



余斐, 华雷, 李吉跃, 等. 干旱胁迫对3种桉树苗木耗水特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(6): 98-103.

干旱胁迫对3种桉树苗木耗水特性的影响

余斐¹, 华雷², 李吉跃¹, 何茜¹, 苏艳¹

(1 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642;

2 中国科学院 华南植物园, 广东 广州 510650)

摘要:【目的】评价3种桉树 *Eucalyptus* 在不同土壤水分条件下的耗水特征及能力差异, 为苗木高效定向培育打下基础. 【方法】以2种尾巨桉 *E. urophylla* × *E. grandis* 无性系(DH33-27和DH32-29)和巨桉 *E. grandis* 无性系(H1)为对象, 在不同土壤体积含水量情况下, 通过盆栽试验测定3种苗木的耗水量和耗水速率, 利用Li-6400便携式光合作用分析系统测定相应时期各苗木的水分利用效率(WUE). 【结果和结论】结果表明, 在水分充足条件下, 尾巨桉DH33-27具有较高的耗水量[(162.56 ± 8.71) g · 株⁻¹], 但受到干旱胁迫时, 其耗水量大幅下降, 严重干旱胁迫时期, 耗水量降至(10.83 ± 1.01) g · 株⁻¹, 为3个品系中最低; 耗水速率与耗水量的变化趋势相近, 表现为在水分充足条件下, 尾巨桉2种无性系具有较高的耗水速率, 当受到干旱胁迫时, 耗水速率大幅下降, 此时巨桉H1的白天平均耗水速率仍保持较高的水平. 不同时期, 3种桉树品系的耗水速率日变化均呈“单峰”曲线变化, 水分利用效率由大到小依次为: 尾巨桉DH33-27 > 尾巨桉DH32-29 > 巨桉H1. 综上所述, 相比尾巨桉DH33-29和巨桉H1, 尾巨桉DH33-27是高水分利用效率的品系, 不仅适宜在水分条件好的地区大面积推广, 也适宜在水分严重亏缺的地区种植.

关键词: 桉树; 耗水特性; 水分利用效率; 干旱胁迫

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2015)06-0098-06

Effects of drought stress on water consumption characteristics of three *Eucalyptus* seedlings

YU Fei¹, HUA Lei², LI Jiyue¹, HE Qian¹, SU Yan¹

(1 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract:【Objective】The water consumption characteristics and their differences were estimated under different soil water conditions to provide a guidance for culturing effectively seedlings. 【Method】The diurnal variation of water consumption (WC) and water consumption rate (WCR) of two kinds of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* (DH33-27 and DH32-29) and *E. grandis* (H1) clonal seedlings in different soil moisture contents were measured using pot experiment, and the water use efficiency (WUE) was measured using Li-6400 portable photosynthesis analysis system, respectively. 【Result and conclusion】The results showed that *E. urophylla* × *E. grandis* DH33-27 seedlings had the highest WC, (162.56 ± 8.71) g · plant⁻¹, among these three *Eucalyptus* seedlings. When subjected to serious drought, its WC value decreased to (10.83 ± 1.01) g · plant⁻¹ which was the lowest. The similar variation trends of the WCR and WC were found: Two *E. urophylla* × *E. grandis* seedlings had high value under sufficient

收稿日期: 2014-11-20 优先出版时间: 2015-10-16

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20151016.1630.030.html>

作者简介: 余斐(1991—), 女, 硕士研究生, E-mail: fishing_ok@163.com; 通信作者: 何茜(1981—), 女, 副教授, 博士, E-mail: heqian69@126.com

基金项目: 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室开放课题“桉树水分利用效率及影响因子研究”(KSL-CUSAb-2012-07)

moisture and then decreased sharply under drought stress, but the average WCR of *E. grandis* still remained high. The diurnal change of WCR of these three *Eucalyptus* seedlings all followed the curve with one peak in different periods. The order of WUE of these three *Eucalyptus* seedlings was as follows: *E. urophylla* × *E. grandis* DH33-27 > *E. urophylla* × *E. grandis* DH32-29 > *E. grandis*. In conclusion, compared with *E. urophylla* × *E. grandis* DH32-29 and *E. grandis*, *E. urophylla* × *E. grandis* DH33-27 has higher photosynthesis and WUE, which is recommended to plant widely in both humid and arid regions.

