 (3.21 ± 1.14) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} >$ 白皮松 (2.21 ± 0.84) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。1 天中, 枸杞 Tr 日变化幅度最小, 银杏最大。 Pn 日均值为山桃最大 [(11.76 ± 4.42) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]、其次是银杏 [(11.03 ± 3.43) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]、枸杞 [(10.20 ± 3.94) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]、白蜡 [(9.51 ± 4.32) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]、白皮松 [(6.62 ± 2.99) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] 最低。山桃、银杏 Pn 日均值最高, 且 Tr 日均值较低, 说明其对土壤中水分的利用效率 WUE 最高, 具有较强的适应性。白皮松 Tr 和 Pn 均最低。

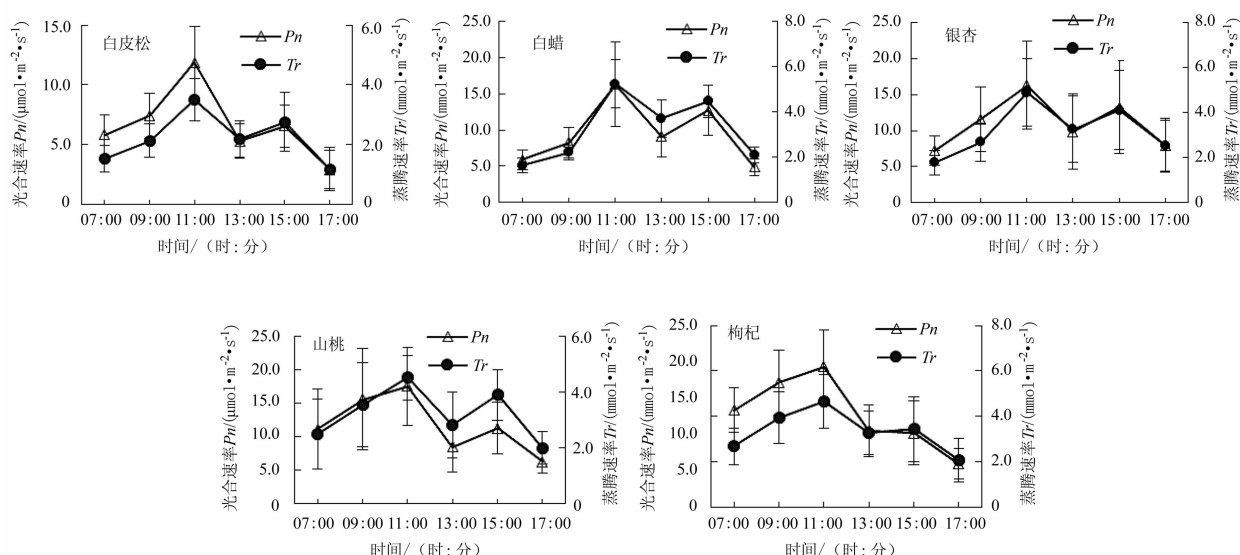


图 4 树种光合速率与蒸腾速率日变化

Fig. 4 Changes on rates of photosynthesis and transpiration of landscape trees in a day

2.3 水分利用效率 WUE 日变化

树种水分利用效率 WUE 见图 5, 5 个树种的 WUE 日变化总体呈现下降趋势, 即 7:00~11:00 的 WUE 普遍高于 13:00~15:00 的 WUE。除白蜡外, 其他树种日变化均表现出“V”型趋势, 白皮松、银杏在 13:00 左右下降到最低值, 分别为 (2.42 ± 0.22)、(2.93 ± 0.59) $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。枸杞和山桃则在 15:00 前后减弱到最小值: (2.38 ± 0.13)、(2.85 ± 0.50) $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。白蜡 WUE 日变化为波浪型, 13:00、15:00 WUE 较低, 分别为 (2.45 ± 0.52)、(2.34 ± 0.50) $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。WUE 日均值表现为山桃 (3.66

± 0.58) $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、银杏 (3.49 ± 0.67) $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、枸杞 (3.06 ± 0.55) $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、白蜡 (3.02 ± 0.63) $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、白皮松 (3.02 ± 0.36) $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。山桃为白皮松和白蜡的 1.21 倍, 所以山桃、银杏的抗旱能力要强于枸杞、白蜡和白皮松。

