

毛白杨不同无性系苗木耗水量及其昼夜分配

何茜^{1,2}, 李吉跃^{1,2}, 陈晓阳¹, 张志毅³

(1 华南农业大学 林学院, 广东 广州 510642; 2 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 3 北京林业大学 林木花卉遗传与育种教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:在苗木生长旺盛时期对 19 个毛白杨 *Populus tomentosa* 无性系当年生苗木耗水特性进行研究, 分析比较了无性系间耗水量、耗水速率差异及昼夜分配关系. 结果表明: 毛白杨不同无性系间耗水量差异极显著, 耗水速率差异显著. 无性系 26、46、BL5、BL8 和 S86 的日耗水量较大, 最高的无性系 26 达 $(268.1 \pm 20.3) \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 无性系 30、81、87、1316 和 TG34 的耗水量较小, 最低的无性系 1316 仅 $(92.0 \pm 12.5) \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$. 总叶面积是引起毛白杨无性系间耗水量差异的重要原因, 两者相关系数达 0.78, 因此在对毛白杨进行速生丰产林营造时应针对无性系确立合理的栽植密度和灌溉量. 毛白杨白天耗水速率为 $112.1 \sim 218.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中, 无性系 26、46、B331 和 BL2 的耗水速率较高, 高于 $181.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 无性系 20、30 和 87 的耗水速率较低, 低于 $119.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. 毛白杨无性系间昼夜耗水量分配稳定, 苗木白天耗水量占全天的 88.4% ~ 92.6% (平均约 90%), 白天平均耗水速率与日平均耗水速率比值为 1.8.

关键词:毛白杨; 耗水量; 耗水速率; 无性系

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2010)01-0047-04

Water Utilization and Its Distribution in Day and Night in Different *Populus tomentosa* Clones

HE Qian^{1,2}, LI Ji-yue^{1,2}, CHEN Xiao-yang¹, ZHANG Zhi-yi³

(1 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3 Key Laboratory for Genetics and Breeding in Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Water consumption characteristics, water consumption amount and rate, water distribution of day and night of underyearling seedlings in 19 clones of *Populus tomentosa* during vigorous growth period were studied. The results showed that different clones of *Populus tomentosa* had different water consumption amount and rate, clones 46, BL5, BL8 and S86 had larger water consumption amount and clones 26, highest up to $(268.1 \pm 20.3) \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, while clones 30, 81, 87, 1316 and TG34 had smaller water consumption amount, clones 1316, the lowest only $(92.0 \pm 12.5) \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$. The main reason for the difference of water consumption amount was total leaf areas variation of the seedlings, and their correlation coefficient was 0.78. Therefore, appropriate planting density and irrigation capacity should be established for different clones in a fast-growing high-yielding plantations. Water consumption rate in day time of *Populus tomentosa* clones were varied from 112.1 to 218.8 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Clone 26, 46, B331 and BL2 had the high water consumption rate (higher than $181.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), clone 20, 30 and 87 had the low water consumption rate (lower than $119.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$). There was stable distribution of water consumption in day and night. Water consumption amount during the day occupied 88.4% to 92.6% of the whole day (an average about 90%), at the same time, average water consumption rate during the

收稿日期: 2009-01-15

作者简介: 何茜 (1981—), 女, 博士; 通讯作者: 李吉跃 (1959—), 男, 教授, 博士, E-mail: ljyymy@vip.sina.com

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划 (2006BAD24B04); 国家自然科学基金 (200730671675)

day was 1.8 times to the whole day.

Key words: *Populus tomentosa*; water consumption; water consumption rate; clones

水分是影响树木生长的重要条件和基础,而蒸腾耗水则是树木水分散失的主要途径.因此,树木蒸腾耗水的准确测算和深入研究对于提高林木水分利用率、调控林木密度、优化林木体系配置和稳定林木结构设计具有重大的理论和现实意义.目前对于杨树耗水研究较多,方法包括了整树容积法^[1-2]、双桶源能量守恒模型^[3]、热脉冲法^[4]、快速称重法^[5]等,通过单株称量、树干液流计算和土壤水分消耗推导得出杨树的蒸腾耗水量.然而,在众多的研究中,鲜见开展对同一杨树不同无性系的研究.