Key words: *Eucalyptus*; water consumption characteristic; water use efficiency; drought stress

桉树 *Eucalyptus* spp. 是桃金娘科 Myrtaceae 桉属的总称. 因其耐干旱瘠薄、适应性广、速生高产等特点,被联合国粮农组织推荐为三大速生造林树种之一^[1],同时也是理想的生物原料^[2]. 桉树人工林的生态退化,破坏了区域水分平衡^[3,4],需大量施肥来维持桉树人工林高产^[5]. 但于福科等^[6]认为桉树人工林生产力下降实际上是林地土壤质量退化和生物多样性减弱的后续效应与必然结果,桉树耗水对于生态环境的影响仍存在争议. 树木蒸腾耗水的测量方法经过了3个阶段^[7]. 早期主要是快速称质量法. 迅速发展阶段有蒸渗仪法、光合系统测定仪法等^[8-9]. 到了20世纪90年代,热扩散法、放射性同位素以及能量平衡等测定方法出现^[10],其中快速称质量法仍为目前最常用的方法^[11]. 巨桉 *E. grandis* 和尾巨桉 *E. urophylla* × *E. grandis* 由于适应性强、速生、丰产、优质等特点而被广泛种植利用. 胡红玲等^[12]认为巨桉具有较高的耗水能力^[13]. 尾巨桉的日平均蒸腾速率变化规律近单峰曲线^[14]. 尾巨桉和巨桉作为目前华南地区栽种的主要桉树人工林树种,二者耗水间的差异存在较大争议,类似研究也相对较少.

对植物耗水特性进行深入研究,估测不同植物单位面积的蒸腾量,准确地为苗木进行浇水灌溉,对解决水资源利用与节水的矛盾具有重要意义,从而也为苗木进行高效定向培育提供了理论依据和实践指导. 其中,蒸腾耗水速率和水分利用效率是树木重要的抗旱指标^[15]和干旱适应性指标^[16]. 本文通过对2种尾巨桉无性系(DH33-27和DH32-29)和巨桉无性系(H1)的耗水特性研究,评价其不同土壤水分条件下的水分消耗特征和耗水能力差异,为正确评价这3个速生树种水分消耗和利用特点提供理论支持,并为科学审视桉树人工林水资源消费问题提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为来自南方国家级林木种苗示范基地

的生长优良的2种尾巨桉无性系(DH33-27和DH32-29)和巨桉无性系(H1). 3种苗木均为1年生组培苗. 2012年12月中旬将所有试验材料上盆,每盆1株. 花盆规格为200 mm × 150 mm,基质土壤为泥炭土和黄土的混合土,其中泥炭土由市场购入,黄土取自华南农业大学树木园,其混合比例为 $m(\text{黄土}):m(\text{泥炭土})=7:3$,每盆土的质量为 (4.0 ± 0.2) kg. 定期浇水、除草、防病虫害,以保证苗木正常生长. 2013年6月份试验前苗木生长情况如表1所示.

表1 3种苗木试验前基本情况
Tab.1 Growth status for three seedlings

树种	苗高/cm	地径/mm	单株总叶面积/cm ²
尾巨桉 DH33-27	89.78 ± 1.89	9.75 ± 0.38	1 563.83 ± 101.55
尾巨桉 DH32-29	75.83 ± 1.28	8.77 ± 0.39	1 063.29 ± 66.10
巨桉 H1	87.18 ± 2.20	8.53 ± 0.31	1 188.43 ± 91.90

1.2 试验方法

1.2.1 耗水特性测定 采用盆栽苗木称质量法对苗木的耗水特性进行测定. 2013年6月25日将试验苗木浇透水,每种选择6株生长正常、长势(地径和苗高)接近的苗木设为重复,将苗盆用塑料袋完全套住(从苗木根茎处覆盖整个表面,并密封花盆底部),防止土壤水分的蒸发. 每次称量在08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00和翌日08:00分别用SP-30电子天平(美国)称盆质量1次,同时,用温湿度计(美德时TH603A)记录每次称盆时环境空气的温度和湿度. 叶面积计算与邱权等^[17]一致,根据公式(分级叶片数 × 叶面积再相加之总和)得到单株叶面积. 根据盆质量称量结果分别计算出白天、夜晚以及白天每个时间段(2 h)的耗水量,并用公式计算出对应的耗水速率:耗水速率 = 每个时间段的耗水量 / (单株叶面积 × 时间).

