

赵云阁,李少宁,鲁绍伟,等.北京市园林灌木植物蒸腾耗水特性比较[J].江苏农业科学,2017,45(15):110-114.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.15.028

# 北京市园林灌木植物蒸腾耗水特性比较

赵云阁<sup>1</sup>,李少宁<sup>2,3,4</sup>,鲁绍伟<sup>2,3,4</sup>,丁杰<sup>1</sup>,杨超<sup>1</sup>,陈波<sup>2,3,4</sup>,谷建才<sup>1</sup>

(1.河北农业大学林学院,河北保定 071000; 2.北京市农林科学院林业果树研究所,北京 100093;

3.北京林业业生态环境功能提升协同创新中心,北京 100093; 4.北京燕山森林生态系统定位观测研究站,北京 100093)

**摘要:**以枸杞、柽柳、木槿、花椒、黄杨为试验对象,采用盆栽称质量法、CI-340 光合测定仪测定灌木树种的蒸腾耗水特性。结果表明:在水分充足的条件下,典型天气树种耗水量介于 0.023~0.095 g/(cm<sup>2</sup>·d)之间;7、8 月份的耗水量最大;在整个生长季节,枸杞耗水量[0.089 g/(cm<sup>2</sup>·d)]最多,木槿[0.083 g/(cm<sup>2</sup>·d)]、黄杨[0.059 g/(cm<sup>2</sup>·d)]和花椒[0.037 g/(cm<sup>2</sup>·d)]次之,柽柳[0.026 g/(cm<sup>2</sup>·d)]耗水量最少;枸杞、柽柳  $P_n$  日变化为单峰型,最大值分别出现在 11:00、9:00,木槿、花椒、黄杨为双峰型,最大值出现在 11:00;柽柳  $T_r$  日变化是单峰型,枸杞、木槿、花椒、黄杨是双峰型,柽柳峰值出现在 11:00,为 3.20 mmol/(m<sup>2</sup>·s),枸杞、木槿、花椒、黄杨峰值在 11:00、15:00; $T_r$  总体表现为枸杞最高[3.33 mmol/(m<sup>2</sup>·s)],其次是木槿[3.25 mmol/(m<sup>2</sup>·s)]、黄杨[2.51 mmol/(m<sup>2</sup>·s)]和花椒[2.32 mmol/(m<sup>2</sup>·s)],最低的是柽柳[2.17 mmol/(m<sup>2</sup>·s)];蒸腾速率与气孔导度  $G_s$  呈正相关,与胞间 CO<sub>2</sub> 浓度  $C_i$  呈指数负相关;5 个树种 WUE 均是 7:00 最高。综合分析可知,枸杞、木槿适应逆境能力强于黄杨、花椒、柽柳。研究结果可为水资源的合理利用以及绿地的科学规划与管理提供依据。

**关键词:**蒸腾耗水特性;灌木植物;水分利用效率;气孔导度;胞间 CO<sub>2</sub> 浓度

**中图分类号:** S715.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)15-0110-05

与世界上其他现代化大城市相比,北京市在城市园林建设方面仍存在较大差距<sup>[1]</sup>。园林建设的重要组成部分是园林植物,而水分又是影响植物生长的重要因素。植物内约 90% 的水分是通过蒸腾耗水散失的,蒸腾作用是植物运输水分的主要作用力,植物将根系吸收的水分提升至冠层是通过蒸腾拉力、木质部导管或管胞形成的束状分管网通道系统共同作用完成的<sup>[2-4]</sup>。由于北京市是水严重匮乏的特大城市,近几十年来,北京市以年均不足 21 亿 m<sup>3</sup> 的水资源,维持着 36 亿 m<sup>3</sup> 的用水需求,每年水资源缺口已达 15 亿 m<sup>3</sup>。密云水库多年储水量低于 10 亿 m<sup>3</sup>,每年的用水缺口相当于密云水库储水量的 1.5 倍。因此,园林植物蒸腾耗水量的估算对水资源的合理利用、分配以及绿地的规划配置具有深远意义。Marc 等应用氡示踪技术测定了法国南部山毛榉的树干液流,并得出在试验过程中选择分枝较少的树木较好,且要有足够的氡示踪剂才能使示踪剂运输到树木的每个枝叶中<sup>[5]</sup>。1937 年,德国植物生理学家 Huber 首次运用热脉冲液流检测仪(heat pulse velocity recorder,简称 HPVR)对树干液