毛白杨 *Populus tomentosa* 是我国特有的优良乡土树种,由于它具有生长快、材质优良、抗逆性强和适应性广等特点,已在国内进行大面积速生丰产林的营造,并取得了较好的经济效益.已有研究显示,毛白杨耗水量大^[6],因此,如何选择高水分利用效率的低耗水无性系成为迫切需要.这就需要对毛白杨不同无性系的耗水量进行准确测算.本文从苗木耗水量的角度出发,研究了 19 个毛白杨无性系的蒸腾耗水特性及昼夜分配关系,以期为低耗水的毛白杨无性系选育提供理论依据和方法.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 19 个毛白杨无性系,其中 9 个无性系 BT17、B331、1316、S86、BL1、BL2、BL8、BL5、TG34 来源于河北威县苗圃,10 个无性系 20、26、28、30、42、46、50、81、83 和 87 来源于山东冠县苗圃.

1.2 研究方法

2007 年 3 月底取 19 个毛白杨无性系枝条进行嫁接后栽于棕色塑料花盆中,盆高 33 cm,内径 30 cm.培养土壤为沙壤土,沙与土的体积比为 2:1,土壤容重 $(1.411 \pm 0.020) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量 $(26.02 \pm 0.77) \%$.各无性系嫁接砧木尽量保持一致,每盆 1 株,在充分供水条件下培养.7 月中旬从每个无性系选择生长中等的 3 株苗木对其耗水量及相关指标进行测定,具体为将苗木浇透水,用塑料薄膜进行封盆处理(从苗木根茎处覆盖整个表面,并密封花盆底部),以防止水分的散失.苗木具体情况见表 1.封盆后选择典型晴天连续测定 2 d(7 月 19 ~ 20

日),每天 8:00 和 20:00 各测定 1 次,再于第 3 天上午 8:00 测定 1 次.称盆过程控制在 15 min 内,避免由时间差异引起的测定误差.测定以下几项指标.

(1)整株叶面积:于耗水测定之前进行测定,具体为将叶片分为大、中、小 3 级^[7],每级记录叶片数量,并找出典型叶片用剪纸称重法得出叶面积,再以分级叶片数乘以叶面积再相加的总和得到整株叶面积.

(2)耗水量和耗水速率:用 SP-30 电子天平(美国,精度 1/10 000,量程 1 ~ 30 kg)称每盆质量,测定计算整株苗木的耗水量.耗水量除以叶面积计算得出耗水速率.

表 1 毛白杨无性系苗木生长情况
Tab. 1 Growth status for seedlings of *Populus tomentosa* clones n = 3

无性系	苗高/cm	地径/mm	整株叶面积/cm ²
20	51.8 ± 2.3	0.658 ± 0.021	898.15 ± 91.27
26	80.1 ± 4.0	0.796 ± 0.017	1047.03 ± 14.20
28	85.1 ± 2.2	0.814 ± 0.027	965.30 ± 159.70
30	70.4 ± 4.3	0.76 ± 0.024	747.21 ± 84.58
42	98.8 ± 5.2	0.891 ± 0.101	835.69 ± 81.79
46	95.6 ± 1.3	0.693 ± 0.052	871.40 ± 68.33
50	132.0 ± 6.5	1.034 ± 0.029	855.24 ± 140.15
81	33.6 ± 4.2	0.502 ± 0.080	446.99 ± 55.62
83	68.3 ± 2.7	0.768 ± 0.033	690.56 ± 80.22
87	62.2 ± 8.3	0.643 ± 0.073	779.50 ± 45.94
1316	51.0 ± 2.6	0.639 ± 0.024	461.80 ± 88.01
B331	49.4 ± 5.5	0.649 ± 0.033	558.18 ± 53.96
BL1	106.0 ± 4.7	0.910 ± 0.034	775.56 ± 137.59
BL2	108.0 ± 2.5	0.852 ± 0.008	715.61 ± 28.24
BL5	131.0 ± 3.9	0.991 ± 0.052	1 385.32 ± 107.92
BL8	112.0 ± 1.9	1.164 ± 0.017	1 282.37 ± 40.32
BT17	91.3 ± 6.8	0.829 ± 0.024	977.25 ± 113.82
S86	127.0 ± 3.4	0.879 ± 0.139	1 094.97 ± 163.89
TG34	58.3 ± 7.9	0.611 ± 0.048 7	668.88 ± 109.06

1.3 数据处理

用 Excel 和 SPSS 16.0 对试验数据进行方差分析、多重比较和相关性分析.

