

5 种常见水土保持树种的气体交换特性研究

王海湘, 徐超, 温国胜*, 胡策, 朱丽娜, 梁谢恩, 黄皓南, 周哲宇

(浙江农林大学林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 为了了解水土保持树种的气体交换特性, 对无患子(*Sapindus mukorossi*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、秃瓣杜英(*Elaeocarpus glabripetalus*)和毛竹(*Phyllostachys edulis*)等常见树种的光合蒸腾特性进行研究。结果表明, 香樟、无患子、南酸枣和毛竹的净光合速率(Pn)日变化曲线呈双峰型, 有明显的“光合午休”现象; 秃瓣杜英的 Pn 日变化曲线则呈单峰型, 未出现“光合午休”现象。5 种树种的 Pn 以香樟 > 毛竹 > 无患子 > 南酸枣 > 秃瓣杜英; 蒸腾速率(Tr)以香樟 > 无患子 > 毛竹 > 南酸枣 > 秃瓣杜英; 水分利用效率(WUE)以秃瓣杜英 > 毛竹 > 南酸枣 > 无患子 > 香樟。单因素方差分析表明: 不同树种间的 Tr、气孔导度(Gs)和 WUE 存在显著差异, 而 Pn 和胞间 CO₂ 浓度(Ci)的差异不显著。相关性分析表明, Pn 与 Tr、Gs 和光合有效辐射(PAR)呈正相关关系; Tr 与 Gs 呈正相关关系, 与 WUE 呈负相关关系; Gs 与 WUE 呈负相关关系; Ci 与 PAR 和空气 CO₂ 浓度(Ta)呈负相关关系。香樟和无患子的 Tr 相对较大, 而 WUE 较低, 在养护过程应加强浇水及遮阴以降低其水分蒸腾的速率; 秃瓣杜英、南酸枣和毛竹的 Tr 相对较低, 而 WUE 相对较高, 能够科学地利用土壤水分, 可适应较干燥的外界环境。

关键词: 城市; 水土保持树种; 蒸腾速率; 光合作用; 气体交换

doi: 10.11926/jtsb.3747

Characteristics of Gas Exchange of Five Common Water and Soil Conservation Tree Species

WANG Hai-xiang, XU Chao, WEN Guo-sheng*, HU Ce, ZHU Li-na, LIANG Xie-en, HUANG Hao-nan, ZHOU Zhe-yu

(School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: In order to understand the gas exchange characters of water and soil conservation tree species, the photosynthetic and transpiration characters of five common urban forest tree species in Hanzhou, including *Sapindus mukorossi*, *Choerospondias axillaris*, *Cinnamomum camphora*, *Elaeocarpus glabripetalus* and *Phyllostachys edulis*, were studied. The results showed that the daily dynamic curve of photosynthetic rate (Pn) in *Cinnamomum camphora*, *S. mukorossi*, *Choerospondias axillaris* and *P. edulis* indicated bimodal type with obvious “noon break” phenomenon, while those in *E. glabripetalus* indicated single peak type without “noon break”. The Pn was in the order of *Cinnamomum camphora* > *P. edulis* > *S. mukorossi* > *Choerospondias axillaris* > *E. glabripetalus*, while the transpiration rate (Tr) showed *Cinnamomum camphora* > *S. mukorossi* > *P. edulis* > *Choerospondias axillaris* > *E. glabripetalus*, and the water use efficiency (WUE) was *E. glabripetalus* > *P. edulis* > *Choerospondias axillaris* > *S. mukorossi* > *Cinnamomum camphora*. Tr, Gs and WUE had significant

收稿日期: 2017-04-01

接受日期: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31270497); 浙江省与中国林业科学研究院省院合作项目(2014SY16); 浙江省大学生科技创新活动计划项目(2016R412045)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31270497), the Cooperative Project of Zhejiang Province and Chinese Academy of Forestry (Grant No. 2014SY16), and the Postgraduate Science and Technology Innovation Program of Zhejiang Province (Grant No. 2016R412045).

作者简介: 王海湘(1989~), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事水土保持研究。E-mail: hzuwhx@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wgs@zafu.edu.cn

differences ($P < 0.01$) among five tree species by ANOVA analysis, while Pn and Ci had not significant difference. Pearson correlation analysis showed that Pn had significant positive correlation with Tr, Gs, PAR, and did Tr with Gs. WUE had significant negative correlation with Tr, Gs, and did Ci with PAR and Ta. Therefore, *Cinnamomum camphora* and *S. mukorossi* had high Tr with low WUE, so it was better to strengthen water and shading for reduce Tr in conservation process. *P. edulis*, *Choerospondias axillaris* and *E. glabripetalus* had low Tr with high WUE, showing that they could scientifically use soil moisture and adapt to drought environment.