1.2.2 土壤水分条件设置 由于不同的水分胁迫程度还没有统一的划分标准,因此一般用土壤含水量来确定植株的干旱程度^[18]. 本试验中,利用 FOM/

mts 便携式土壤湿度计对试验期土壤体积含水量进行测定. 每树种按照测出的体积含水量分为 4 个等级:封盆后 0~3 d 视为处于正常水分条件时期,作为对照(CK),体积含水量 $\geq 18\%$;封盆后 4~6 d 视为轻度干旱(Light dry,LD)时期,体积含水量为 13%~18%;封盆后 7~15 d 视为中度干旱(Medium dry,MD)时期,体积含水量为 9%~13%;封盆后 16~23 d 视为严重干旱(Severe dry,SD)时期,体积含水量低于 9%.

1.2.3 叶片水分利用效率测定 2013 年 6 月,用 Li-6400 便携式光合作用分析系统(美国),选择 3 个晴天,于 09:30—11:00 测定苗木叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r),每种苗木选择 3 株,每株测定 3 片,其中,光照度设置为 $1\,000\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,温度 $35\,^{\circ}\text{C}$. 水分利用效率(WUE) = $P_n / T_r^{[19]}$.

1.2.4 数据处理 采用 Excel 2007 进行作图,SPSS 对试验数据进行方差分析、多重比较(Duncan's 法)和相关性分析.

2 结果与分析

2.1 单株苗木耗水量的比较

从表 2 可以看出,尾巨桉 DH33-27 在 CK 时期白天耗水量最大[(141.05 ± 7.82) $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$],显著高于其他 2 种树种. 在 LD 和 MD 时期,下降幅度较大,在 SD 时期白天耗水量最低,仅(8.83 ± 1.01) $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$,显著低于巨桉 H1(13.84 ± 2.38) $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ($P < 0.05$),但尾巨桉 DH32-29 与二者差异不显著. 在处理过程中,尾巨桉 DH32-29 的苗木耗水量仅在 CK 时期与尾巨桉 DH33-27 出现了显著差异($P < 0.05$). 尾巨桉 DH32-29 各时期耗水量介于尾巨桉 DH33-27 与巨桉 H1 之间. 巨桉 H1 在 4 个时期耗水量变化最小,SD 时期的全天耗水量占 CK 时期的 14.69%,而尾巨桉 DH33-27 则为 6.66%. 3 种树种的白天耗水量均占全天的 80% 以上,但随着干旱程度的不断加深,比值有所下降,从 CK 时期的 85.50%~86.77% 下降到 SD 时期的 81.04%~81.82%.

表 2 不同水分条件下苗木平均耗水量
Tab. 2 The average water consumption of seedlings under different soil moisture contents

水分条件	树种	耗水量 ¹⁾ /($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)		白天耗水量/ 全天耗水量
		白天	全天	
正常水分(CK)	尾巨桉 DH33-27	$141.05 \pm 7.82\text{a}$	$162.56 \pm 8.71\text{a}$	0.867 7
	尾巨桉 DH32-29	$100.51 \pm 3.55\text{b}$	$115.94 \pm 3.90\text{b}$	0.867 0
	巨桉 H1	$98.49 \pm 4.95\text{b}$	$115.20 \pm 5.46\text{b}$	0.855 0
轻度干旱(LD)	尾巨桉 DH33-27	$68.74 \pm 4.54\text{a}$	$80.77 \pm 5.08\text{a}$	0.851 0
	尾巨桉 DH32-29	$64.58 \pm 3.18\text{a}$	$64.58 \pm 3.18\text{a}$	0.855 3
	巨桉 H1	$64.26 \pm 2.42\text{a}$	$75.77 \pm 2.69\text{a}$	0.848 0
中度干旱(MD)	尾巨桉 DH33-27	$33.51 \pm 4.15\text{ab}$	$40.11 \pm 4.49\text{a}$	0.835 4
	尾巨桉 DH32-29	$37.47 \pm 6.30\text{ab}$	$43.83 \pm 6.86\text{a}$	0.854 9
	巨桉 H1	$41.53 \pm 5.27\text{a}$	$48.43 \pm 5.81\text{a}$	0.857 5
严重干旱(SD)	尾巨桉 DH33-27	$8.83 \pm 0.80\text{b}$	$10.83 \pm 1.01\text{b}$	0.815 3
	尾巨桉 DH32-29	$11.70 \pm 0.78\text{ab}$	$14.44 \pm 0.98\text{ab}$	0.810 4
	巨桉 H1	$13.84 \pm 2.38\text{a}$	$16.92 \pm 2.84\text{a}$	0.818 2