2 结果与分析

2.1 毛白杨无性系全天及昼夜耗水量比较

在晴朗无云的夏季,毛白杨不同无性系的日耗水量和昼夜耗水量有着明显的差异(表2)。其中,26、46、BL5、BL8 和 S86 的日耗水量较大,分别为 (268.1 ± 20.3) 、 (253.9 ± 40.4) 、 (241.8 ± 32.6) 、 (268.9 ± 5.5) 和 (250.4 ± 35.1) $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,30、81、87、1316 和 TG34 的耗水量较小,分别为 (113.5 ± 11.5) 、 (93.4 ± 27.1) 、 (114.6 ± 21.2) 、 (92.0 ± 12.5) 和 (118.4 ± 17.2) $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。方差分析和多重比较显示,耗水量大的无性系与耗水量小的无性系差异显著。这说明,毛白杨无性系在水分消耗方面有很大的差异,因此,在造林前选择低耗水的无性系是保证造林成活率的关键之一。

表2 毛白杨无性系耗水量比较¹⁾
Tab.2 Comparisons on water consumption of *Populus tomentosa* clones n = 3

无性系	耗水量/($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)			白天/ 夜晚/	
	全天	白天	夜晚	全天	全天
20	147.0±12.8 abcd	119.5±6.3	17.6±1.7	1.7	0.3
26	268.1±20.3 e	193.4±18.1	19.9±3.1	1.8	0.2
28	159.4±4.5 ab	132.1±20.0	12.6±1.3	1.8	0.2
30	113.5±11.5 ab	116.6±1.5	10.3±1.3	1.8	0.2
42	195.2±16.7 abcde	175.4±3.9	19.8±2.4	1.8	0.2
46	253.9±40.4 de	218.8±26.3	22.1±1.1	1.8	0.2
50	201.8±55.3 abcde	179.9±21.4	10.5±2.2	1.9	0.1
81	93.4±27.1 a	158.4±28.1	12.1±1.3	1.9	0.1
83	131.4±14.2 abc	141.4±11.2	19.1±3.1	1.8	0.2
87	114.6±21.2 ab	112.1±15.6	9.9±1.2	1.8	0.2
1316	92.0±12.5 a	140.9±23.4	33.8±4.9	1.6	0.4
B331	125.9±21.3 ab	181.1±51.9	16.7±2.6	1.8	0.2
BL1	157.5±5.4 abcde	155.4±24.2	22.7±6.5	1.7	0.3
BL2	181.3±11.3 abcde	189.7±2.9	21.2±2.0	1.8	0.2
BL5	241.8±32.6 cde	133.2±7.4	11.0±1.1	1.8	0.2
BL8	268.9±5.5 e	160.8±6.3	14.5±3.7	1.8	0.2
BT17	230.1±14.7 bcde	175.8±13.1	23.3±2.7	1.8	0.2
S86	250.4±35.1 de	164.3±3.8	27.1±3.5	1.7	0.3
TG34	118.4±17.2 ab	132.6±3.8	15.7±2.5	1.8	0.2
平均值	176.0	156.9	17.9	1.8	0.2

1) 同列数据后,不同字母表示在0.05水平上差异显著

从表1 昼夜耗水量变化可见,毛白杨的蒸腾耗水主要发生在白天,白天耗水量占全天的88.4%~92.6%(平均为90.4%),而夜晚耗水量占全天的7.4%~11.6%(平均为9.6%)。分析毛白杨苗木耗水量与整株叶面积的相关关系可以得出:苗木耗水量与总叶面积呈显著正相关(图1),说明苗木蒸腾

