

经济林树种蒸腾耗水特性研究

鲁绍伟<sup>1,2,3</sup>,丁杰<sup>4</sup>,李少宁<sup>1,2,3\*</sup>,杨超<sup>4</sup>,张东坡<sup>5</sup>

(1.北京市林业果树科学研究院,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.河北省林业干部培训中心,河北 石家庄 050081)

**摘要:**以枣树、核桃、山楂、山杏、山桃、樱桃为试验树种,采用盆栽称质量法测定经济林树种的蒸腾耗水特性。结果表明:在水分充足的条件下,山楂、山桃、枣树的耗水量多于樱桃、山杏、核桃,耗水量分别为(0.090 3±0.002 0)、(0.075 5±0.001 7)、(0.069 6±0.001 8)、(0.046 3±0.001 3)、(0.041 9±0.000 8)、(0.030 8±0.000 5)g/(cm<sup>2</sup>·d),山楂是核桃的2.93倍。白天耗水量明显高于夜间耗水量,占全天耗水量的比例为78%~89%。枣树蒸腾速率(Tr)和净光合速率(Pn)日变化均为单峰曲线(峰值出现在11:00左右),其他树种为双峰曲线(峰值出现在11:00、15:00左右)。各树种清晨水分利用率(WUE)最高。7月各树种Pn最高。Tr表现为山楂[(3.34±0.92)mmol/(m<sup>2</sup>·s)]>山桃[(3.22±0.94)mmol/(m<sup>2</sup>·s)]>枣树[(2.94±1.14)mmol/(m<sup>2</sup>·s)]>樱桃[(2.33±0.84)mmol/(m<sup>2</sup>·s)]>山杏[(2.32±0.77)mmol/(m<sup>2</sup>·s)]>核桃[(2.27±0.76)mmol/(m<sup>2</sup>·s)]。Tr与气孔导度(Gs)和光合有效辐射(PAR)呈显著的线性正相关关系。

**关键词:**经济林树种;蒸腾耗水特性;水分利用率;气孔导度;光合有效辐射

**中图分类号:**S66      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-3268(2017)11-0113-07

Studies on Characteristics of Water-consumption for Transpiration  
of Economic Forest Tree Species

LU Shaowei<sup>1,2,3</sup>, DING Jie<sup>4</sup>, LI Shaoning<sup>1,2,3\*</sup>, YANG Chao<sup>4</sup>, ZHANG Dongpo<sup>5</sup>

(1. Beijing Academy of Forestry and Pomology 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 071000, China;  
5. Forestry Cadre Training Center of Hebei, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** In this study, *Ziziphus jujuba*, *Juglans regia*, *Crataegus pinnatifida*, *Armeniaca sibirica*, *Amygdalus davidiana* and *Cerasus pseudocerasus* were selected to measure the characteristics of water consumption for transpiration of economic forest tree species using the method of potted plants weighing. The results showed that *Crataegus pinnatifida*, *Amygdalus davidiana* and *Ziziphus jujuba*'s water consumption were higher than *Cerasus pseudocerasus*, *Armeniaca sibirica*, *Juglans regia* under the condition of sufficient water. The water consumption was respectively (0.090 3±0.002 0), (0.075 5±0.001 7), (0.069 6±0.001 8), (0.046 3±0.001 3), (0.041 9±0.000 8), (0.030 8±0.000 5)g/(cm<sup>2</sup>·d). *Crataegus*

收稿日期:2017-05-20  
基金项目:北京市农林科学院创新能力建设专项(KJCX20150205, KJCX 20170601);北京市农林科学院青年基金项目(QNJ201532);科技创新服务能力建设-协同创新中心-林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011协同创新中心)(市级)项目(PXM2017\_014207\_000043);北京市农林科学院科技创新团队项目(JWKST201609);林业科技创新平台运行补助项目(2017-LYPT-DW-001)  
作者简介:鲁绍伟(1969-),男,河北秦皇岛人,研究员,博士,主要从事水土保持研究。E-mail:hblsw8@163.com  
\* 通讯作者:李少宁(1975-),男,河北滦县人,副研究员,博士,主要从事城市森林生态功能等研究。  
E-mail:lishaoning@126.com