1) 相同水分条件下的同列数据后,凡是具有一个相同小写字母者,表示不同树种间在 0.05 水平上差异不显著(Duncan's 法, $n=6$).

2.2 耗水速率日变化

由图 1 可见,每种树种白天最大耗水速率出现在 10:00—14:00,同时耗水速率呈“单峰”曲线变化. 在正常土壤水分条件下,尾巨桉 DH33-27 和 DH32-29 白天各时段耗水速率均大于巨桉 H1,且巨桉 H1 白天最大耗水速率(94.80 ± 4.54) $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 出现在 10:00—12:00 时段. 3 种树种在正常水分条件下最大耗水速率与白天平均耗水速率的比值分别为

1.31(尾巨桉 DH33-27)、1.39(尾巨桉 DH32-29) 和 1.43(巨桉 H1). LD 时期,3 种树种最大耗水速率均出现于 10:00—12:00,白天各时段耗水速率曲线相似. 在 MD 时期,尾巨桉 DH33-27 和 DH32-29 白天平均耗水速率剧烈下降,明显低于巨桉 H1 (44.50 ± 2.09) $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. 随着水分胁迫日益严重至苗木死亡前期,每种树种的白天各时段耗水速率曲线慢慢趋向于平缓且规律不明显,在 SD 时期,尾巨桉

DH33-27、尾巨桉 DH32-29 和巨桉 H1 日平均耗水量相对于 CK 时期分别减少了 92.34%、87.83% 和 82.71%。由图 2 可得,随着干旱胁迫程度加深,苗木白天平均耗水速率均明显下降,且尾巨桉 DH33-27 和巨桉 H1 呈现显著性差异。