流进行了测定<sup>[6]</sup>,虽然该方法经过了一系列的完善,但是仍存在较大误差,主要是由植物组织的热储存导致的,而且安装也较繁琐<sup>[7-8]</sup>。Bernacchi 等提到,Granier 改进的热扩散液流探针(thermal dissipation sap flow velocity probe,简称 TDP)法可对茎秆较粗或高大植物的蒸腾量进行测定<sup>[9]</sup>,而盆栽可提供相似的环境条件,在不同时间、不同天气条件下,对不同树种的蒸腾耗水量进行比较。以往应用盆栽对造林树种研究的较多,而对园林绿化植物的研究较少。基于此,本研究以北京市园林绿化常用灌木树种为例,通过盆栽称质量法对灌木植物蒸腾耗水特性进行研究,以期为园林植物蒸腾耗水的估算和实现数据化管理提供简单而有效的方案,从而为园林绿化植物的灌溉规划提供可行性依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于北京市农林科学院林业果树研究所的枣种质资源圃内,该地处于北京市西、五环内与闵西桥交叉处,属于香山景区,占地 40 hm<sup>2</sup>,地理位置 39°59'35" N,116°13'13" E,海拔约 88 m,为典型的北温带半湿润大陆性季风气候。研究所内园林植物种类繁多,主要有鹅掌楸(*Liriodendron chinensis*)、凌霄(*Campsis grandiflora*)、棣棠花(*Kerria japonica*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、白皮松(*Pinus bungeana*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等。

### 1.2 试验材料

选取北京地区园林绿化常用的 5 种灌木树种进行试验,树种名称、科、属等情况见表 1。

收稿日期:2016-08-26

基金项目:北京市农林科学院科技创新能力建设专项(编号:KJXC20170601);北京市农林科学院青年基金(编号:QNJJ201532);北京市农林科学院科技创新团队(编号:JWKST201609)。

作者简介:赵云阁(1990—),女,河北阳原人,硕士研究生,主要从事森林经理学研究。E-mail:675420514@qq.com。

通信作者:鲁绍伟,博士,研究员,主要从事水土保持和森林生态服务功能研究,E-mail:hbhsw8@163.com;谷建才,博士,教授,主要从事森林经理学研究,E-mail:gujiancai@126.com。

表1 供试树种名称

序号	名称	拉丁学名	科属
1	枸杞	<i>Lycium chinensis</i>	茄科枸杞属
2	桤柳	<i>Tamarix chinensis</i>	桤柳科桤柳属
3	木槿	<i>Hibiscus syriacus</i>	锦葵科木槿属
4	花椒	<i>Zanthoxylum bungeanum</i>	芸香科花椒属
5	黄杨	<i>Buxus sinica</i>	黄杨科黄杨属

### 1.3 试验方法

1.3.1 光合蒸腾特性 每种树种选择5株长势相近且健壮的苗木栽于盆中,取原生土培养,经过一段时间的缓苗,于2015年5—10月在人工控制条件下(水分充足)对苗木的蒸腾特性进行测定。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  $G_s$  [ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]和胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $C_i$  ( $\text{mg}/\text{L}$ )使用手持式 CI-340 光合测定仪在各个测定月选择典型天气(阴天、半晴天、晴天),于07:00—17:00每隔2h测定1次,测定时每种苗木选取树冠外侧向阳、健康完整的5张叶片,每张叶片测3~5个瞬时值,结果取平均值。水分利用效率 WUE 由净光合速率  $P_n$  与蒸腾速率  $T_r$  的比值求得<sup>[10]</sup>。

1.3.2 蒸腾耗水量 用 ACS-D11 电子秤(精度为10g)于8:00、18:00以及翌日8:00称质量,即为苗木昼夜耗水量(g),每种苗木称3次重复,为了消除容器内土壤蒸发的影响,用空白盆栽作为对照。单株叶面积的测定于耗水测定前进行,将叶片进行分级,并记录各级叶片数量,用 EPSON Scan 扫描仪扫描各级典型叶片,利用该分析软件对图像进行处理,计算叶面积  $S(\text{cm}^2)$ ,单株叶面积为分级叶片数乘以各级典型叶片叶面积再将以上乘积相加的总和。单株苗木昼夜耗水量 [ $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ]由称质量耗水量除以单株叶面积得到。

### 1.4 数据分析处理

用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行数理统计及影响因子的相关性分析,用 Excel 2013 进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒸腾耗水量