*pinnatifida*’ water consumption was 2.93 times higher than *Juglans regia*. The water consumption in daytime took up 78%—89% of the whole day and was significantly higher than that of night. *Ziziphus jujuba*’ daily variation of transpiration rate(*Tr*) and photosynthetic rate(*Pn*) were unimodal curve(peak appeared at 11:00 or so), and other species were bimodal curve (peak appeared at about 11:00 and 15:00). Each tree’s water use efficiency was highest in the early morning. Tree’s photosynthetic rate (*Pn*) showed highest in July. The relationship of *Tr* was *Crataegus pinnatifida*[ (3.34 ± 0.92) mmol/(m<sup>2</sup> · s)] > *Amygdalus davidiana* [ (3.22 ± 0.94) mmol/(m<sup>2</sup> · s)] > *Ziziphus jujuba* [ (2.94 ± 1.14) mmol/(m<sup>2</sup> · s)] > *Cerasus pseudocerasus* [ (2.33 ± 0.84) mmol/(m<sup>2</sup> · s)] > *Armeniaca sibirica* [ (2.32 ± 0.77) mmol/(m<sup>2</sup> · s)] > *Juglans regia* [ (2.27 ± 0.76) mmol/(m<sup>2</sup> · s)]. *Tr* and stomatal conductance (*Gs*) and photosynthetic active radiation(*PAR*) had significant linear positive correlation.

**Key words:** economic forest tree species; characteristics of water-consumption for transpiration; water use efficiency; stomatal conductance; photosynthetic active radiation

经济林树种是有特殊经济价值的林木和果木，可直接或者间接地获得经济效益，例如生产果品、木材、食用油料、工业原料和药材等林产品。在城市绿化建设中，为了提高园林绿化的生态效益和经济价值，经济林树种也被应用到了植物造景中，并且花、果、叶、树形都有很高的观赏性和经济性，以及成熟的栽培管理技术<sup>[1]</sup>，然而经济林树种在带来景观、生态效益和经济收益的同时，其自身蒸腾耗水等方面的生态问题也受到了社会的广泛关注。尤其是随着全球气候的变化以及我国经济的快速发展和城市化进程的加快，我国水资源在原本就贫乏的基础上，数量和质量进一步降低<sup>[2]</sup>。因此，研究经济林树种的耗水特性以及水分利用率等对水资源的可持续开发和利用具有重要意义。

近年来，对经济林树种的研究较多。万素梅等<sup>[3]</sup>对塔里木盆地红枣的研究表明，红枣在不同水分条件下的净光合速率(*Pn*)和蒸腾速率(*Tr*)日变化均表现为单峰曲线。陈玉民等<sup>[4]</sup>发现，*Pn*变化与*Tr*变化趋势的交叉点是水分利用率的最高点。赵经华等<sup>[5]</sup>研究发现，核桃的*Tr*日变化在晴天呈单峰趋势，在阴天呈双峰或多峰趋势，与太阳辐射表现为正相关性。山杏的*Tr*与*Pn*存在显著的正相关关系<sup>[6]</sup>。在园林植物配置中，需要对不同经济林树种进行耗水特性的比较，以便进行科学的植物配置，而盆栽可以在人工控制条件下提供相似的环境条件<sup>[7]</sup>。因此，采用盆栽苗木称质量法，在水分充足条件下测定枣树、核桃、山楂、山杏、山桃、樱桃6种经济林树种的耗水特性和水分利用率，并对不同经济林树种间的差异进行比较，为经济林树种的灌溉管理以及植物造景等提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验于 2016 年 5—10 月在北京林业果树科

学研究院的枣种质资源圃内进行，研究所属香山景区，地理坐标为 39°59′35″ N、116°13′13″ E，属北温带半湿润大陆性季风气候。该地全年无霜期 180 ~ 200 d，年平均气温 11.6 ℃，降水分配很不均匀，全年降水的 80% 集中在 6、7、8 月，年均降雨量约 483.9 mm。

1.2 试验材料

选取华北地区常见的经济林树种(表 1)，每个树种选择健壮且长势、苗高、地径一致的 5 株苗木栽于盆中，取原生土栽培。

表 1 试验树种基本情况

树种	品种	拉丁名	科属
枣树	酸枣	<i>Ziziphus jujube</i> var. <i>spinosa</i>	鼠李科枣属
核桃	香薄片山核桃	<i>Juglans regia</i>	胡桃科胡桃属
山楂	大金星	<i>Crataegus pinnatifida</i>	蔷薇科山楂属
山杏	山杏	<i>Prunus sibirica</i>	蔷薇科杏属
山桃	红花山桃	<i>Prunus davidiana</i> ‘ <i>Rubra</i> ’	蔷薇科桃属
樱桃	红灯	<i>Cerasus pseudocerasus</i>	蔷薇科樱属

1.3 试验方法

试验在防雨棚内进行，在人工控制条件下(水分充足)，经过一段时期的缓苗，对树种进行光合蒸腾特性的测定。利用手持式 CI-340 光合测定仪于晴朗无云的天气选取树冠外侧向阳且健康完整的 5 片叶子，每片叶子测 3 ~ 5 个瞬时值，对树种的*Pn*、*Tr*、气孔导度(*Gs*)和光合有效辐射(*PAR*)等进行测定，测定时间为 7:00—17:00，时间间隔 2 h。计算水分利用率(*WUE*)， $WUE = Pn/Tr$ <sup>[8]</sup>。