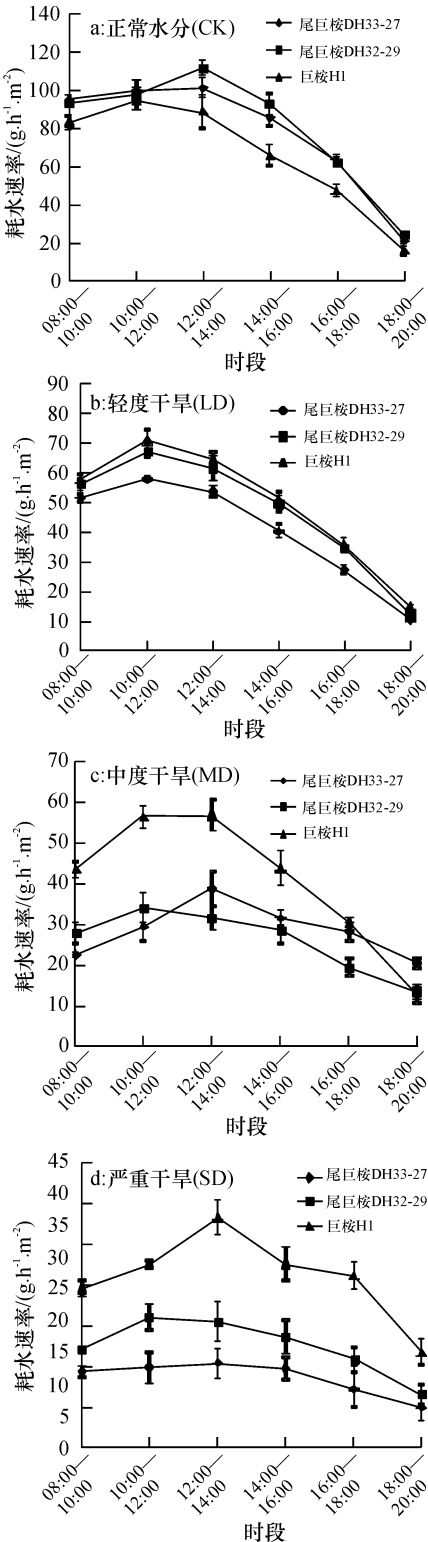
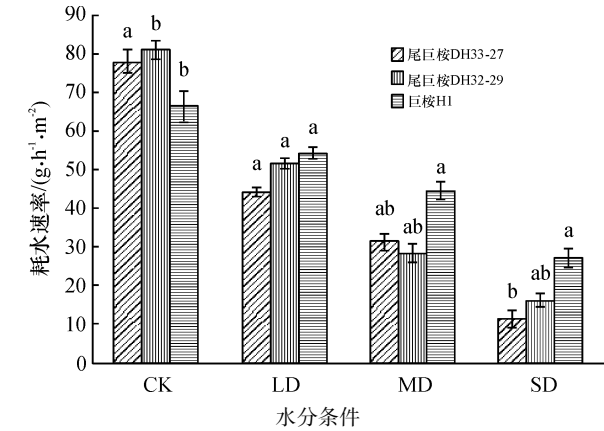


图1 不同土壤水分条件下苗木白天各时段平均耗水速率
Fig.1 The average water consumption rate of seedlings in each period in the daytime under different soil moisture contents



相同水分条件下的柱子上方,凡是具有一个相同小写字母者,表示不同树种间在 0.05 水平上差异不显著 (Duncan's 法, $n=6$)。

图2 不同土壤水分条件下苗木白天平均耗水速率
Fig.2 The average water consumption rate of seedlings during daytime under different soil moisture contents

2.4 水分利用效率的比较

通过对 3 种树种的 P_n 、 T_r 和 WUE 进行相互比较进一步分析桉树苗木的水分利用效率。由表 3 可以看出,在正常水分条件下,3 种树种的 P_n 存在显著性差异 ($P<0.05$), T_r 不存在显著性差异,而尾巨桉 DH33-27 的 WUE 与其余 2 种树种存在显著性差异。随着干旱胁迫程度的加重,在 LD 和 MD 时期, P_n 和 T_r 明显下降, WUE 上升。在 SD 时期,尾巨桉 DH33-27、DH32-29 和巨桉 H1 的 P_n 与 T_r 持续下降,而 WUE 在 MD 时期出现最高值后有所回落,在 SD 时期为 $3.602 \sim 4.326 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。水分利用效率由大到小依次为:尾巨桉 DH33-27 > 尾巨桉 DH32-29 > 巨桉 H1。

表3 3种苗木水分利用效率的比较¹⁾
Tab.3 A comparison of water use efficiency for three kinds of seedlings

水分条件	树种	$P_n/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$T_r/$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$WUE/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)
CK	尾巨桉 DH33-27	$10.928 \pm 0.186a$	$2.954 \pm 0.062a$	$3.746 \pm 0.062a$
	尾巨桉 DH32-29	$10.006 \pm 0.158b$	$2.921 \pm 0.029a$	$3.442 \pm 0.053b$
	巨桉 H1	$9.240 \pm 0.137c$	$2.882 \pm 0.102a$	$3.275 \pm 0.088b$
LD	尾巨桉 DH33-27	$7.126 \pm 0.131a$	$1.748 \pm 0.046a$	$4.156 \pm 0.079a$
	尾巨桉 DH32-29	$6.460 \pm 0.177b$	$1.644 \pm 0.063a$	$4.047 \pm 0.102a$
	巨桉 H1	$6.186 \pm 0.070b$	$1.731 \pm 0.034a$	$3.670 \pm 0.076b$
MD	尾巨桉 DH33-27	$3.905 \pm 0.100a$	$0.839 \pm 0.035a$	$4.817 \pm 0.181a$
	尾巨桉 DH32-29	$3.322 \pm 0.165b$	$0.768 \pm 0.042ab$	$4.347 \pm 0.132ab$
	巨桉 H1	$2.789 \pm 0.074c$	$0.716 \pm 0.018b$	$3.932 \pm 0.143b$
SD	尾巨桉 DH33-27	$1.487 \pm 0.075a$	$0.349 \pm 0.013a$	$4.326 \pm 0.224a$
	尾巨桉 DH32-29	$1.389 \pm 0.031a$	$0.369 \pm 0.013a$	$3.961 \pm 0.098a$
	巨桉 H1	$1.461 \pm 0.089a$	$0.463 \pm 0.050a$	$3.602 \pm 0.254a$