耗水除其自身的遗传特性外,在很大程度上受总叶面积的影响和制约。

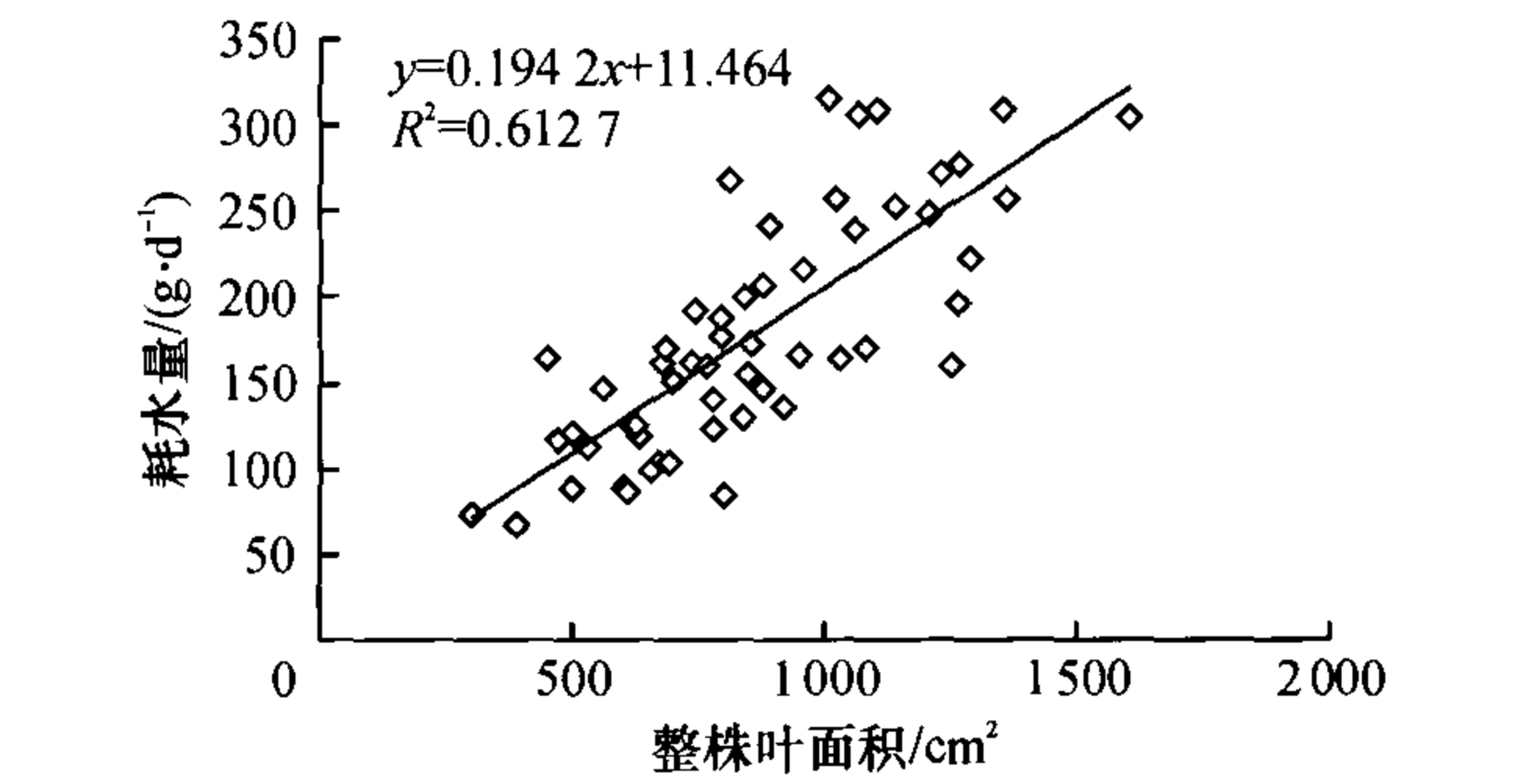


图1 毛白杨无性系全天耗水量与苗木整株叶面积的相关性
Fig.1 The correlation between water consumption and total leaf areas in *Populus tomentosa* clones

2.2 毛白杨无性系白天耗水速率比较

由于苗木耗水主要集中在白天,所以用白天耗水速率作为比较树种间和树种内耗水的指标。从表3可以看出,毛白杨无性系白天耗水速率变化在 $112.1 \sim 218.8$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,其中,26、46、B331 和 BL2 的白天耗水速率较高,分别为 (193.4 ± 18.1) 、 (218.8 ± 26.3) 、 (181.1 ± 51.9) 和 (189.7 ± 2.9) $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,20、30和87的耗水速率较低,分别为

表3 毛白杨无性系耗水速率比较¹⁾
Tab.3 Comparisons on water consumption rate of *Populus tomentosa* clones n = 3