单株叶面积运用 EPSON Scan 扫描仪扫描各级叶片，并计算出各级叶片的叶面积，各级叶片数乘以各级叶片叶面积的总和为单株叶面积。耗水量用 ACS-D11 电子秤(精度为 10 g)于 8:00、18:00 以及翌日 8:00 称质量测定。称质量时，为消除盆内土壤蒸发的影响，用空白盆栽作为对照，每种树种称

3 次。树种每天单位面积昼夜耗水量 $[g/(cm^2 \cdot d)] =$ 耗水量(g)/单株叶面积( $cm^2$ )。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2013 对 3 次重复的所有数据求平均值,并绘制图表,运用 SPSS 19.0 进行数理统计和影响因素的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 经济林树种耗水差异

图 1 表明,试验阶段,经济林树种盆栽苗木蒸腾耗水变化趋势一致,山楂、山桃、枣树的耗水量比樱桃、核桃、山杏高。在整个试验的生长季,山楂、山桃、枣树、樱桃、山杏、核桃耗水量分别为 $(0.090\ 3 \pm 0.002\ 0)$ 、 $(0.075\ 5 \pm 0.001\ 7)$ 、 $(0.069\ 6 \pm 0.001\ 8)$ 、

$(0.046\ 3 \pm 0.001\ 3)$ 、 $(0.041\ 9 \pm 0.000\ 8)$ 、 $(0.030\ 8 \pm 0.000\ 5)\ g/(cm^2 \cdot d)$ ,其中核桃耗水量为山楂耗水量的 34%。5 月核桃耗水量比山杏耗水量高 3.1%,6 月枣树耗水量相比山桃高 7.9%,但整体耗水表现为山楂>山桃>枣树>樱桃>山杏>核桃。经济林树种耗水量为 7 月 $[(0.073\ 0 \pm 0.002\ 5)\ g/(cm^2 \cdot d)]$ 、8 月 $[(0.070\ 1 \pm 0.000\ 9)\ g/(cm^2 \cdot d)]$ 最多,其次是 6 月 $[(0.062\ 7 \pm 0.001\ 6)\ g/(cm^2 \cdot d)]$ 和 9 月 $[(0.060\ 3 \pm 0.001\ 5)\ g/(cm^2 \cdot d)]$ 、10 月 $[(0.044\ 4 \pm 0.001\ 1)\ g/(cm^2 \cdot d)]$ 、5 月 $[(0.043\ 8 \pm 0.001\ 1)\ g/(cm^2 \cdot d)]$ 耗水量最少且二者相差不大。由于夏季高温和强太阳辐射等的影响,经济林树种夏季耗水量普遍高于秋季和春季的耗水量。