1) 相同水分条件的同列数据后,凡是具有一个相同小写字母者,表示不同树种间在 0.05 水平上差异不显著 (Duncan's 法, $n=6$)。

3 讨论

3.1 桉树间耗水特性比较

苗木耗水量是反映树种耗水潜力最直接的指标^[15]. 在 7 月份高温低湿的环境中,从树种全天耗水量的变化可以初步判断树种的节水性能. 但是,要全面了解不同树种间耗水能力的差异,仅凭耗水量不够,还应结合单位时间树种在单位叶面积的耗水量,即耗水速率来评价才更为准确. 先前研究证实巨桉 H1 为高耗水量树种^[13],而本研究中,在水分充足的条件下,巨桉 H1 总耗水量(115.20 ± 5.46) $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 与尾巨桉 DH32-29(115.94 ± 3.90) $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 十分接近,并且远小于尾巨桉 DH33-27(162.56 ± 8.71) $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$,到了 SD 时期其总耗水量(16.92 ± 2.84) $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 则远高于二者,且存在显著性差异. 说明巨桉 H1 较 2 种尾巨桉具有更差的节水能力,表现为在受到干旱胁迫时仍然保持较高的耗水量. 这与胡红玲等^[12]认为的巨桉不仅具有较高的耗水量,且在一定的干旱程度内,也更不易受到干旱影响而降低耗水量的观点一致. 而尾巨桉在干旱后期耗水剧烈下降是否与其叶片大量掉落造成总叶面积减少有关,还需更多试验数据加以证明. 当然,树木蒸腾作用是由气孔导度和边界层导度共同控制的^[20-22],当干旱胁迫加重,水分便主要通过皮孔蒸腾或角质层蒸腾来减少^[23]. 本研究中,随着水分胁迫的加剧,苗木保卫细胞缺水,控制气孔内外渗透压,导致气孔阻力剧增,也是蒸腾耗水减少的重要原因. 这是否还与叶脉致密度、叶片上蜡面沉积面积相关还需更深入研究.

在众多关于苗木蒸腾耗水的研究中,学者们均得出相似的结论,即正常水分条件下最大耗水速率与白天平均耗水速率的比值为 1.6^[24-26],在本研究中,该比值为 1.31~1.43,与邱权等^[17]对巨桉的研究结果一致. 最大耗水速率与白天平均耗水速率的比值可推测苗木对气候的敏感程度,比值越高可能说明叶片敏感度越高,受到环境因素影响越迅速,却似乎不能证明树种的节水能力强弱,但这一稳定的比值对瞬时蒸腾速率推算耗水量有重要的意义.

3.2 桉树间水分利用效率比较

植物耗水量与叶面积和叶片蒸腾强度有关^[27]. 在上述分析中发现尾巨桉 DH32-29 耗水量接近于巨桉 H1,与 CK 时期二者 WUE 不存在显著性差异的结论一致. 本研究数据表明:与其余 2 种桉树相比,巨桉 H1 在干旱胁迫过程中一直保持较低的水分利用效率,同时,光合速率和蒸腾速率也较尾巨桉 DH33-