2.1.1 典型天气蒸腾耗水量 由图1可以看出,在水分充足的条件下,5种树种表现出相同的规律,晴天蒸腾耗水量明显高于半晴天、阴天的耗水量;晴天耗水量处于  $0.029 \sim 0.095 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$  之间,枸杞蒸腾耗水量最大,其次是木槿、黄杨、花椒,分别为  $0.091$ 、 $0.064$ 、 $0.041 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ,桤柳蒸腾耗水量明显低于其他树种;枸杞半晴天蒸腾耗水量占晴天的92%,木槿、黄杨、花椒、桤柳半晴天蒸腾耗水量分别占其晴天耗水量的90%、90%、95%、88%;各物种阴天蒸腾耗水量介于  $0.023 \sim 0.084 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ,枸杞耗水量仍最大,占晴天的88%,木槿、黄杨、花椒其次,分别占其晴天耗水量的84%、85%、79%,阴天耗水量最少的是桤柳,占其晴天蒸腾耗水量的77%。

2.1.2 昼夜蒸腾耗水量 由图2可以看出,枸杞昼夜蒸腾耗水量多于木槿、黄杨、花椒、桤柳;在昼、夜蒸腾耗水量方面,枸杞分别是桤柳的2.95、7.20倍;枸杞白天蒸腾耗水量占全天耗水量的76%,夜间占24%;木槿、黄杨、花椒昼、夜耗水量分

别占全天的82%、18%、79%、21%、81%、19%;桤柳白天耗水量是全天的89%,夜间占11%。

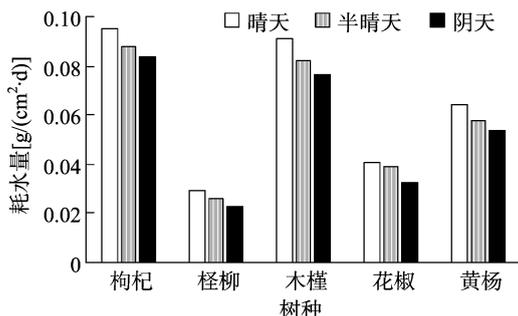


图1 不同树种在不同典型天气的耗水量

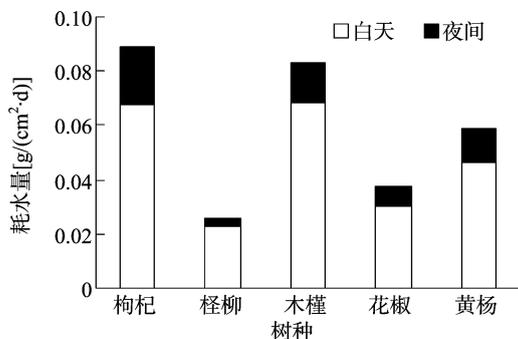


图2 不同树种昼夜耗水量

2.1.3 月蒸腾耗水进程 从图3可以看出,各树种月蒸腾耗水进程均呈拱形,7、8月份的水分消耗明显高于其他月份,主要是树木处于旺盛生长期与外界环境条件共同作用的结果;在整个生长季节,枸杞 [ $0.089 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ]、木槿 [ $0.083 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ]耗水量高于黄杨 [ $0.059 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ]、花椒 [ $0.037 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ]、桤柳 [ $0.026 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ]。

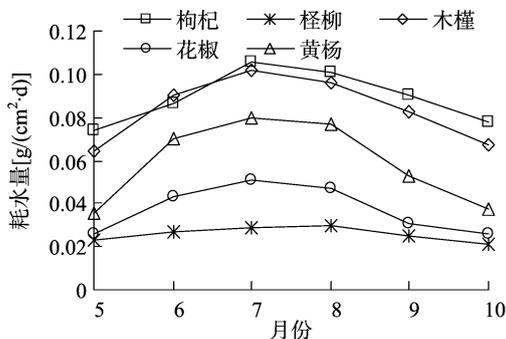


图3 不同树种在不同月份的耗水量

### 2.2 光合蒸腾特性及水分利用效率比较

2.2.1 光合速率  $P_n$  和蒸腾速率  $T_r$  日变化 由图4可知,不同树种  $P_n$ 、 $T_r$  日变化动态存在差异;枸杞、桤柳  $P_n$  日变化为单峰型,木槿、花椒、黄杨为双峰型;桤柳  $P_n$  峰值出现的时间(9:00)早于枸杞、木槿、花椒、黄杨第1次峰值出现的时间(11:00),峰值为  $9.68 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,随后  $P_n$  值逐渐降低,而枸杞  $P_n$  峰值为  $15.49 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,约为桤柳的1.60倍;随着气温的降低和相对湿度的提高,木槿、花椒、黄杨第2次  $P_n$  峰值出现在15:00,随后降低,且11:00的峰值高于15:00的峰值,分别高31%、40%、52%,其中木槿11:00的峰