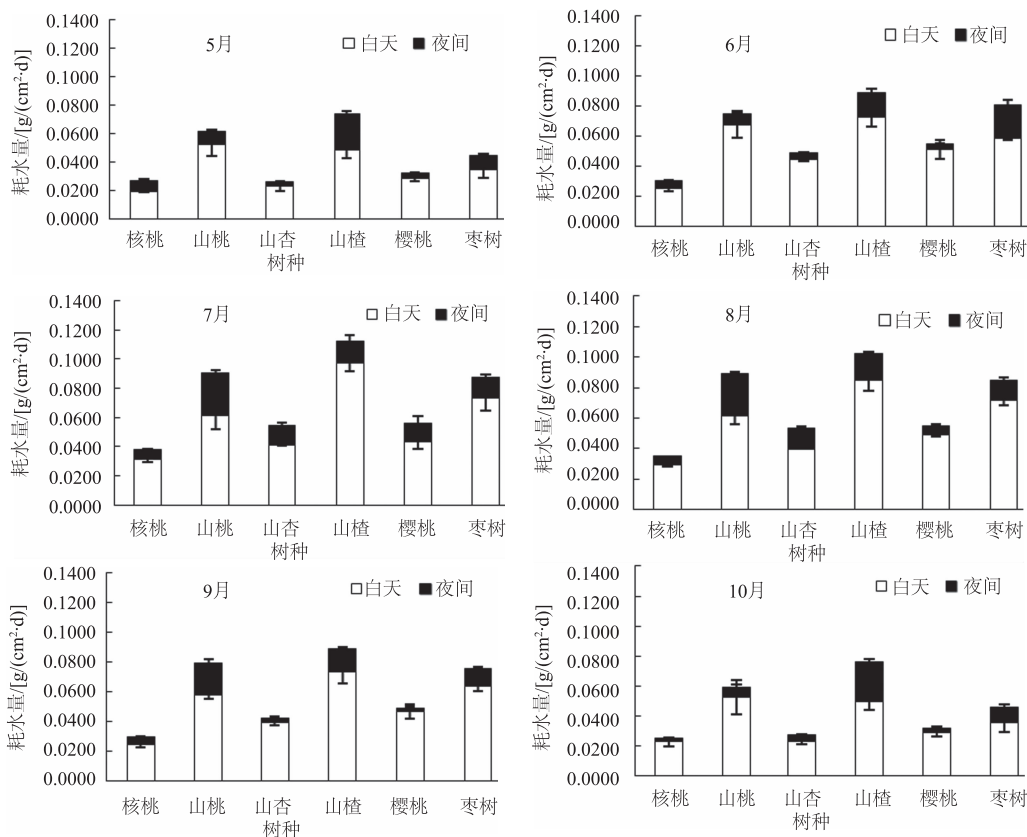


图 1 不同树种各个月份昼夜耗水量

经济林树种白天耗水量明显高于夜间耗水量,白天耗水量占昼夜耗水量的百分比依次为樱桃 89%、山杏 83%、核桃 82%、枣树 80%、山楂 79%、山桃 78%。5、6 月樱桃、山杏、山桃白天耗水量占昼夜耗水量的百分比均高于核桃、山楂和枣树。说明樱桃、山杏、山桃在生长季初期用于自身生长所消耗的水分较多。5 月樱桃、山杏、山桃白天耗水量占昼夜耗水量的 89%、87%、85%,枣树、山楂、核桃为 78%、70%、65%,6 月樱桃、山

杏、山桃占 94%、91%、90%,枣树、山楂、核桃为 72%、82%、84%,而枣树、山楂、核桃在 5、6 月中白天耗水量占昼夜耗水量百分比排序正好相反。7、8 月山楂、樱桃白天耗水量占昼夜耗水量百分比有所不同,7 月以山楂(87%)高于樱桃(77%),而 8 月以樱桃(89%)高于山楂(83%)。9、10 月樱桃白天耗水量所占百分比较大,分别是 95%、89%,山楂白天耗水量所占百分比较小,为 83%、65%。5 月和 10 月树种白天耗水量占昼夜耗水量

的百分比相对较低,主要是由于有风天气较多,导致夜晚耗水量有所增高。

2.2 经济林树种蒸腾特性

2.2.1 日变化 如图 2 所示,各树种 Tr 日变化均在 11:00、15:00 出现高峰值(枣树除外,只在 11:00 出现一个高峰值),山楂、山桃、枣树、樱桃、山杏、核桃的 Tr 日均值分别为  $(3.34 \pm 0.92)$ 、 $(3.22 \pm 0.94)$ 、 $(2.94 \pm 1.14)$ 、 $(2.33 \pm 0.84)$ 、 $(2.32 \pm 0.77)$ 、 $(2.27 \pm 0.76)$  mmol/(m<sup>2</sup>·s)。图 3 说明树种 Pn 的日变化规律与其 Tr 日变化相同,即相同时间达到峰值、变化趋势相同。山楂的 Pn 日均值最高  $[(12.44 \pm 2.90) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ,其次是山桃  $[(11.76 \pm 4.24) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、枣树  $[(10.58 \pm 4.19) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、樱桃  $[(8.39 \pm 3.43) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、山杏  $[(7.96 \pm 2.52) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、核桃  $[(7.86 \pm 2.52) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$  的 Pn 日均值较低。

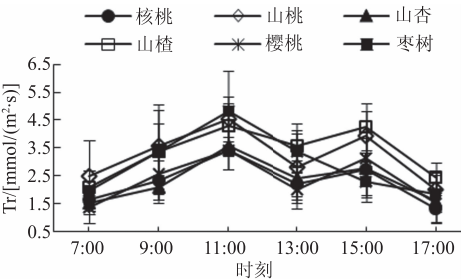


图 2 不同树种 Tr 日变化

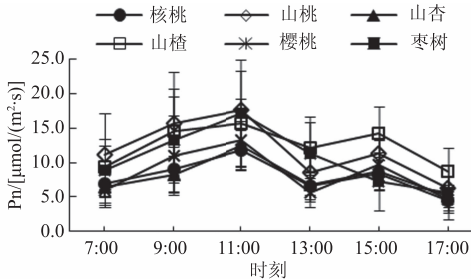


图 3 不同树种 Pn 日变化

各树种 WUE 日变化见图 4,均表现为清晨 WUE 最高,随后降低。核桃、山杏、樱桃是 13:00 左右下降到最低,随后有所回升;山桃、山楂则是 15:00 左右降到最低值后开始回升;而枣树一天中的 WUE 持续降低,到 17:00 左右 WUE 降到最低。各树种 WUE 日均值相差不大,分别为山楂  $(3.76 \pm 0.52)$  mmol/mol、樱桃  $(3.73 \pm 0.64)$  mmol/mol、山桃  $(3.66 \pm 0.70)$  mmol/mol、核桃  $(3.59 \pm 0.43)$  mmol/mol、山杏  $(3.51 \pm 0.50)$  mmol/mol、枣树  $(3.42 \pm 0.48)$  mmol/mol。山楂、山桃、枣树的光合能力优于樱桃、山杏、核桃,但樱桃的 WUE 高于枣树,因此山楂、山桃、樱桃对环境的适应能力较强。