Key words: Water and soil conservation species; Transpiration rate; Photosynthesis; Gas exchange

城市森林是有生命的城市生态基础性设施,是城市居民游憩休闲的主要场所,其不仅在改善城市生态环境方面发挥着重要的作用,同时也满足了城市居民生态休闲游憩的需要^[1]。作为城市生态建设中最大且具有自净功能的生态系统^[2-3],城市森林在缓解气候变化、降低大气 CO₂ 浓度和净化区域空气质量等方面发挥着积极的作用^[4]。水土保持树种是城市森林的主要组成部分,其具有“吸收消化”功能,其利用植物的气孔及皮孔与外界环境进行气体交换,将大气污染物吸入植物体内,通过氧化还原作用将污染物降解,或将污染物通过植物根系排出体外,或将污染物积累贮藏于体内某器官中,使污染物最终被净化^[5]。水土保持森林通过植物的蒸腾作用和绿叶吸收、反射及遮挡太阳辐射等调节空气温度和湿度,进而调节区域的小气候环境^[6]。在改善城市生态环境和维护城市生态平衡等方面,具有不可替代的作用,是解决城市系列环境问题及提升城市生活品质极其重要的生态资源^[7-8]。

尽管大多数水土保持树种对改善城市生态环境都有一定的促进作用,但不同树种净化空气和改善区域环境的能力不同,如何选择合适的水土保持树种,对改善城市生态环境的意义较大。通过测定不同树种的气体交换特性,从叶片光合尺度到树木个体对外界环境变化响应机制进行研究,可以合理地选出净化空气和改善区域环境能力较强的树种。

光合作用与蒸腾作用是树木重要的生命活动,光合作用是树木生长和代谢的生理基础^[9],蒸腾作用耗水是树木散失水分的主要途径^[10],而水分利用效率则是树木水分消耗及利用的主要评价参数^[11],以上指标亦是探讨树木气体交换能力的重要参数。随着科技水平的提高,气体交换测定技术已成为树木生理生态特性研究及生态效益评价的重要手段,是了解城市森林树种固碳释氧及增湿降温等生态效益的首选技术^[12]。近年来,国内许多学者利用气

体交换测定技术开展了研究工作,张娜等^[13]利用气体交换测定技术研究了大连市 6 个园林树种的光合固碳及释氧特性;薛雪等^[14]通过测定 6 个上海常绿树种一年四季的光合蒸腾特性,研究各树种间气体交换的差异;赵文瑞等^[15]对南京城郊典型造林树种麻栎和杉木的光合蒸腾特性及气体交换能力进行研究,为杉木及麻栎林的合理经营和生态环境效益评价提供科学的基础数据。而主要针对杭州市常见城市水土保持林气体交换特性的研究还不够完善。本研究选用 5 种杭州市常见水土保持树种,通过分析光合与蒸腾特征及其与环境因子间的关系,研究常见水土保持树种的气体交换特性,探讨其对城市生态环境的适应性及布局的合理性,并对其生态功能做出评价,为改善城市空气质量和水土保持树种的筛选及养护提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

本试验在浙江省杭州市城西科创大走廊西端的浙江农林大学植物园树木生理生态定位监测样地内进行,地理位置为 30°15' N, 119°43' E。当地雨水充足,四季分明,冬季湿冷,夏季酷热,年均降雨量 1625 mm,全年日照时数约 1919 h,年均气温约为 15.9℃,属于亚热带季风气候。试验土壤为红黄壤,土壤含水率为(24±0.2)%,土壤 pH 呈偏弱酸性。

1.2 试验材料

试验材料为 5 种生长在同一样地的常见水土保持树种,分别为无患子(*Sapindus mukorossi*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、秃瓣杜英(*Elaeocarpus glabripetalus*)和毛竹(*Phyllostachys edulis*)等。样株的生长环境一致,未受虫害,生长健康,叶龄基本一致。试验前期选

择晴朗天气, 利用瑞士徕卡 D810 手持激光测距仪和卷尺对试验区试验材料的树高、胸径、冠幅和枝下高等基本性质进行测定(表 1)。

1.3 方法

选择 2016 年 7 月 26–28 日典型的夏季晴朗天气, 从上午 8:00 到傍晚 18:00, 每 2 h 测定一次数据。在试验样地内随机对每种树随机选 3 株, 随机选取每株树冠层中上部向阳且发育健康完好的 6 片叶片进行测定。使用 Li-6400TX 便捷式光合测定系统的标准叶室在线测定气体交换指标, 同时保证标准叶

室内的温度、相对湿度、CO₂ 浓度和内置光源设置等参数与试验时段的自然条件相同, 并保证在同一时段测定每种树的叶室条件一致。测定的气体交换指标包括净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)和胞间 CO₂ 浓度(Ci)等; 同时利用 Kestrel 4500 手持气象站和 Li-6400 TX 便捷式光合测定系统等仪器测定空气湿度(RH)、气温(Ta)、光合有效辐射(PAR)、空气 CO₂ 浓度(Ca)等参数, 并计算出水分利用效率(WUE=Pn/Tr)和气孔限制值(La=1-Ci/Ca)^[16]。测定时间每个时间段每片叶重复测定 5 次, 取平均值。