27 低. 在 CK、LD 和 MD 时期,3 种树种的 WUE 逐步提高,在 SD 时期有所下降,这是由于树种受到干旱胁迫后,植物为了维持生命活动,吸收的水分更多地被用于光合作用而不是通过蒸腾散失,水分利用效率短暂提高正是苗木适应干旱的表现. 死亡前期 3 种树种水分利用效率并无显著性差异,说明植物各机能此时已降到了最低,并且供试树种均来自桉属,推测其具有相似的干旱适应能力. 综上所述,相比尾巨桉 DH33-29 和巨桉 H1,尾巨桉 DH33-27 是高光合、高水分利用效率的品系,不仅适宜在水分条件好的地区大面积推广,也适宜在水分严重亏缺的地区种植. 树木生长要遵循“适地适树”的原则,不仅要考虑当地的气候状况,也应从水分条件进行思考. 此次试验为盆栽试验,能否在人工林中也表现出同样特性,不仅需要考虑不同苗木耗水特性和水分利用效率,也应综合考虑各方面因素比如当地水资源、气候变化、经纬度等.

3.3 与其他速生树种耗水特性的对比

植物的抗旱能力是一个复杂的特征,以楸树为例^[28],影响最大的 4 个指标为:叶片厚度、栅栏组织厚度、气孔密度以及叶片游离脯氨酸变化量. 耗水量虽然能直观反映不同树种的节水能力,但由于受到叶面积影响较大,所以一般都以耗水速率和水分利用效率为主要参考指标. 耗水速率是植物固有的生理特性,稳定性好,能反映植物调节自身水分耗损能力和在不同环境中的实际耗水特征,因此常用来比较不同植物固有的耗水能力^[29]. 为了更好地对尾叶桉、巨桉与其他速生树种的耗水性能进行比较,特将此 3 种树种与尾叶桉(广林-9 号)、楸树和毛白杨进行对比. 其数据测定时间均为当年 7 月份,测定方法均为盆栽苗木称质量法,一年生苗木,因此具有较大的可比性.

由何茜^[25]试验得知:毛白杨 *Populus tomentosa* 的平均白天耗水量为每株 177.30 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,平均耗水速率为 90.00 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. 尾巨桉(广林-9 号)的平均白天耗水量为每株 162.07 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,平均耗水速率为 48.23 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;竹柳(*Bamboo-willow*)平均白天耗水量为每株 88.78 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,平均耗水速率为 59.19 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[17]. 正常水分条件下,这 6 种树种耗水能力差异较大,同样是尾巨桉的 3 个不同品种也存在较大差异. 这 6 种树种耗水速率大小排名为毛白杨>尾巨桉 DH32-29>尾巨桉 DH33-27>巨桉 H1>竹柳>尾巨桉(广林-9 号). 因此,从单株苗木耗水角度来讲,认为桉树高耗水缺乏科学性,与

华雷等^[30]试验结果相同。比较不同树种在充足的水分条件下耗水能力,不仅应比较不同树种间的耗水量,也应考虑其耗水速率。综上所述,为了充分利用稀缺水资源,为苗木生长进行因地制宜的充足灌溉,研究苗木耗水特性十分必要。本研究证明,尾巨桉、巨桉都是节水性能较好的树种,在对速生树种进行人工造林时可重点考虑。

参考文献:

[1] 杨民胜,吴志华,陈少雄,等. 桉树的生态效益及其生态林经营[J]. 桉树科技, 2006, 23(1): 32-39.

[2] BRITTO D S, PIROVANI C P, GONZALEZ E R, et al. Oxidative stress proteins as an indicator of a low quality of eucalyptus clones for the pulp and paper industry [J]. Genet Mol Res, 2012, 11(4): 3798-3813.

[3] YU F, HUANG X, DUAN C, et al. *Eucalyptus* trees-*Ag-
eratina adenophora* complex system: A new eco-environ-
mental protection model[J]. Clean-Soil Air Water, 2014,
42(5): 682-689.

[4] ESHETU Y, OLAVI L. Indigenous woody species diversi-
ty in *Eucalyptus globulus* Labill. ssp. *globulus* plantations
in the Ethiopian highlands[J]. Biodivers Conserv, 2003,
12(3): 567-582.

[5] 陈少雄. 桉树人工林土壤养分现状与施肥研究[J]. 桉
树科技, 2009, 26(1): 52-63.