值为  $15.19 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 分别为花椒、黄杨的 1.25、1.23 倍, 15:00 的峰值为  $10.42 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 分别为花椒、黄杨的 1.44、1.75 倍;  $P_n$  日均值是木槿最大, 为  $10.22 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 其次是枸杞、黄杨、花椒, 分别为  $10.20$ 、 $7.09$ 、 $6.72 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 柽柳最低, 为  $5.51 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 木槿是柽柳的 1.85 倍。

由图 4 还可以看出, 柽柳  $T_r$  日变化为单峰型, 枸杞、木槿、花椒、黄杨为双峰型; 柽柳峰值出现在 11:00, 其值为  $3.20 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 枸杞、木槿、花椒、黄杨峰值出现在 11:00、15:00, 第 1 次峰值分别是第 2 次峰值的 1.36、1.13、

1.33、1.26 倍; 枸杞  $T_r$  峰值最大 [ $4.66 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ], 柽柳最小, 仅为枸杞的 69%; 枸杞  $T_r$  总体上最高, 平均为  $3.33 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 其次是木槿 [ $3.25 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、黄杨 [ $2.51 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、花椒 [ $2.32 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ], 最低的是柽柳 [ $2.17 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]。蒸腾速率的高低从某种程度上体现了植物控制水分平衡和适应逆境能力的大小<sup>[11]</sup>, 因此可见, 枸杞、木槿控制水分平衡和适应逆境能力强于黄杨、花椒、柽柳。木槿、花椒、黄杨  $T_r$  日变化趋势与其  $P_n$  日变化趋势相同, 即同时出现峰值、谷值; 柽柳  $T_r$  峰值滞后于  $P_n$  峰值; 枸杞第 1 次  $T_r$  峰值与  $P_n$  峰值出现的时间相同。