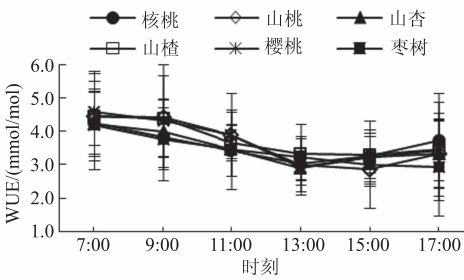


图 4 不同树种 WUE 日变化

2.2.2 月变化 图 5 表明,核桃、樱桃、枣树的 Tr 月变化为双峰曲线,核桃、樱桃在 7 月和 9 月出现 2 个高峰值,枣树 Tr 的高峰值则出现在 6、9 月,分别为  $(3.70 \pm 1.32)$ 、 $(2.83 \pm 0.98)$  mmol/(m<sup>2</sup>·s);山桃 Tr 月变化为倒 N 曲线,5 月 Tr 最高,为  $(4.08 \pm 0.99)$  mmol/(m<sup>2</sup>·s);山杏的 Tr 月变化呈波浪型,即 5 月  $[(2.28 \pm 1.16) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、7 月  $[(2.42 \pm 0.87) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、9 月  $[(2.58 \pm 1.01) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$  Tr 较高,其他月份较低;山楂为单峰曲线,在 7 月出现一个最高值  $[(4.34 \pm 1.36) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 。Tr 月均值最大的为山楂  $[(3.34 \pm 0.63) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ,最小的是核桃  $[(2.27 \pm 0.53) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ,山楂是核桃的 1.47 倍。经济林树种 Pn 月变化见图 6,各树种均在 7 月 Pn 最高,表明 7 月是树木旺盛生长的季节;而所测树种中山楂 Pn 月均值最高,为  $(12.45 \pm 3.32) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,核桃 Pn 月均值最低,为  $(7.87 \pm 0.63) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,占山楂的 63%,所以一年中山楂生长积累的物质最多。

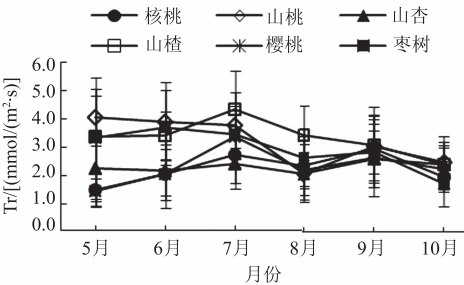


图 5 不同树种 Tr 月变化

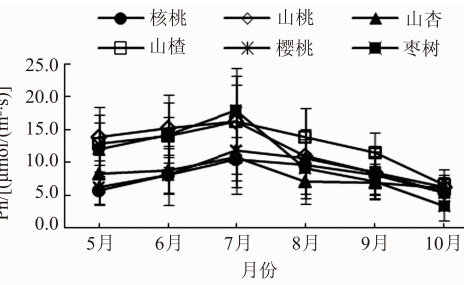


图 6 不同树种 Pn 月变化

图 7 说明了各树种的 WUE 月变化特征,山杏、山楂、樱桃为倒 N 曲线,核桃 WUE 月变化为双峰曲线,山桃、枣树为单峰曲线。山杏、枣树 7 月的 WUE 相比其他月份最高,分别为 $(4.38 \pm 0.66)$ 、 $(5.12 \pm$

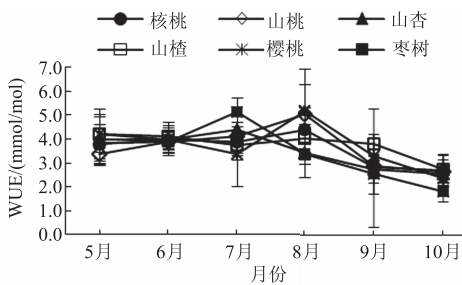
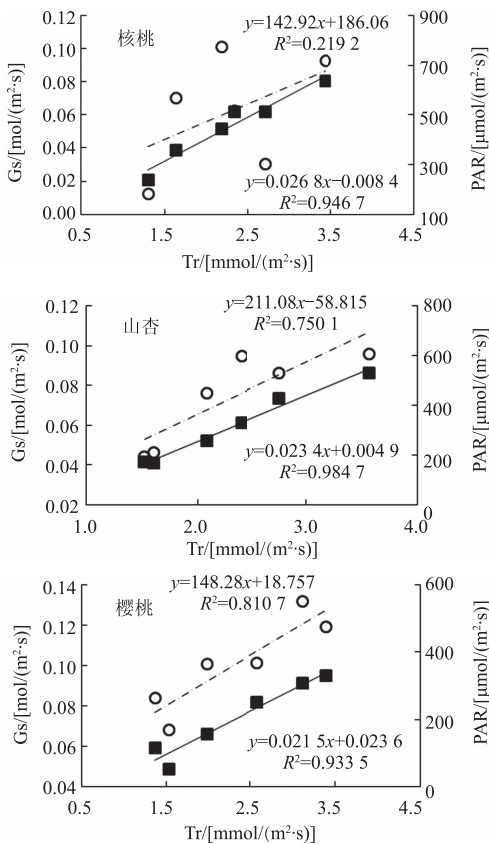