表 1 5 种植物的基本特征

Table 1 Characters of 5 tree species

植物 Species	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)	枝下高 Height under branch (m)	冠幅 Crown width (m)	树冠疏失度 Crown loss (%)
无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	18.43 ± 1.0	7.84 ± 1.2	3.49 ± 0.8	8.73 ± 1.1	5~10
南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	17.86 ± 1.4	10.35 ± 1.3	2.36 ± 0.4	5.03 ± 2.0	10~15
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	22.86 ± 1.3	7.14 ± 1.2	2.50 ± 0.5	6.60 ± 1.9	5~10
秃瓣杜英 <i>Elaeocarpus glabripetalus</i>	23.07 ± 0.8	6.55 ± 0.7	2.35 ± 0.5	5.76 ± 2.2	5~10
毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	11.06 ± 1.2	13.30 ± 1.5	9.22 ± 0.8	4.10 ± 1.8	10~15

n=5

1.4 数据统计

使用 Microsoft Excel 2007 处理数据, 利用 SPASS 19.0 软件对 5 种树种的气体交换指标做双变量分析和单因素分析, 采用 Sigma Plot 12.0 绘图。

2 结果和分析

2.1 环境因子的日变化动态

从图 1 可知, 光合有效辐射(PAR)和空气温度(Ta)的日变化曲线呈“单峰型”, 而空气相对湿度(RH)和大气 CO₂ 浓度(Ca)的日变化曲线则呈“V 型”。PAR 约在 14:00 达到最大值, 约为 1650.45 μmol m⁻²s⁻¹, 随后减弱。随着光合有效辐射逐渐增加, Ta 由 08:00 的 27.9℃ 上升到 14:00 的 36.0℃, 随后也逐渐降低, 日均温为 32.81℃。RH 受 PAR 和 Ta 的影响, 从上午 08:00 的最大值 67.41% 逐渐下降到 14:00 的 39.56%, 随后逐渐升高。大气 CO₂ 浓度的变化与植物的光合作用密切联系, 由于夜间的连续“聚集”, Ca 在清晨达到较高值, 随着光合作用不断加强, 树木通过光合作用不断将空气中 CO₂ 吸入体内, 同时释放 O₂, 导致空气中 CO₂ 浓度在 14:00 达到当日最低, 随后逐渐升高。

2.2 树种的气体交换参数的日变化动态

光合速率(Pn) 在试验期, 5 种常见水土保持树种的 Pn 日变化曲线不同, 从图 2 可见, 香樟、无患子和毛竹的呈双峰型曲线, 而南酸枣和秃瓣杜英呈单峰型曲线。香樟和毛竹的 Pn 峰值出现在 10:00 和 16:00, 无患子的出现在 10:00 和 14:00, 而秃瓣杜英和南酸枣的 Pn 峰值分别出现在 12:00 和 16:00。无患子约在 12:00 最先出现低谷, 无患子、毛竹和南酸枣约在 14:00 出现低谷, 即“光合午休”现象, 而秃瓣杜英始终未出现低谷, 即没有“光合午休现象”, 这与刘欣欣等^[17]的研究结果一致。5 种常见水土保持树种的光合速率最高值排序为: 香樟 > 无患子 > 毛竹 > 秃瓣杜英 > 南酸枣。5 个试验树种的光合速率日均值(μmol m⁻²s⁻¹)依次为香樟(7.11 ± 4.56) > 毛竹(6.89 ± 3.71) > 无患子(6.61 ± 4.4) > 南酸枣(4.13 ± 2.14) > 秃瓣杜英(3.43 ± 1.23)。

蒸腾速率(Tr) 无患子和南酸枣的 Tr 日变化曲线呈双峰曲线, 而香樟、秃瓣杜英和毛竹的呈单峰型(图 2)。5 种树种 Tr 峰值出现时间存在差异。香樟、秃瓣杜英和毛竹的峰值出现在 12:00, 而无患子和南酸枣分别在 12:00 和 14:00 到达第 1 个低谷后, 又分别在 14:00 和 16:00 达到第 2 个峰值,

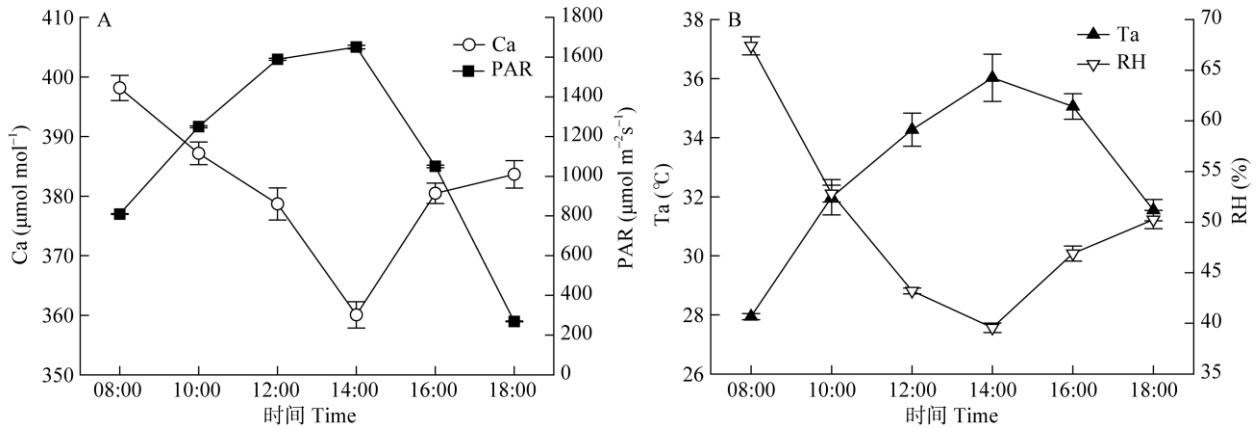


图 1 主要环境因子的日变化曲线。Ca: 大气 CO₂浓度; PAR: 光合有效辐射; Ta: 大气温度; RH: 相对湿度。

Fig. 1 Daily dynamic curves of Ca, PAR, Ta and RH. Ca: Atmosphere CO₂ concentration; PAR: Photosynthetically active radiation; Ta: Atmosphere temperature; RH: Relative humidity.