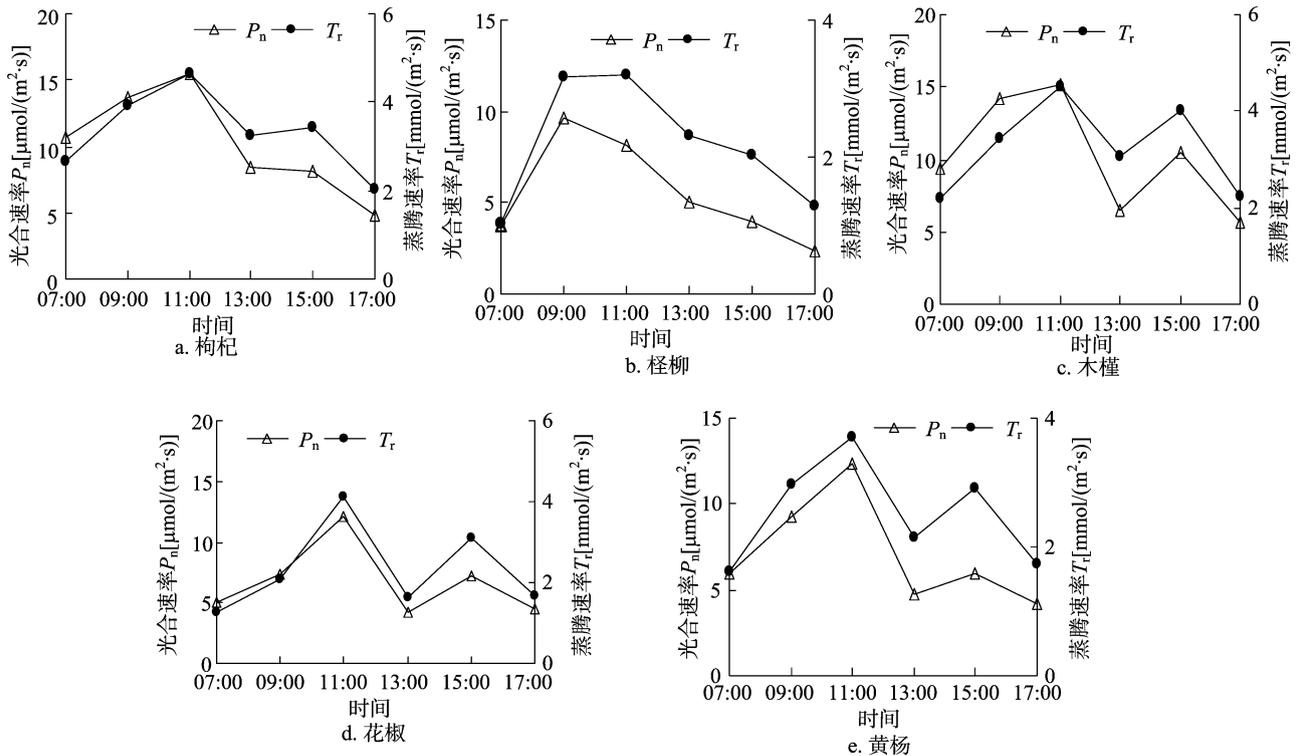


图4 不同树种光合速率和蒸腾速率日变化

2.2.2 水分利用效率 WUE 日变化 图 5 表明, 枸杞、柽柳、木槿、花椒 WUE 日变化是单谷型, 黄杨是双谷型; 木槿 WUE 谷值出现在 13:00, 枸杞、柽柳、花椒出现在 15:00, 黄杨出现在 09:00、15:00; 5 种树种均是 07:00 WUE 最高, 清晨 WUE 分别为木槿  $4.21 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ 、枸杞  $4.09 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ 、花椒  $3.95 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ 、柽柳  $3.78 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ 、黄杨  $3.78 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 木槿较柽柳、黄杨高 11%; 枸杞、柽柳、木槿、花椒随后一直降到谷值, 而后木槿在 13:00 后开始回升, 枸杞、柽柳、花椒在 15:00 之后有所回升; 黄杨在 09:00 到达第 1 个谷值, 为  $3.07 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 随后上升, 11:00 达到 1 个峰值后继续下降, 15:00 出现第 2 个谷值  $2.02 \mu\text{mol}/\text{mmol}$  后逐渐升高; WUE 日均值是木槿最高, 达  $3.18 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 枸杞、花椒、黄杨位于其次, 分别是  $3.06$ 、 $2.96$ 、 $2.80 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 最低的是柽柳, 只有  $2.58 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 为木槿的 81%。

2.2.3 季节变化 由表 2 可见, 7 月份 5 种树种  $P_n$ 、 $T_r$  均达到了高峰, 因为夏季是树种旺盛生长的时期, 所以其光合速率、蒸腾速率都达到了最大值; 木槿  $P_n$ 、 $T_r$  值均最高, 柽柳最低, 分别是木槿的 58%、68%; 枸杞、木槿、柽柳 WUE 出现 2

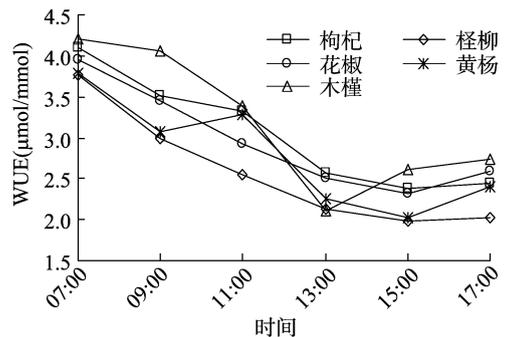


图5 不同树种水分利用效率日变化

次高峰, 分别是 6、10 月, 6、9 月, 7、10 月, 花椒和黄杨的 WUE 峰值与  $P_n$ 、 $T_r$  的峰值时间相同, 均在 7 月, 可见夏、秋季树种水分利用效率明显高于春季; 就整个生长季而言,  $P_n$  介于  $2.83 \sim 14.77 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 其中木槿  $P_n$  最高, 说明其光合能力最强, 柽柳最低, 木槿平均为柽柳的 1.85 倍, 而  $T_r$  为枸杞最大, 木槿、黄杨、花椒次之, 柽柳最低, 枸杞平均是柽柳的 1.53 倍; WUE 仍是木槿居于首位, 其次是枸杞、花椒、黄杨, 柽