无性系				白天/ 夜晚/	
	全天	白天	夜晚	全天	全天
20	68.5±3.4 b	119.5±6.3	17.6±1.7	1.7	0.3
26	106.7±7.6 a	193.4±18.1	19.9±3.1	1.8	0.2
28	72.3±10.7 ab	132.1±20.0	12.6±1.3	1.8	0.2
30	63.4±0.8 b	116.6±1.5	10.3±1.3	1.8	0.2
42	97.6±1.8 a	175.4±3.9	19.8±2.4	1.8	0.2
46	120.4±13.7 a	218.8±26.3	22.1±1.1	1.8	0.2
50	95.2±10.9 a	179.9±21.4	10.5±2.2	1.9	0.1
81	85.3±14.7 ab	158.4±28.1	12.1±1.3	1.9	0.1
83	80.3±7.0 ab	141.4±11.2	19.1±3.1	1.8	0.2
87	61.0±8.4 a	112.1±15.6	9.9±1.2	1.8	0.2
1316	87.4±14.1 ab	140.9±23.4	33.8±4.9	1.6	0.4
B331	98.9±26.8 a	181.1±51.9	16.7±2.6	1.8	0.2
BL1	89.1±12.5 a	155.4±24.2	22.7±6.5	1.7	0.3
BL2	105.4±2.4 a	189.7±2.9	21.2±2.0	1.8	0.2
BL5	72.1±4.2 a	133.2±7.4	11.0±1.1	1.8	0.2
BL8	87.7±4.3 a	160.8±6.3	14.5±3.7	1.8	0.2
BT17	99.6±7.8 a	175.8±13.1	23.3±2.7	1.8	0.2
S86	95.7±2.0 a	164.3±3.8	27.1±3.5	1.7	0.3
TG34	74.1±2.3 a	132.6±3.8	15.7±2.5	1.8	0.2
平均值	87.4	156.9	17.9	1.8	0.2

1) 不同字母表示在0.05水平上差异显著

(119.5 ± 6.3)、(116.6 ± 1.5) 和 (112.1 ± 15.6) $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. 方差分析和多重比较显示:毛白杨无性系间白天耗水速率的差异显著,这也反映出不同无性系苗木的蒸腾耗水有着很大的差异. 另外,表3还显示:日平均耗水速率与白天平均耗水速率、夜晚平均耗水速率之间也存在一定的关系,即白天平均耗水速率/日平均耗水速率 = 1.8,夜晚平均耗水速率/日平均耗水速率 = 0.2,即白天和夜晚平均耗水速率的总和等于日平均耗水速率的2倍. 这一稳定的关系对苗木耗水速率的计算和推算具有重要意义.

3 讨论

3.1 测定方法比较

水分是影响树木生长的重要条件和基础,而蒸腾耗水则是树木水分散失的主要途径. 杨树是耗水量较大的树种^[6],因此,对其耗水量的准确测算对提高其自身的水分利用效率和优化林木体系配置具有重大的意义. 20世纪60年代开始,国内外众多专家学者就树木蒸腾耗水展开了全面系统的研究,也提出了多种蒸腾耗水量的测定方法. 目前,对树木耗水量的实际测定多用树干液流方法和 Li-6400 测定的瞬时蒸腾速率推导得出. 但是,树干液流法中探针的使用对树木木质部造成了一定的伤害,并且对树木个体的测定不连续,每次试验前都需使树木恢复初始的热平衡作为重复测量的预处理. 在此基础上, Zhirenko^[7]提出了一种测量树木耗水量的新方法,并首次应用到栓皮栎上,得到了较为科学的结论,不仅避免对树木产生伤害,也解决了测定不连续的问题. 周平等^[6]、招礼军^[8]和万雪琴等^[9]对杨树等多个针叶及阔叶树种的蒸腾速率与实际耗水速率的比较发现,尽管瞬时蒸腾速率反映了苗木潜在的耗水能力,但是由于各树种蒸腾速率的日变幅各不相同,同一树种不同部位的叶片蒸腾速率差异也较大,所以测定的蒸腾速率可以用于比较不同树种或同一树种不同品种、无性系间的蒸腾耗水特性,但并不能用于精确推算实际耗水量,具有一定的局限性. 稳定碳同位素作为一种新型的技术也被用于植物水分利用效率的测定,赵凤君^[10]通过研究黑杨不同无性系的水分利用差异,筛选出了高水分利用的无性系. 但这种技术价格昂贵,难以用于生产实践.

周平等^[6]通过用保鲜膜将盆栽苗木密封覆盖的方法,每天定时应用精密电子天平对9个树种进行称量,通过计算每天的质量变化,得到任意时间之间整株苗木的蒸腾耗水量. 这种方法是继 Ladefoged^[11]提出整株容积法后,在 Roberts^[12]、Knight^[13]和刘奉

觉等^[1]于应用的基础上进行的改进. 这种方法能在不破坏树木的基础上对耗水量进行准确测算. 招礼军^[8]、朱妍等^[14]、何茜等^[15-16]将该方法广泛地应用于油松、侧柏、白蜡、国槐、火炬树、盐肤木、黄栌、紫穗槐、沙柳等多种树木,并且通过耗水量的差异筛选出了高、低耗水树种和低耗水的沙柳种源.