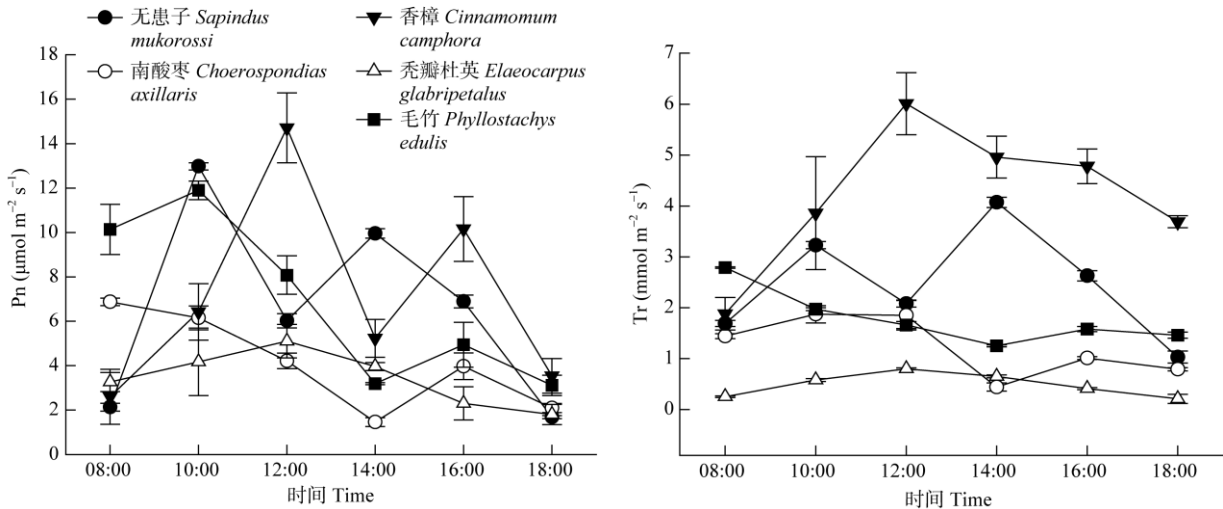


图 2 净光合速率(Pn)和蒸腾速率(Tr)的日变化曲线

Fig. 2 Daily changes in net photosynthetic rate (Pn) and transpiration rate (Tr)

这表明香樟、秃瓣杜英和毛竹的水分生理调节较弱。香樟、南酸枣和秃瓣杜英的主峰出现在中午，无患子和毛竹的第 2 个峰值在下午。5 种树种的 Tr 的最高峰值依次为香樟>无患子>南酸枣>毛竹>秃瓣杜英，而其日均值(μmol m⁻²s⁻¹)依次为香樟(4.2±1.41)>无患子(2.46±1.1)>毛竹(1.79±0.55)>南酸枣(1.23±0.58)>秃瓣杜英(0.48±0.23)。

气孔导度(Gs) 5 种树种的 Gs 日变化曲线均为单峰型，香樟和秃瓣杜英在 12:00 最先出现峰值，无患子在 14:00 出现峰值，而毛竹则在 16:00 才出现峰值(图 3)。5 种树种的 Gs 峰值以无患子>香樟>毛竹>秃瓣杜英>南酸枣，而其 Gs 日均值(mm³ m⁻²s⁻¹)为香樟(0.09±0.04)>无患子(0.08±0.04)>毛竹

(0.07±0.03)>南酸枣(0.04±0.02)>秃瓣杜英(0.02±0.01)。

胞间 CO₂浓度(Ci) 香樟和毛竹的 Ci 分别在 10:00 和 14:00 达到峰值，其中香樟分别在 12:00 和 16:00 出现两次谷值，毛竹仅在 14:00 出现谷值；而秃瓣杜英、南酸枣和无患子则分别在 12:00、14:00 和 16:00 到达谷底(图 3)。5 种树种的 Ci 谷值以毛竹>秃瓣杜英>香樟>南酸枣>无患子，而其日均值(μmol mol⁻¹)为香樟(232.47±67.07)>毛竹(231.64±18.77)>秃瓣杜英(202.08±56.12)>无患子(195.04±67.61)>南酸枣(183.02±72.96)。