表2 不同树种不同生长季节光合蒸腾特性

树种	月份	光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	蒸腾速率 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	水分利用效率 ( $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ )
枸杞	5	8.74	2.90	2.99
	6	12.45	3.98	3.10
	7	13.82	4.67	2.92
	8	11.71	4.01	2.87
	9	8.06	2.48	3.19
	10	6.43	1.96	3.27
桤柳	5	4.43	1.90	2.36
	6	6.28	2.50	2.51
	7	8.54	3.21	2.69
	8	6.93	2.64	2.59
	9	4.05	1.68	2.47
	10	2.83	1.09	2.83
木槿	5	8.80	2.88	3.07
	6	12.50	3.73	3.35
	7	14.77	4.72	3.20
	8	11.64	3.90	3.01
	9	8.05	2.39	3.37
	10	5.55	1.87	3.11
花椒	5	5.46	1.96	2.92
	6	7.92	2.67	2.97
	7	9.91	3.27	3.25
	8	7.93	2.69	3.09
	9	4.93	1.77	2.82
	10	4.16	1.54	2.69
黄杨	5	5.81	2.10	2.77
	6	8.63	2.90	2.92
	7	10.46	3.59	2.96
	8	8.46	2.92	2.89
	9	5.01	1.78	2.85
	10	4.19	1.80	2.41

柳处在末位,木槿平均为桤柳的1.23倍。WUE可以反映植物适应能力的强弱<sup>[12]</sup>,由此可见,木槿、枸杞的光合能力和适应能力高于花椒、黄杨、桤柳。

### 2.3 相关性分析

2.3.1 蒸腾速率  $T_r$  与气孔导度  $G_s$  树种蒸腾速率与气孔导度相关性见图6,可见5种灌木蒸腾速率与气孔导度  $G_s$  呈正相关,与宁虎森等对于旱沙区植物的研究结果相同<sup>[13]</sup>。木槿蒸腾速率与气孔导度相关性最显著, $r^2$ 为0.9363,说明木槿蒸腾耗水速率受气孔导度影响最大。枸杞蒸腾速率与气孔导度相关性不显著,只有0.7628,为木槿的81%。

2.3.2 蒸腾速率  $T_r$  与胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $C_i$  由图6可见,在水分充足的条件下,5种灌木蒸腾速率与胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $C_i$  呈指数关系。主要与植物为了避免水分的过度消耗对叶肉细胞光合活性降低,比如1,5-二磷酸核酮糖(RuBP)羧化酶活性的降低以及光、暗呼吸增强导致  $C_i$  增加的响应有关<sup>[14]</sup>。这与陈根云等关于  $P_n$ 、 $C_i$  关系的思考中提到的现象一致<sup>[15]</sup>。枸杞  $r^2$  最高,为0.7826;其次是花椒、木槿、黄杨,桤柳  $r^2$  最低,仅为0.5369。