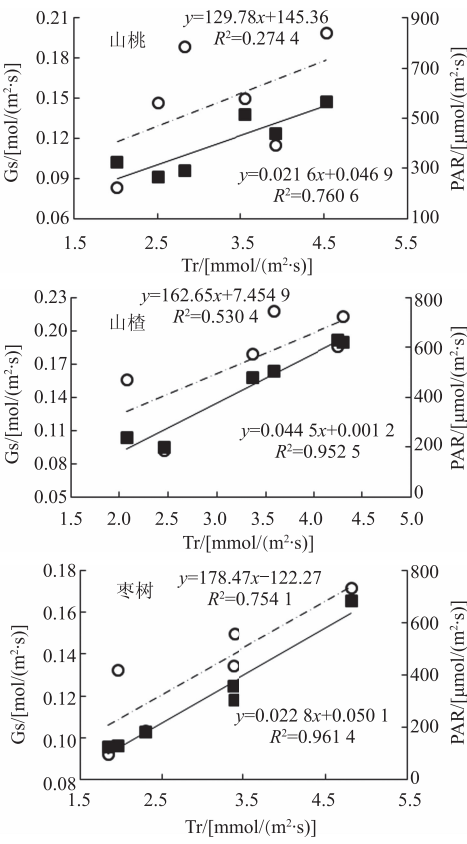
图 7 不同树种 WUE 月变化



0.60) mmol/mol;其他树种则是 8 月最高,核桃、山桃、山楂、樱桃分别为 $(4.38 \pm 0.93)$ 、 $(5.05 \pm 1.90)$ 、 $(4.02 \pm 0.59)$ 、 $(5.17 \pm 1.12)$  mmol/mol,由此可见,7 月和 8 月的外界环境条件最有利于经济林树木的生长发育。

2.3 Tr 与 Gs 和 PAR 的相关关系

将各树种 Tr 与对应的 Gs 和 PAR 进行相关性分析(图 8),Tr 与 Gs 和 PAR 的相关性显著,Tr 与 Gs 的相关性普遍大于 Tr 与 PAR 的相关性。樱桃的 Tr 受 Gs( $R^2 = 0.933\ 5$ )和 PAR( $R^2 = 0.810\ 7$ )的影响较大,山桃受 Gs 和 PAR 的影响偏小。与其他树种相比,核桃的 Tr 受 PAR 的影响最小( $R^2 = 0.219\ 2$ )。



圆形点画线和方形实线分别代表 Tr 与 PAR 和 Gs 的相关关系

图 8 不同树种 Tr 与 Gs 和 PAR 相关性分析

3 结论与讨论

3.1 经济林树种的蒸腾特性

植物的 Tr 表现了植物生长过程中的水分损耗,是植物耗水的重要水分生理特征指标之一,可以用来反映不同植物的差异;Pn 反映了植物光合能力的强弱;WUE 的大小反映了植物对逆境适应能力的大小<sup>[9-10]</sup>。本研究中,山楂和山桃的光合能力较强且在生长过程中水分损耗较多,但在适应能力方面以

山楂和樱桃较强。山桃的 WUE 日均值 $[(3.66 \pm 0.70)\text{mmol/mol}]$ 大于山杏 $[(3.51 \pm 0.50)\text{mmol/mol}]$ ,因此,山桃适应逆境的能力强于山杏,这与张迎辉<sup>[10]</sup>的研究结果(山杏强于山桃)不同,其原因主要是由于试验所持续的时间长短存在差异。核桃、山桃、山杏、山楂、樱桃 Pn 日变化在 11:00 和 15:00 存在峰值,与何海洋等<sup>[11]</sup>对 6 个品种美国山核桃嫁接苗光合特性研究的结果相同,山桃最大 Pn 达到了 $(17.59 \pm 5.79)\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,而谢玲等<sup>[12]</sup>测定的