水分利用效率(WUE) 5 种树种的 WUE 日变化曲线规律不明显，毛竹、无患子和香樟的 WUE

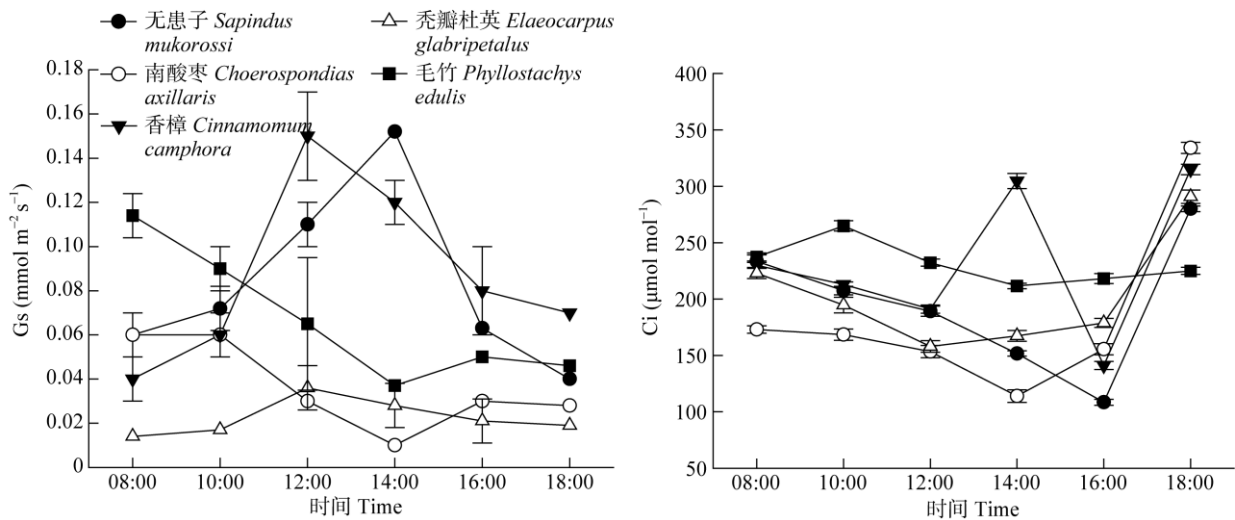


图 3 气孔导度(Gs)和胞间 CO_2 浓度(Ci)的日变化曲线

Fig. 3 Daily change curves in stomatal conductance (Gs) and intercellular CO_2 concentration (Ci)

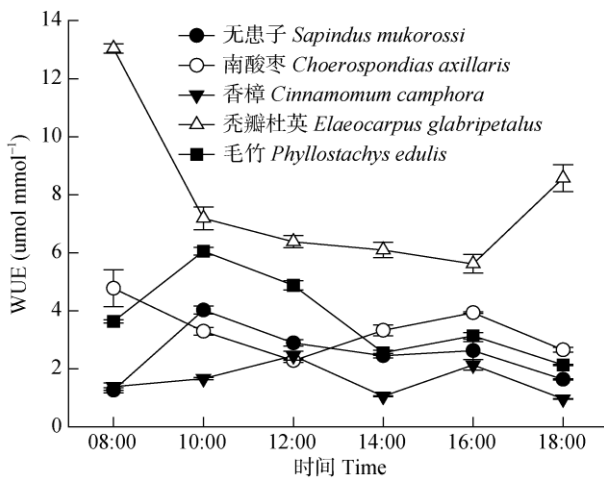


图 4 不同树种的水分利用效率日变化曲线

Fig. 4 Diurnal variations of water using efficiency of different species

日变化曲线呈双峰型, 南酸枣的呈单峰曲线, 而秃瓣杜英的呈 U 型(图 4), 且秃瓣杜英的 WUE 均比其他 4

种树种的高, 以秃瓣杜英 > 毛竹 > 无患子 > 南酸枣 > 香樟。5 种树种的 WUE 日变化均值($\mu\text{mol mmol}^{-1}$) 依次为: 秃瓣杜英(7.81 ± 2.76) > 毛竹(3.73 ± 1.48) > 南酸枣(3.37 ± 0.89) > 无患子(2.48 ± 0.98) > 香樟(1.61 ± 0.6)。

2.3 气体交换参数的方差分析

单因素方差分析表明, 5 种常见水土保持树种间的 Tr、Gs 和 WUE 差异极显著($P < 0.01$); Pn 和 Ci 的差异不显著($P > 0.05$)(表 2)。

2.4 气体交换参数与环境因子的相关性

相关性分析表明(表 3), Pn 与 Tr、Gs 及 PAR 呈显著正相关关系; Tr 与 Gs 呈显著正相关关系, 与 WUE 呈显著负相关关系; Gs 与 WUE 呈显著负相关关系; Ci 与 PAR 及 Ta 呈显著负相关关系; PAR 与 Ta 呈显著正相关关系, 与 Ca 及 RH 呈显著负相关关系; Ca 与 RH 呈显著正相关关系, 与 Ta 呈显