2.4 气孔导度 G_s 与水汽压亏缺 VPD 日变化

如图 6 所示, 各盆栽树种气孔导度 G_s 日变化均呈“M”型变化曲线。各树种出现峰值和谷值的时间段相同, 峰值出现在 11:00 左右、15:00 左右, 谷值出现在 13:00 前后, 气孔导度 G_s 也存在

“午休”现象。树种水汽压亏缺 VPD 均表现出单峰曲线趋势。除白皮松（峰值出现在 15:00）外，其他 4 个树种峰值均出现在 13:00 前后，峰值分别为银杏（ 3.84 ± 1.78 ）kPa、山桃（ 3.32 ± 1.08 ）kPa、白蜡（ 3.29 ± 1.43 ）kPa、白皮松（ 3.15 ± 1.56 ）kPa、枸杞（ 3.07 ± 1.19 ）kPa。中午时分，温度过高、水分蒸发过快，水汽压亏缺 VPD 增大，为了减少水分的消耗，叶片气孔开度减小或部分关闭，随之蒸腾速率下降，到达低谷值，出现了“午休”，与毛振华等在地被植物耗水特性的研究中得出的结果一致^[7]。气孔导度 G_s 日变化主峰值为枸杞（ 0.196 ± 0.02 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、白蜡（ 0.173 ± 0.02 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、银杏（ 0.166 ± 0.02 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 较高，山桃（ 0.147 ± 0.02 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、白皮松（ 0.065 ± 0.02 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 较低。谷值和次峰值的大小顺序与主峰值相同。枸杞（ 0.144 ± 0.04 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、白蜡（ 0.125 ± 0.03 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、银杏（ 0.121 ± 0.03 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的气孔导度 G_s 日均值较山桃

（ 0.116 ± 0.02 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、白皮松（ 0.040 ± 0.02 ） $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 高，而蒸腾速率 Tr 日均值从大到小依次为枸杞、白蜡、山桃、银杏、白皮松，山桃蒸腾速率 Tr 日均值大于银杏，而气孔导度 G_s 日均值却小于银杏，与其蒸腾速率 Tr 受气孔导度 G_s 影响小有关。