杂种山桃的最大 Pn 为  $(9.90 \pm 0.14) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，可能是桃品种的不同导致的。山楂的最大 Pn 为  $(15.69 \pm 3.51) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，与张曦等<sup>[13]</sup>研究高山地区山楂的最大 Pn 值相差不大 $[14.183 3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ，其山楂的 Tr 日变化呈双峰型，第一峰值出现在 12:00，第二峰值出现时间是 16:00，比本研究中峰值延后 1 h 左右，这主要与植物所处的高山地区和平原区域生态环境不同有关。枣树的 Pn 和 Tr 峰值与其他树种出现的时间不尽相同，以及各树种间变化幅度均不同，表明受环境因子的抑制程度存在差异，不同树种光合蒸腾特性对生态环境因子的响应也不同<sup>[14]</sup>。山杏 7 月的 Tr  $[(2.42 \pm 0.87) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$  较 6 月的 Tr  $[(2.21 \pm 0.89) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$  高，董胜君等<sup>[6]</sup>测定结果表明，不同品种山杏的 Tr 是 6 月明显高于 7 月，这主要与试验测定的年份不同有关。山桃 5 月 Tr 最大  $[(4.08 \pm 0.99) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ，枣树是 6 月最大  $[(3.70 \pm 1.32) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ，山楂、樱桃为 7 月最大  $[(4.34 \pm 1.36)$ 、 $(3.39 \pm 1.08) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ，核桃、山杏为 9 月最大  $[(2.95 \pm 1.20)$ 、 $(2.58 \pm 1.01) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ，因此，可根据不同月份各树种蒸腾速率的高低适当增减灌水量。

综上所述，山桃、山楂、枣树在生长季初期需要消耗更多的水分，其中枣树 Pn、Tr 日变化为仅在上午 11:00 出现峰值后逐渐下降，WUE 为持续降低趋势，所以，枣树主要是一天中的上午积累营养物质，其他树种均是上午和下午积累营养物质，且上午积累的物质高于下午所积累的，因此，可在清晨以及春末夏初时节的管理中适当增加灌水量。山杏在 5、7、9 月，核桃、樱桃在 7、9 月，山楂在 7 月要加强水分管理和养护。

3.2 经济林树种的蒸腾耗水特性

枣树的全年月耗水量呈单峰变化，6—8 月耗水量较多，月平均耗水量达到  $(0.084 3 \pm 0.003 4) \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ，5、10 月耗水量较少，只有  $(0.044 9 \pm 0.001 3) \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ，这一结果与魏新光等<sup>[15]</sup>对梨枣树的研究结果基本一致，但其梨枣树在 7—9 月蒸腾量较大，比本研究延迟 1 个月左右出现耗水量较多的月份，这可能主要是因为枣树的品种不同造成的。山楂  $[(0.090 3 \pm 0.002 0) \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})]$ 、山桃  $[(0.075 5 \pm 0.001 7) \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})]$ 、枣树  $[(0.069 6 \pm 0.001 8) \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})]$  的耗水量多于樱桃  $[(0.046 3 \pm 0.001 3) \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})]$ 、核桃  $[(0.041 9 \pm 0.000 8) \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})]$ 、山杏  $[(0.030 8 \pm 0.000 5) \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})]$ ，因此，在经济林树种的种植过程中，尽量不要

将山楂、山桃和枣树种植在一起，以免灌溉量达不到树种的需水要求，造成树木生长不良以及水资源的过多消耗。根据需求，山楂、山桃或枣树中的一种可与樱桃、核桃、山杏配置在一起，既达到了合理利用水资源的目的，又可营造良好的观赏效果并发挥生态功能。植物蒸腾作用是自身生理特性和环境因子共同影响的结果，表现出适应特性并通过光合蒸腾特性及叶片性状反映出来<sup>[16-18]</sup>。环境因子主要通过影响气孔运动进而间接调节植物蒸腾耗水，气孔导度可以揭示植物蒸腾耗水的生理响应机制<sup>[10]</sup>。樱桃的 Tr 受 Gs 的影响显著， $R^2$  为 0.933 5。这一结果与巴合提牙尔·克热木等<sup>[19]</sup>研究樱桃出现光合变化现象主要是气孔限制引起的结果相同。经济林树种蒸腾速率与光合有效辐射呈显著的线性正相关关系，这一结果与 Ye<sup>[20]</sup>、赵风华等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。一般情况下，蒸腾速率会随着光合有效辐射的增加而增加，但当光合有效辐射持续增强时，植物叶片会由于蒸腾失水过多而导致气孔关闭，气孔导度减小，蒸腾速率反而会出现下降的趋势<sup>[22-23]</sup>。所以本研究得出的结论为树种生长在适宜环境条件下的变化规律，至于逆境中的树种光合蒸腾耗水特性还有待更多的、长期的工作进行探究。