表 2 5 种树种气体交换参数的日平均值

Table 2 Daily average of gas exchange parameters in 5 species

树种 Species	Pn ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Tr ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Gs ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Ci ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	WUE ($\mu\text{mol mmol}^{-1}$)
无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	$6.61 \pm 1.80\text{a}$	$2.46 \pm 0.45\text{b}$	$0.08 \pm 0.020\text{a}$	$195.04 \pm 24.69\text{a}$	$2.48 \pm 0.4\text{bc}$
南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	$4.13 \pm 0.87\text{a}$	$1.23 \pm 0.24\text{cd}$	$0.04 \pm 0.008\text{bc}$	$183.02 \pm 31.39\text{a}$	$3.37 \pm 0.37\text{bc}$
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	$7.11 \pm 1.86\text{a}$	$4.20 \pm 0.58\text{a}$	$0.09 \pm 0.017\text{a}$	$232.47 \pm 27.38\text{a}$	$1.61 \pm 0.24\text{c}$
秃瓣杜英 <i>Elaeocarpus glabripetalus</i>	$3.43 \pm 0.50\text{a}$	$0.48 \pm 0.09\text{d}$	$0.02 \pm 0.004\text{c}$	$202.08 \pm 20.06\text{a}$	$7.81 \pm 1.13\text{a}$
毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	$6.89 \pm 1.52\text{a}$	$1.79 \pm 0.22\text{c}$	$0.07 \pm 0.01\text{ab}$	$231.64 \pm 7.66\text{a}$	$3.73 \pm 0.61\text{b}$

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。Pn: 净光合速率; Tr: 蒸腾速率; Gs: 气孔导度; Ci: 胞间 CO_2 浓度; WUE: 水分利用效率。

Data followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level. Pn: Net photosynthetic rate; Tr: Transpiration rate; Gs: Stomatal conductance; Ci: Intercellular CO_2 concentration; WUE: Water use efficiency.

表 3 气体交换参数与环境因子的相关性

Table 3 Correlation between gas exchange indexes and environmental factors

	Pn ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Tr ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Gs ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Ci ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Ca ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	RH (%)	Ta ($^{\circ}\text{C}$)
Tr	0.690**							
Gs	0.747**	0.831**						
Ci	-0.191	0.016	0.051					
PAR	0.374*	0.237	0.303	-0.556**				
Ca	0.046	-0.129	-0.143	0.226	-0.583**			
RH	-0.046	-0.156	-0.139	0.238	-0.544**	0.905**		
Ta	0.089	0.171	0.127	-0.392*	0.617**	-0.888**	-0.958**	
WUE	-0.072	-0.543**	-0.414*	-0.051	-0.011	0.198	0.204	-0.187

** $: P < 0.01$; * $: P < 0.05$. Pn: 净光合速率; Tr: 蒸腾速率; Gs: 气孔导度; Ci: 胞间 CO_2 浓度; PAR: 光合有效辐射; Ca: 大气 CO_2 浓度; RH: 相对湿度; Ta: 空气温度。

** $: P < 0.01$; * $: P < 0.05$. Pn: Net photosynthetic rate; Tr: Transpiration rate; Gs: Stomatal conductance; Ci: Intercellular CO_2 concentration; PAR: Photosynthetically active radiation; Ca: Atmosphere CO_2 concentration; RH: Relative humidity; Ta: Air temperature.

著负相关关系; RH 与 Ta 呈显著负相关关系。

3 讨论和结论

光合作用是非常复杂的内部生理过程, Pn 经常作为评价内因与外因对光合作用影响程度的指标^[18], Pn 越高说明树木与外界交换的 O_2 和 CO_2 越多, 可以把更多的太阳能转化为有机质储存在树木体内, Pn 值的大小反映了树木固碳释氧能力的强弱^[13]。由于本试验在夏季开展, 夏季的高温胁迫, 容易导致树木的光合和呼吸作用失衡和“光合午休”现象, 进而减弱树木的光合能力。本研究结果表明, Pn 日均值为香樟>毛竹>无患子>南酸枣>秃瓣杜英, 可见香樟的固碳释氧能力较强, 秃瓣杜英较弱。5 种树种的 Gs 与 Pn 呈正相关关系, 这与黄滔等^[18]的研究结果一致, 可能是树木通过气孔进行气体交换作用, 气孔的张开与关闭直接影响着树木的光合和蒸腾等生理过程。影响 Pn 降低的因素有非气孔因素(即叶片光合作用能力降低的影响)和气孔因素(即受气孔导度降低的影响)^[19]。通过对比 Ls 和 Ci 的变化特点可以判断树木叶片光合速率下降的原因是非气孔因子限制还是气孔因子限制^[20]。本研究表明, 香樟、无患子和毛竹等树种的 Ci 高且 Ls 低, 因此, 造成“光合午休”现象的主要原因是非气孔因素, 换言之, 受中午时段强光和高温等影响, 叶片的光合器官功能易受损, 叶肉细胞的同化水平降低, 酶的活性减弱, 羧化功能明显下降。

蒸腾作用是促进树木吸收矿物离子和水分的主要动力, 在一定程度上反映了树木适应逆境水分

平衡的调节能力^[21]。蒸腾作用午间降低呈双峰型曲线是早生和中生树种利用关闭气孔来适应午间高温和防止叶片蒸腾失水过量的一种科学的生态适应对策^[22], 这与本研究的 Tr 与 PAR、Ci 和 Gs 呈正相关关系的结果一致。午间高温树木蒸腾失水快, 对高温较敏感及有一定适应能力的树种通过自我调节降低 Pn、Ci 和 Gs 等, 使 WUE 和 CO_2 同化水平下降, 因而产生“光合午休”现象。香樟和无患子等均出现“光合午休”现象, 其 Tr 相对较大, 而 WUE 较低, 建议在养护过程中加强浇水及遮阴等措施降低其水分蒸腾的速率; 秃瓣杜英、南酸枣和毛竹的 Tr 相对较低, 而 WUE 相对较高, 能够科学地利用土壤水分, 可适应较干燥的外界环境。