### 3 讨论

在本研究中,树木耗水量均为7、8月最多,与李丽萍得出

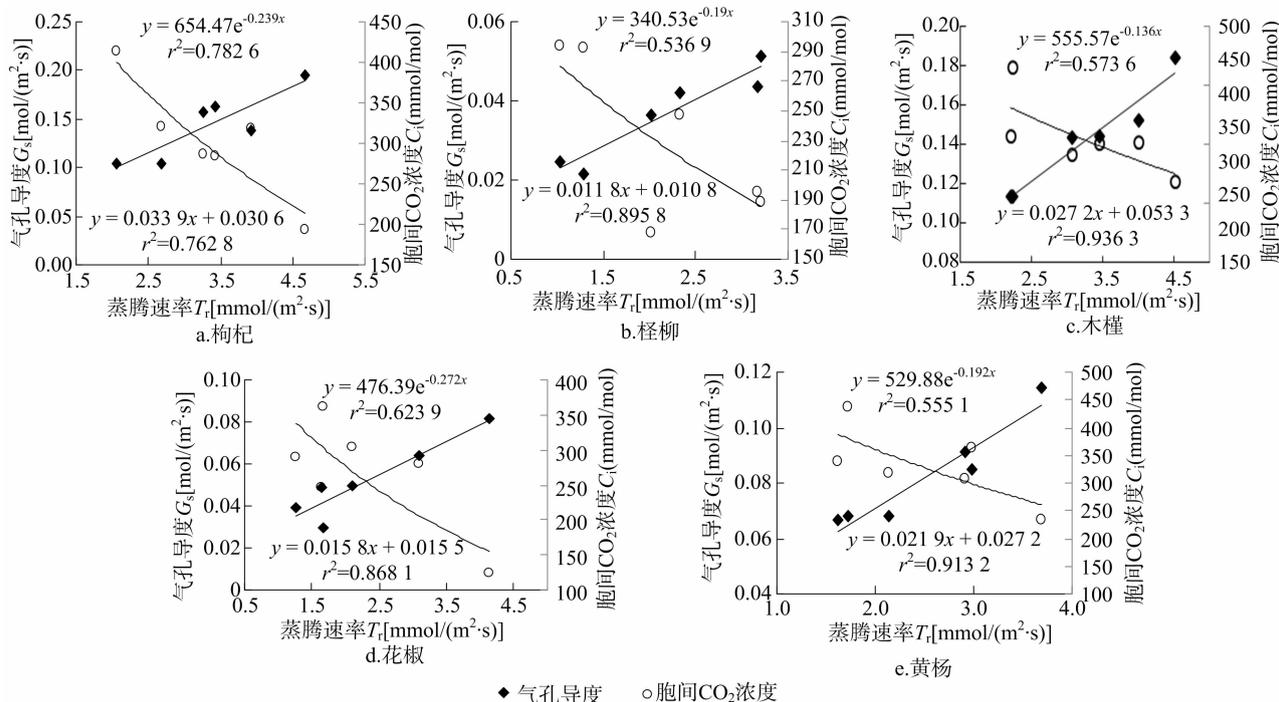
的黄杨是春秋耗水型的研究结果不同,李丽萍研究表明,黄杨日蒸腾耗水速率为0.038~0.078  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 、WUE为2.84~4.59  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ <sup>[16]</sup>,而本试验得出的黄杨耗水量[0.036~0.075  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ]、WUE(2.02~3.78  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ )偏小。黄杨  $P_n$  日变化呈双峰型,与陈洪国研究的结果<sup>[17]</sup>相同,但该研究的峰值出现在10:00、12:00,提前于本研究的11:00、15:00;该研究的  $T_r$  日变化黄杨为单峰曲线,峰值出现在12:00左右,与本试验得出的黄杨为双峰曲线,峰值在11:00、15:00有所不同,可能与树种的树龄以及试验时所处的气候带不同有关。所以还需要对树种的蒸腾耗水速率进行长期的观测研究,以便得出更完善的数据体系。5种灌木树种叶片蒸腾速率  $T_r$  与其叶片气孔导度  $G_s$  呈正相关关系,与王冉等对草原区植物的研究结果<sup>[12]</sup>相同,但与韩路等对灰胡杨的研究得出的  $T_r$  与  $G_s$  呈开口向下的二次曲线的结论<sup>[18]</sup>有所不同。产生差异的原因可能与不同植物对环境条件的适应能力不同相关。WUE是评价植物对环境适应能力的重要指标,环境条件一定的情况下,WUE越高,说明植物固定单位质量  $\text{CO}_2$  所消耗的水量越少,耐旱性越高<sup>[19]</sup>。本研究得出,木槿、枸杞耐旱性强于花椒、黄杨和桤柳。枸杞耗水量[0.089  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ]较木槿耗水量[0.083  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ]多,但枸杞的WUE(3.06  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ )比木槿(3.18  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ )低,因此枸杞需要消耗比木槿更多的水分来适应外界环境。在本研究中,叶片光合速率的降低归因于非气孔因素,主要受中午高温和强光照的影响,叶肉细胞同化能力下降,同时羧化酶活性降低,叶片光器官功能受到限制。因此植物通过降低光合速率来减少水分的散失,减轻或避免光的破坏来适应逆境条件。这一结论与薛雪等得出的结论一致<sup>[20-23]</sup>。蒸腾速率与胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $C_i$  呈指数负相关,同时王冉等也得出了相似的结论<sup>[12,24]</sup>,但与李琳等得出的结论<sup>[25]</sup>不同,为此陈根云等也提到过相同的现象<sup>[15]</sup>。因此,应当对其相关性的结果继续进行研究分析,以期得出本质结论。

### 4 结论

在水分充足条件下,5个树种表现出相似的规律,晴天蒸腾耗水量高于半晴天和阴天的耗水量,7、8月的耗水量最多。枸杞、木槿耗水量比黄杨、花椒和桤柳的多。枸杞、桤柳  $P_n$  日变化为单峰型,枸杞峰值出现在11:00,桤柳出现在09:00;木槿、花椒、黄杨为双峰型,峰值在11:00、15:00。桤柳  $T_r$  日变化为单峰型,峰值在11:00,枸杞、木槿、花椒、黄杨为双峰型,峰值在11:00、15:00。5种树种均是清晨水分利用效率最高,在WUE日变化方面,枸杞、桤柳、木槿、花椒是单谷型,黄杨是双谷型。木槿WUE谷值出现在13:00,枸杞、桤柳、花椒出现在15:00,黄杨出现在09:00、15:00。7月树木  $P_n$ 、 $T_r$  最大,枸杞、木槿、桤柳WUE分别在6、10月,6、9月,7、10月最高,花椒和黄杨在7月最高。木槿、枸杞的光合能力、控制水分能力和适应环境能力比花椒、黄杨和桤柳强。灌木蒸腾耗水速率与气孔导度呈正相关,与胞间  $\text{CO}_2$  浓度呈指数负相关,木槿受气孔导度影响最大,枸杞受胞间  $\text{CO}_2$  浓度影响最大。

### 参考文献:

[1] 郑西平,张启翔.北京城市园林绿化植物应用现状与展望[J].