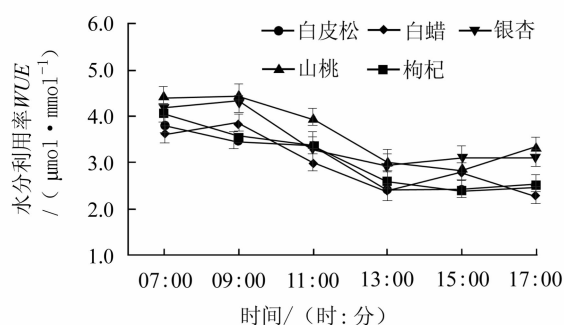


图 5 树种水分利用效率日变化

Fig. 5 Changes on daily water usage efficiency of landscape trees

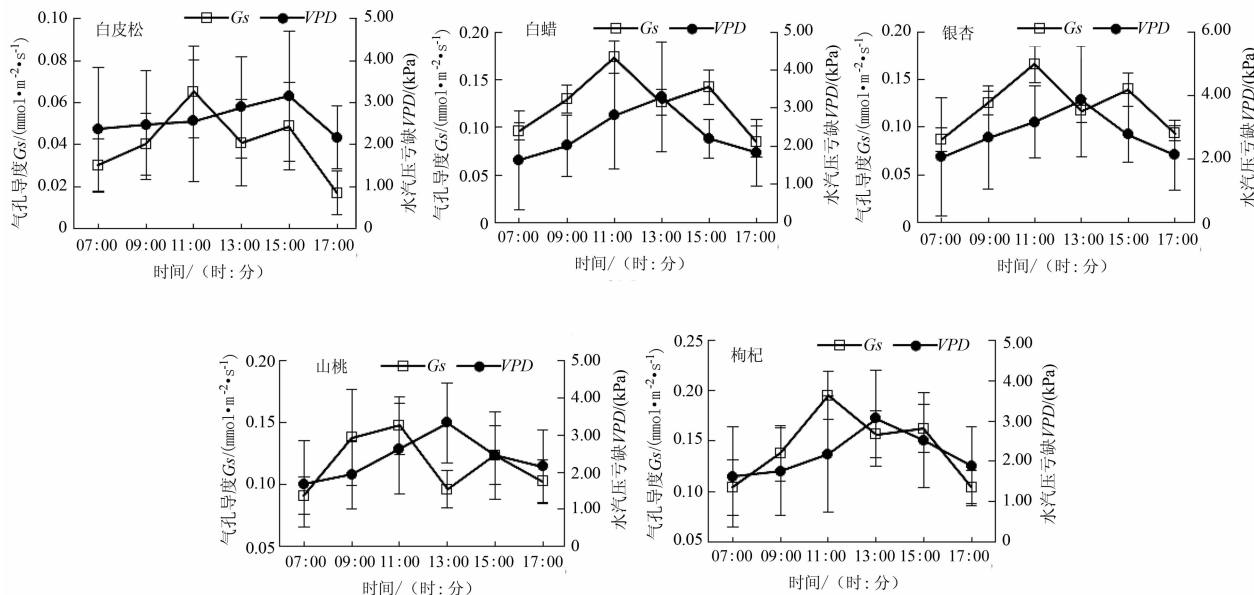


图 6 树种气孔导度与水汽压亏缺日变化

Fig. 6 Changes on G_s and VPD of landscape trees in a day

2.5 相关性分析

如图 7 所示，5 种树种蒸腾速率 Tr 与叶片气孔导度 G_s 、水汽压亏缺 VPD 呈线性正相关关系，这一研究结论与薛雪等^[8]的结论相同。白皮松的蒸腾速率 Tr 与气孔导度 G_s 相关性显著 $R^2 = 0.9795$ ，其次为银杏 $R^2 = 0.8899$ 、白蜡 $R^2 = 0.7792$ 、枸杞

$R^2 = 0.7628$ ，山桃 $R^2 = 0.7606$ 相关性最不显著。因此白皮松的蒸腾耗水受气孔导度 G_s 的影响最大，山桃蒸腾耗水受叶片气孔导度 G_s 的影响最小。蒸腾速率 Tr 受水汽压亏缺 VPD 影响较大的有白皮松 $R^2 = 0.9884$ 、白蜡 $R^2 = 0.9728$ 、银杏 $R^2 = 0.966$ ，枸杞、山桃受水汽压亏缺 VPD 影响较小。