相关性分析表明, 5 种树种的 Tr、Gs 和 PAR 是 Pn 的主要影响因子; Gs 与 WUE 是 Tr 的主要影响因子。因此, 影响树种光合速率和蒸腾速率的主要因子是树种自身的生理生态特征, 这与张娜等^[13]的研究结果一致。

综上所述, 本研究中的 5 种常见水土保持树种, 香樟、毛竹和无患子的抗高温及强光能力比南酸枣和秃瓣杜英强。秃瓣杜英和南酸枣的蒸腾速率较小, 日均光合速率较低, 秃瓣杜英水分利用效率较高, 南酸枣较低, 建议养护中适当采取遮光措施减弱光抑制; 香樟的蒸腾速率最大, 水分利用效率最低, 在高温及强光天气需要消耗更多的水分才能适应外界环境, 建议在水土保持树种养护中加强灌溉及遮荫以便降低其蒸腾失水; 毛竹、无患子、南酸枣和秃瓣杜英对环境因子的响应比较敏感。其中, 南酸枣和秃瓣杜英能够更有效地利用土壤中的水

分, 适应干旱环境。因此, 在水土保持树种的筛选工作中, 处于干旱环境的城市可根据自身特点选择耐旱性强的树种; 当然, 若所选用的树种耐旱性不强, 那么在树种的养护过程中应该选择科学的养护和管理方法。

参考文献

- [1] WANG C, GUO E G, QIE G F. Variations of PM_{2.5} in typical recreation forests in the west mountain of Beijing, China [J]. Acta Ecol Sin, 2014, 34(19): 5650–5658. doi: 10.5846/stxb201301180115.
王成, 郭二果, 郗光发. 北京西山典型城市森林内 PM_{2.5} 动态变化规律 [J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5650–5658. doi: 10.5846/stxb201301180115.
- [2] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution [J]. Environ Pollut, 1998, 99(3): 347–360. doi: 10.1016/S0269-7491(98)00016-5.
- [3] FOWLER D, CAPE J N, UNSWORTH M H, et al. Deposition of atmospheric pollutants on forests [J]. Philosoph Transact Royal Soc B Biol Sci, 1989, 324(1223): 247–265. doi: 10.1098/rstb.1989.0047
- [4] ZHOU J, XIAO R B, ZHUANG C W, et al. Urban forest carbon sink and its estimation methods: A review [J]. Chin J Ecol, 2013, 32(12): 3368–3377.
周健, 肖荣波, 庄长伟, 等. 城市森林碳汇及其核算方法研究进展 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3368–3377.
- [5] HUANG H Y, ZHANG Y B, ZHANG C X. Study on the absorbing and cleaning gaseous pollutants by woody-plants [J]. Acta Ecol Sin, 1981, 1(4): 335–344.
黄会一, 张友标, 张春兴. 木本植物对大气气态污染物吸收净化作用的研究 [J]. 生态学报, 1981, 1(4): 335–344.
- [6] WANG X L, WANG C. Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter [J]. Acta Ecol Sin, 2014, 34(8): 1910–1921. doi: 10.5846/stxb201305301239.
王晓磊, 王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展 [J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1910–1921. doi: 10.5846/stxb201305301239.
- [7] GAFFIN S R, ROSENZWEIG G, KONG A Y Y. Adapting to climate change through urban green infrastructure [J]. Nat Climate Change, 2012, 2(10): 704. doi: 10.1038/nclimate1685.
- [8] KONIJNENDIJK C C, RICARD R M, KENNEY A, et al. Defining urban forestry: A comparative perspective of North America and Europe [J]. Urb For Urb Green, 2006, 4(3/4): 93–103. doi: 10.1016/j.ufug.2005.11.003.
- [9] HAN Z M, WANG Y H, LIN H M, et al. Photosynthetic characteristics of *Saposhnikovia divaricata* in different habitats in summer [J]. Acta Ecol Sin, 2014, 34(17): 4874–4881. doi: 10.5846/stxb201208081122.
韩忠明, 王云贺, 林红梅, 等. 吉林不同生境防风夏季光合特性 [J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4874–4881. doi: 10.5846/stxb201208081122.
- [10] WEN G S, ZHANG M R, ZHANG G S, et al. Ecophysiological strategy of *Sabina vulgaris* under drought stress [J]. Acta Ecol Sin, 2006, 26(12): 4059–4065. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.12.019.
温国胜, 张明如, 张国盛, 等. 干旱条件下臭柏的生理生态对策 [J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4059–4065. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.12.019.
- [11] ZHANG Y L, FEI S M, LI Z Y, et al. Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu [J]. Acta Ecol Sin, 2013, 33(12): 3878–3887. doi: 10.5846/stxb201205080672.
张艳丽, 费世民, 李智勇, 等. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益 [J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3878–3887. doi: 10.5846/stxb201205080672.
- [12] CHEN J, SHI H W, LIAO J X, et al. Studies on the characteristics of photosynthesis and transpiration of 49 garden species in spring in Wuhan City, China [J]. J Henan Univ (Nat Sci), 2013, 43(1): 62–68. doi: 10.3969/j.issn.1003-4978.2013.01.012.
陈娟, 史红文, 廖建雄, 等. 武汉市春季 49 种园林植物的光合和蒸腾特性研究 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 2013, 43(1): 62–68. doi: 10.3969/j.issn.1003-4978.2013.01.012.
- [13] ZHANG N, ZHANG W, CHEN W, et al. Carbon sequestration and oxygen release capabilities of six garden tree species in Dalian [J]. Chin J Ecol, 2015, 34(10): 2742–2748.
张娜, 张巍, 陈玮, 等. 大连市 6 种园林树种的光合固碳释氧特性 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2742–2748.
- [14] XUE X, ZHANG J C, SUN Y T, et al. Study of carbon sequestration & oxygen release and cooling & humidifying effect of main greening tree species in Shanghai [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2016, 40(3): 81–86. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.03.014.
薛雪, 张金池, 孙永涛, 等. 上海常绿树种固碳释氧和降温增湿效益研究 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 81–86. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.03.014.
- [15] ZHAO W R, LIU X, ZHANG J C, et al. Photosynthesis transpiration, the carbon fixation and oxygen release, and the cooling and humidific capacity of typical tree species in Nanjing Suburban [J]. Sci Silv Sin, 2016, 52(9): 31–38. doi: 10.11707/j.1001-7488.20160904.
赵文瑞, 刘鑫, 张金池, 等. 南京城郊典型树种光合蒸腾、固碳释氧及降温增湿能力 [J]. 林业科学, 2016, 52(9): 31–38. doi: 10.11707/j.1001-7488.20160904.
- [16] YANG Y N, PAN Y Z, QI Y C, et al. Effect of shading on physiological