图6 树种蒸腾速率与气孔导度和胞间 $CO_2$ 浓度相关性分析

中国园林,2011(5):81-85.

- [2] 黄锡釜. 水文学[M]. 北京:高等教育出版社,1985:51-52.
- [3] 李新宇,李延明,孙林,等. 银杏蒸腾耗水与环境因子的关系研究[J]. 北京林业大学学报,2014,36(4):23-29.
- [4] 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(3): 575-615.
- [5] Marc V, Robinson M. Application of the deuterium tracing method for the estimation of tree sap flow and stand transpiration of a beech forest (*Fagus sylvatica* L.) in a mountainous Mediterranean region [J]. Journal of Hydrology, 2004, 285(1): 248-259.
- [6] Cermák J, Kucera J, Nadezhdina N. Sap flow measurements with so thermo dynamic methods, flow integration with in trees and scaling up from sample trees to entire forest stands [J]. Trees, 2004, 18(5): 529-546.
- [7] 于占辉, 陈云明, 杜盛. 乔木蒸腾耗水量研究方法述评与展望 [J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 281-285.
- [8] Lundblad M, Lagergren F, Lindroth A. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce [J]. Annals of Forest Science, 2001, 58(6): 625-638.
- [9] Bernacchi C J, Long S P. Temperature response of mesophyll conductance. Implication for the determination of rubisco enzyme kinetics and for limitations to photosynthesis *in vivo* [J]. Plant Physiology, 2002, 130(4): 1992-1998.
- [10] 郭自春, 曾凡江, 刘波, 等. 灌溉量对2种灌木光合特性和水分利用效率的影响 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 448-455.
- [11] 张淑勇, 周泽福, 张光灿, 等. 半干旱黄土丘陵区4种天然次生灌木光合生理和水分利用特征 [J]. 林业科学, 2008, 44(12): 140-146.
- [12] 王冉, 李素英, 任丽娟, 等. 锡林浩特草原区27种植物净光合速率影响因素的多因子分析 [J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 272-278.

- [13] 宁虎森, 吉小敏, 孙慧瑛, 等. 干旱沙区4种植物的光合日变化及其影响因子 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(11): 113-120.
- [14] Xu D Q. Progress in photosynthesis research: from molecular mechanisms to green evolution [J]. Acta Photophysica Sinica, 2001, 22(2): 97-108.
- [15] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间 $CO_2$ 浓度关系的思考 [J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(1): 64-66.
- [16] 李丽萍. 北京市5种常用园林绿化植物的耗水特性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2007: 17-23.
- [17] 陈洪国. 四种常绿植物蒸腾速率、净光合速率的日变化及对环境的影响 [J]. 福建林业科技, 2006, 33(1): 76-79.
- [18] 韩路, 王海珍, 徐雅丽, 等. 灰胡杨蒸腾速率对气孔导度和水汽压差的响应 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(8): 193-197.
- [19] 张诚诚, 文佳, 曹志华, 等. 水分胁迫对油茶容器苗叶片解剖结构和光合特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 79-84.
- [20] 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.
- [21] 柯希欢, 李霞, 仲维功, 等. 栽插苗数对4个高产水稻品种冠层、生理指标和产量的影响 [J]. 江苏农业学报, 2016, 32(1): 16-26.
- [22] 林平, 李吉跃, 陈崇. 银杏光合生理生态特性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 22-29.
- [23] 孟力力, 张俊, 闻婧. 干旱胁迫对彩叶草光合特性及叶片超微结构的影响 [J]. 江苏农业学报, 2015, 31(1): 180-185.
- [24] Jin H, Plaha P, Park J Y, et al. Comparative EST profiles of leaf and root of *Leymus chinensis*, a xerophilous grass adapted to high pH sodic soil [J]. Plant Science, 2006, 170(6): 1081-1086.
- [25] 李琳, 袁方. 胞间二氧化碳对净光合速率的影响 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41(19): 8090-8091, 8162.