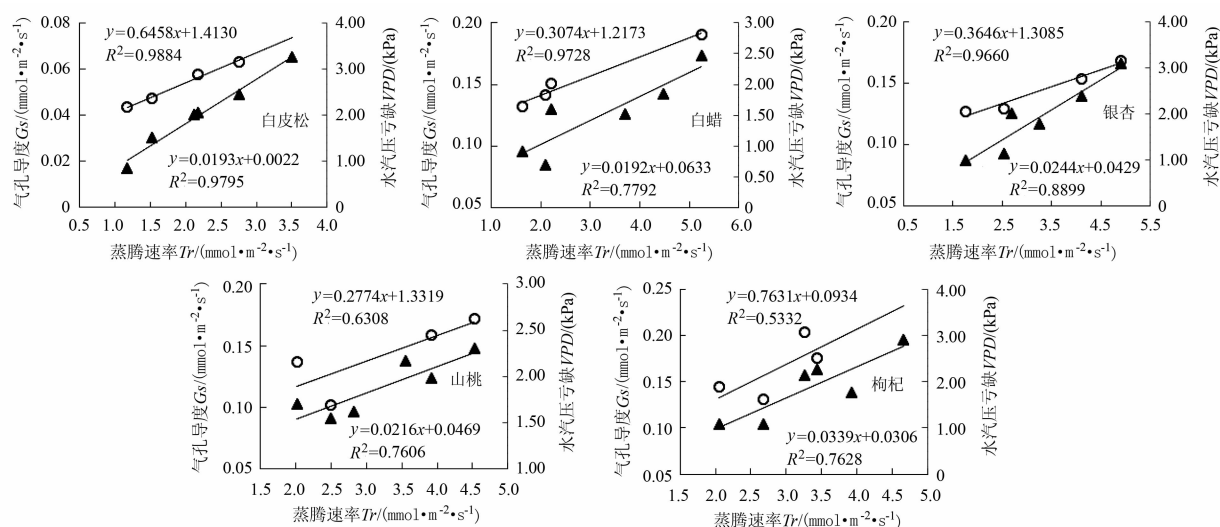


图 7 树种蒸腾速率与气孔导度和水汽压亏缺相关关系

Fig. 7 Correlations among Tr , G_s and VPD of landscape trees

注：三角形和圆形分别代表蒸腾速率 Tr 与气孔导度 G_s 和水汽压亏缺 VPD 的相关性。

3 讨论

3.1 蒸腾特性与气孔导度 G_s 和水汽压亏缺 VPD 关系

植物的蒸腾作用是植物吸收水分以及水分运动的主要影响因子,不同树种蒸腾耗水特性的不同受其遗传生理特性等的影响,日耗水的不同受气孔对环境因素的不同反应影响^[9-10]。本研究树种蒸腾速率 Tr 、光合速率 P_n 、叶片气孔导度 G_s 变化趋势呈一致趋势,与刘莹艳等^[11]在三叶青的蒸腾作用与气孔结构研究中得出的结论相同,且变化曲线为“M”曲线,存在“午休”现象,与邱权等^[12]研究结果相同,主要是气孔为了保存水分而关闭或开度减小。5 种树种最大光合速率 P_n 均出现在 11:00 左右,分别为山桃 ($17.59 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 白蜡 ($16.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 银杏 ($16.31 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 枸杞 ($15.49 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 白皮松 ($11.86 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),说明山桃、白蜡、银杏的生长能力强于枸杞和白皮松。气孔导度 G_s 对树种的光合、蒸腾作用具有重要的影响^[13],外界环境因子会对气孔导度产生影响,因此研究气孔导度的变化规律,可进一步探究不同树种间蒸腾耗水的规律与差异。本研究得出树种的蒸腾速率与水汽压亏缺 VPD 呈正相关关系,这一结论与张静^[14]对温室菊花植株蒸腾速率与水汽压亏缺呈负相关的结论不同。因此,还有待进一步的研究。白皮松的蒸腾速率与气孔导度 G_s 相关性显著 $R^2 = 0.9795$,山桃受叶片气孔导度的影响最小,相关性

最不显著 $R^2 = 0.7606$ 。白皮松、白蜡、银杏的蒸腾速率受水汽压亏缺影响较大,相关性分别为 $R^2 = 0.9884$ 、 $R^2 = 0.9728$ 、 $R^2 = 0.966$,枸杞、山桃受水汽压亏缺影响不显著 ($R^2 = 0.5332$ 、 $R^2 = 0.6308$)。不同树种受气孔导度、水汽压亏缺影响的大小不同,可能主要与其遗传特性以及对外界环境的适应性有关。

3.2 蒸腾耗水差异

叶面积的大小及其蒸腾速率决定了树木蒸腾耗水量的多少^[15],因此本研究中采用单位叶面积耗水量进行比较。白皮松耗水量为秋季 ($0.037 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 多于夏季 ($0.031 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 和春季 ($0.025 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),与王瑞辉等^[3]在北京 15 种园林树木耗水性的比较研究中得出白皮松为春季的耗水量明显大于其他两季的结论不一致,具体原因有待进一步研究。白皮松、白蜡、银杏、山桃、枸杞最大蒸腾速率 $3.50 \sim 5.25 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,白蜡为 $5.25 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而朱妍等^[16]对白蜡、国槐、丁香、黄杨、油松、侧柏的测定结果为 $0.528 \sim 3.589 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,可能与各树种间以及同一树种间叶面积的差异有关,还有待进一步的研究。蒸腾速率为枸杞、白蜡、山桃高于银杏和白皮松,因此在植物配置的过程中,枸杞、白蜡、山桃不要配植在一起,以免造成水分的不平衡利用。阔叶树种的耗水量大于针叶树种,这与王瑞辉^[3]、孙鹏森^[17]对水源涵养林树种和园林树木耗水量的研究结果相同。银杏、白皮松为较好的节水树种,在植物配植的过程中可将耗水较多的乔木、

灌木与银杏、白皮松等树种结合在一起,以达到合理利用水资源,节约用水的目的。树种耗水量7~9月份大于5、6、10月份,所以5、6、10月份可适当减少灌溉量。此次试验测定的是供水充分条件下苗木的耗水量,对于胁迫状态下以及大树的耗水量还有待进一步监测,所以,该试验得出的数据可作为低耗水树种筛选的一个依据,也可作为比较苗木和大树耗水差异程度的参考。