- and ecological characteristics of *Osmanthus fragrans* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2017, 25(1): 57–64. doi: 10.11926/jtsb.3634.
- 杨亚男, 潘远智, 齐豫川, 等. 遮阴对四季桂生理生态特性的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(1): 57–64. doi: 10.11926/jtsb.3634.
- [17] LIU X X, ZHANG M R, WEN G S, et al. Photosynthetic characteristics for fifteen potted seedlings common to Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang Agri For Univ*, 2012, 29(2): 173–179. doi: 10.3969/j.issn.2095-0756.2012.02.004.
- 刘欣欣, 张明如, 温国胜, 等. 浙江省常见 15 个树种的光合特性 [J]. *浙江农林大学学报*, 2012, 29(2): 173–179. doi: 10.3969/j.issn.2095-0756.2012.02.004.
- [18] HUANG T, TANG H, LIAO J Y, et al. Photosynthesis and transpiration characteristics of *Changiosyrax raxdolichocarpa* and their relations with environmental factors [J]. *J CS Univ For Technol*, 2015, 35(7): 62–68. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.07.012.
- 黄滔, 唐红, 廖菊阳, 等. 长果安息香夏季光合蒸腾日变化与其环境因子的关系 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(7): 62–68. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.07.012.
- [19] XIN F M, YANG X L, ZHAO K T, et al. Effect of drought stress on characteristics of water consumption and photosynthesis for main arbor species in semi-arid valley of Lhasa [J]. *J Zhejiang Univ (Agric Life Sci)*, 2016, 42(2): 199–208.
- 幸福梅, 杨小林, 赵垦田, 等. 干旱胁迫对拉萨半干旱河谷主要乔木树种幼树耗水及光合特性的影响 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2016, 42(2): 199–208.
- [20] GULIPIYA WUMAIER, ÜMÜT HALIK, MAIERDANG KEYIMU, et al. Study on gas exchange characteristics of six urban tree species in Aksu City [J]. *J Xinjiang Univ (Nat Sci)*, 2016, 33(3): 343–349. doi: 10.13568/j.cnki.651094.2016.03.017.
- 古力比亚 乌买尔, 玉米提 哈力克, 买尔当 克依木, 等. 阿克苏市 6 种园林乔木气体交换特性研究 [J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(3): 343–349. doi: 10.13568/j.cnki.651094.2016.03.017.
- [21] ZHANG S Y, ZHOU Z F, ZHANG G C, et al. Characteristics of photosynthesis, respiration and water utility of four tree species of natural secondary shrubs in a semi-arid loess hilly-gully region [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, 44(12): 140–146. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2008.12.025.
- 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. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2008.12.025.
- [22] ZHANG S Y, ZHOU Z F, ZHANG G C, et al. Changes of gas exchange parameters in leave of natural secondary shrubs *Prunus davidiana* and *Prunus sibirica* L. in semi-arid loess hilly region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(1): 499–507. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.01.059.
- 张淑勇, 周泽福, 张光灿, 等. 半干旱黄土丘陵区天然次生灌木山桃(*Prunus davidiana*)与山杏(*Prunus sibirica* L.)叶片气体交换参数日动态差异 [J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 499–507. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.01.059.