[6] 于福科,黄新会,王克勤,等. 桉树人工林生态退化与
恢复研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2):
393-398.

[7] 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.

[8] 苏建平,康博文. 我国树木蒸腾耗水研究进展[J]. 水
土保持研究, 2004, 11(2): 177-179.

[9] 郭孟霞,毕华兴,刘鑫,等. 树木蒸腾耗水研究进展
[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 114-120.

[10] 王颖,余瑞卿,李湛东,等. 城市片林中常见树种的蒸
腾耗水特性研究综述[J]. 内蒙古农业大学学报:自然
科学版, 2005, 26(3): 115-119.

[11] 茹桃勤,李吉跃,孔令省,等. 刺槐耗水研究进展[J].
水土保持研究, 2005, 12(2): 135-140.

[12] 胡红玲,张健,胡庭兴,等. 不同土壤水分条件下三个
速生用材树种幼树的耗水特性比较[J]. 自然资源学
报, 2012, 27(12): 2071-2080.

[13] 胡红玲. 巨桉耗水特性及其对干旱胁迫的响应[D].
雅安:四川农业大学, 2012.

[14] 卢春英. 闽西尾巨桉造林及其生长效果分析[J]. 福建
林业科技, 2005, 32(2): 21-26.

[15] 罗青红,李志军. 树木水分生理生态特性及抗旱性研
究进展[J]. 塔里木大学学报, 2005, 17(2): 29-33.

[16] AZAM G, MURRAY R S, GRANT C D, et al. Tolerance
of young seedlings of Different tree species and a cereal to
poor soil aeration[J]. Soil Res, 2014, 52(8): 751-759.

[17] 邱权,潘昕,李吉跃,等. 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗
耗水特性和水分利用效率[J]. 生态学报, 2014, 34
(6): 1401-1410.

[18] 张雪海,李吉跃,刘娟娟,等. CO₂ 倍增与干旱胁迫交
互作用对幼树蒸腾耗水日变化的影响[J]. 广东林业
科技, 2009, 25(2): 1-9.

[19] PENUELAS J, FILELLA I, Llusà J, et al. Comparative
field study of spring and summer leaf gas exchange and
photobiology of the mediterranean trees *Quercus ilex* and
Phillyrea latifolia [J]. J Exp Bot, 1998, 49(319): 229-
238.

[20] SALIENDRA N Z, SPETTY J S, COMSTOCK J P. Influe-
nce of leaf water status on stomatal responses to humidity,
hydraulic conductance and soil drought in *Betula occider-
atalis* [J]. Planta, 1995, 196(2): 357-366.

[21] HIROMI T. NINOMIYA I, KOIKE T, et al. Regulation of
transpiration by patchy stomatal opening in canopy tree
species of Dipterocarpaceae in tropical rain forest, Sara-
wak, Malaysia[J]. Jpn J Ecol, 1999, 49(2): 83-90.

[22] 奚如春,马履一,王瑞辉,等. 林木耗水调控机理研究
进展[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 692-697.

[23] 李吉跃,朱妍. 干旱胁迫对北京城市绿化树种耗水特
性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(S1): 32-
37.

[24] 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, 28
(1): 65-70.

[25] 何茜. 毛白杨抗旱节水优良无性系评价与筛选[D].
北京:北京林业大学, 2008.

[26] 陈博. 珍贵树种楸树优良无性系评价与筛选[D]. 广
州:华南农业大学, 2012.

[27] 马履一,王瑞辉,徐军亮,等. 北京市主要园林绿化植
物耗水性及节水灌溉制度研究[M]. 北京:中国林业出
版社, 2009: 5.

[28] 董蕾,陈博,李吉跃,等. 5个楸树无性系抗旱性的综
合评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(4):
30-35.

[29] 邱权,何茜,李吉跃,等. 干旱胁迫对华南地区三种苗
木蒸腾耗水的影响[J]. 广东林业科技, 2012, 28(1):
19-24.

[30] 华雷,何茜,李吉跃,等. 桉树无性系和华南乡土树种
秋枫苗木耗水特性的比较[J]. 应用生态学报, 2014,
25(6): 1639-1644.

【责任编辑 李晓卉】