本试验结果表明，在水分充足的试验季，樱桃、核桃、山杏节水能力优于山楂、山桃、枣树。经济林树种 7、8 月耗水量多于 6、9 月和 5、10 月，且白天耗水量明显高于夜间耗水量。就整个生长季而言，山桃、山楂、枣树夜间耗水更易受到风的影响，但在生长季初期，核桃、山楂、枣树更易受影响；旺盛生长期，山桃、山杏、山楂受影响较大；生长后期，山楂受影响最大，可适当设置风障以减少水分的散失。

各树种 Tr、Pn 日变化均在 11:00、15:00 出现 2 次高峰值（枣树除外，仅 11:00 左右出现高峰），日均值均为山楂 > 山桃 > 枣树 > 樱桃 > 山杏 > 核桃。各树种 WUE 均表现为清晨最高，下午或傍晚 WUE 稍有提高，可于清晨或傍晚进行灌溉，但尤以清晨浇水最佳。山楂、山桃、樱桃适应性较强，能够有效利用土壤中的水分。

核桃和樱桃在 7 月和 9 月，山桃在 5 月、8 月和 9 月，山杏在 5 月、7 月和 9 月，山楂于 7 月，枣树于 6 月、7 月和 9 月要加强日常水分管理。Tr 与 Gs 和 PAR 呈线性正相关关系且相关性显著，并且 Tr 受 Gs 的影响更大。

参考文献：

[1] 裴春辉. 经济林树种在现代园林绿化中的应用[J]. 现



- 代园艺,2015(4):67.
- [2] 苏云森. 水资源状况及开发利用分析[J]. 中国高新技术企业,2012,11(1):111-112.
- [3] 万素梅,胡守林,杲先民,等. 干旱胁迫对塔里木盆地红枣光合特性及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(3):171-175.
- [4] 陈玉民,孙景生,肖俊夫. 节水灌溉的土壤水分控制标准问题研究[J]. 灌溉排水,1997,16(1):24-28.
- [5] 赵经华,洪明,穆哈西,等. 滴灌条件下核桃树蒸腾速率与气象因子的关系[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(4):776-779.
- [6] 董胜君,尹健,刘明国,等. 山杏新品种光合生理特性研究[J]. 经济林研究,2016,34(2):67-72.
- [7] He Q, Li J Y, Chen X Y, *et al.* Water utilization and its distribution in day and night in different *Populus tomentosa* clones[J]. Journal of South China Agricultural University, 2010,31(1):47-50.
- [8] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报,2015,35(9):2903-2908.
- [9] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity in the arid and semiarid zones[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1978, 29: 227-317.
- [10] 张迎辉. 山东省 14 个造林绿化树种蒸腾耗水性与抗旱性研究[D]. 泰安:山东农业大学,2006.
- [11] 何海洋,彭方仁,张瑞,等. 不同品种美国山核桃嫁接苗光合特性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(4):21-24.
- [12] 谢玲,刘卫东,冯斌义,等. 不同株型观赏桃的生长及光合特性比较研究[J]. 经济林研究,2014,32(4):103-108.
- [13] 张曦,栗忠飞,赵慧丽,等. 纳帕河流域五种优势乔木树种光合速率日变化特征[J]. 广西植物,2016,36(5):515-522.
- [14] 邵永昌,李娟娟,付达夫,等. 上海地区 8 种落叶阔叶树夏季光合蒸腾特性研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(4):30-38.
- [15] 魏新光,王铁良,刘守阳,等. 种植年限对黄土丘陵半干旱区山地枣树蒸腾的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(7):173-177.
- [16] Midgley G F, Araniibar J N, Mantlana K B, *et al.* Photosynthetic and gas exchange characteristics of dominant woody plants on a moisture gradient in an African savanna[J]. Global Change Biology, 2004, 10(3):309-317.
- [17] Robert J, James W D, Kyle E H, *et al.* Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species[J]. PNAS, 2007, 104(3):864-869.
- [18] Cao B, Dang Q L, Zhang S R. Relationship between photosynthesis and leaf nitrogen concentration in ambient and elevated [CO<sub>2</sub>] in white birch seedlings[J]. Tree Physiology, 2007, 27(16):891-899.
- [19] 巴合提牙尔·克热木,郭靖,徐业勇,等. 南疆地区 2 个引种大樱桃品种光合特性对比研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):86-91.
- [20] Ye Z P. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO<sub>2</sub> [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(6):727-740.
- [21] 赵风华,王秋风,王建林,等. 小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理[J]. 生态学报,2011,31(24):7527-7532.
- [22] Yu Y B, Liu T H. Study on the ecology of photo-effect on the plants. I. Cause of midnap in the wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 1985, 5(4):336-342.
- [23] Xu D Q. Ecology, physiology and biochemistry of midday depression of photosynthesis[J]. Plant Physiology Communication, 1990, 26(6):5-10.