4 结 论

4.1 在土壤水分充分的条件下,5种树种的蒸腾速率、光合速率、气孔导度日变化趋势呈“M”曲线,且变化呈一致趋势。相同时间出现峰值和谷值,峰值出现在11:00左右、15:00左右,谷值出现在13:00左右,均存在“午休”现象。树种蒸腾速率与叶片气孔导度、水汽压亏缺呈线性正相关关系,白皮松的蒸腾速率受气孔导度、水汽压亏缺的影响均最大,山桃受叶片气孔导度的影响最小,枸杞受水汽压亏缺影响最小。

4.2 光合速率日均值从大到小依次为山桃、银杏、枸杞、白蜡、白皮松。蒸腾速率日均值为枸杞、白蜡、山桃较银杏、白皮松高。气孔导度日均值为枸杞、白蜡、银杏高于山桃、白皮松。枸杞蒸腾速率日变化幅度最小,银杏蒸腾速率日变化幅度最大。山桃、银杏对土壤中水分的利用效率最高,具有较强的适应性。白皮松蒸腾速率、光合速率都最低。

4.3 典型天气条件下,树种耗水量为晴天多于半晴天和阴天,且为枸杞、白蜡、山桃多于银杏、白皮松。白蜡、银杏月耗水量呈倒“V”曲线,白皮松、山桃、枸杞月耗水量呈“M”曲线,7、8、9月份耗水量高于5、6、10月份,夏季多于春、秋季。春、秋季为枸杞>白蜡>山桃>银杏>白皮松,夏季为枸杞>白蜡>银杏>山桃>白皮松。白皮松为秋季耗水最多,其他4种树种均为夏季耗水最多。

参考文献:

[1] 陆贵巧,谢宝元,谷建才,等.大连市常见绿化树种蒸腾降温的效应分析[J].河北农业大学学报,2006,29(2):65-66.

- [2] 樊敏.北京常用3种观赏乔木耗水特性研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [3] 王瑞辉,马履一.北京15种园林树木耗水性的比较研究[J].中南林业科技大学学报,2009,29(4):17-20.
- [4] 马达,李吉跃,林平.北京山区造林树种耗水规律初探[J].山西农业大学学报:自然科学版,2006,26(1):48-49.
- [5] REMORINI D, MASSAI R. Comparison of water status indicators for young peach trees [J]. Irrigation Science, 2003, 22(1): 39-46.
- [6] 李薛飞,孟庆涛,黄建国,等.植物生理学原理测算树木蒸腾耗水速率方法综述[J].防护林科技,2014,(3):93-95.
- [7] 毛振华.不同灌溉量条件下六种地被植物的耗水特性[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [8] 薛雪,李娟娟,郑云峰,等.5个常绿园林树种的夏季光合蒸腾特性[J].林业科学,2015,51(9):150-156.
- [9] ZIMMERMANN U, SCHNEIDER H, WEGNER L H, et al. Water ascent in tall trees: does evolution of land plants rely on a highly metastable state [J]. New Phytologist, 2004, 162: 575-615.
- [10] 王瑞辉.北京主要园林树种耗水性及节水灌溉制度研究[D].北京:北京林业大学,2006.
- [11] 刘崑艳,周以飞,李清,等.三叶青的蒸腾作用与气孔结构研究[J].中草药,2015,46(17):2614-2615.
- [12] 邱权,潘昕,何茜,等.华南地区3种苗木生长旺盛时期光合特性及蒸腾耗水日变化规律的比较[J].华南农业大学学报,2012,33(4):526-528.
- [13] ELENA P, CRISTINA N, GIACOMO L. Early Responses to Acute Ozone Exposure in Two Fagus Sylvatica Clones Differing in Xeromorphic Adaptations: Photosynthetic and Stomatal Processes, Membrane and Epicuticular Characteristics [J]. Environ Monit Assess, 2007, 128: 93-108.
- [14] 张静. R: FR值对温室菊花气孔特性及蒸腾的影响及模拟研究[D].南京:南京信息工程大学,2013.
- [15] JORGENSEN S T, NTUNDU W H, OUEDRAOGO M, et al. Effect of a short and severe intermittent drought on transpiration, seed yield, yield components, and harvest index in four landraces of bambara groundnut [J]. International Journal Plant Production, 2011, 5(1): 25-36.
- [16] 朱妍,李吉跃,史剑波.北京六个绿化树种盆栽蒸腾耗水量的比较研究[J].北京林业大学学报,2006,20(1):65-70.
- [17] 孙鹏森,马履一.水源保护树种耗水特性研究与应用[M].北京:中国环境科学出版社,2002:4-16;68-93.

(责任编辑:林海清)