3.2 毛白杨不同无性系耗水量差异

由于树种的生物学特性上的差异,造成了其不同年龄、不同生长季节中生物量的不同,从而产生耗水量上的差别,所以,在苗木耗水量上的差异并不能完全表明其蒸腾耗水能力和节水能力的强弱. 但从另一个角度来说,树木耗水量的大小可以为实际生产中,在水分平衡基础上的林木调控(比如间伐、修枝等)提供一定的参考. 要比较不同树种的耗水和节水性质,必须考虑树木的叶面积,即以树木的耗水速率来进行分析更为客观和准确. 在本研究中,毛白杨不同无性系间耗水速率存在一定的差异($F_{\text{WCR}} = 1.99 < F_{\text{WC}} = 6.48$),但不如耗水量差异显著,这说明毛白杨的耗水速率由于受到同一树种遗传特性的影响和控制,比耗水量的变化更加稳定,耗水量除了受自身的遗传特性影响和控制外,还与总叶量的多少关系密切,这在前面的研究中也得到了证实. 另外,本研究得出的日平均耗水速率与白天平均耗水速率、夜晚平均耗水速率之间存在的特定的关系,尽管目前这一比例关系不能用数学关系式或模型来解释,但是在今后值得进行更深入的研究.

参考文献:

- [1] 刘奉觉,郑世锴,巨关升. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究[J]. 林业科学,1997,33(2):117-126.
- [2] LADEFOGED K. A method for measuring the water consumption of large intact tree[J]. Physiologia Plantarum, 1960,13:648-658.
- [3] 朱仲元,朝伦巴根,王志强,等. 基于 Shuttleworth, Wallace 双源模型的天然杨树蒸散量日变化研究[J]. 水利学报,2007,38(5):582-590.
- [4] 张小由,康尔泗,司建华,等. 胡杨蒸腾耗水的单木测定与林木转换研究[J]. 林业科学,2006,42(7):28-32.
- [5] 赵军达,杜宏志,赵欣欣,等. 小黑杨人工林对土壤水消耗的研究[J]. 防护林科技,2007,4(79):57-58.
- [6] 周平,李吉跃,招礼军. 北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(5/6):50-55.
- [7] ZHIRENKO N G. Autonomous system for measuring water consumption in plants[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2003,50(5):701-703.

(下转第54页)

离脯氨酸和可溶性蛋白含量均显著增加,这对膜结构和功能的稳定性起到了积极的保护作用;但 42℃/37℃处理 32 h 后,二者突然下降,这说明在一定的胁迫条件下,植物能够通过积累渗透调节物质来抵抗逆境造成的伤害,但当超过这一范围,长时间的高温胁迫就破坏了岷江百合叶内自由基的产生与清除的动态平衡关系,使得膜脂过氧化作用加剧,最终导致膜结构和功能的破坏。

参考文献:

- [1] 赵祥云,王树栋,陈新露. 百合[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [2] 王凤兰,周厚高,黄玉源,等. 4 个新铁炮百合品系幼苗的抗热指标测定[J]. 仲恺农业技术学院学报, 2003, 16(2): 38-42.
- [3] 周斯建,义鸣放,穆鼎. 高温胁迫下铁炮百合幼苗形态及生理反应的初步研究[J]. 园艺学报, 2005, 32(1): 145-147.
- [4] 张施君,周厚高,孔翠颜,等. 高温胁迫对抽苔期新铁炮百合的生理影响[J]. 中国农学通报, 2004, 20(5): 191-192, 205.
- [5] 尹慧,陈秋明,何秀丽,等. 短暂高温对百合植株抗氧化酶系统的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(2): 509-512.
- [6] 罗丽兰,石雷,姜闯道,等. 不同温度下新铁炮百合幼苗的光合特性及其保护机制[J]. 园艺学报, 2008, 35(1): 131-136.
- [7] 陈秋明,尹慧,李晓艳,等. 高温胁迫下外源水杨酸对百合抗氧化系统的影响[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(2): 44-48.
- [8] 贾开志,陈贵林. 高温胁迫下不同茄子品种幼苗耐热性研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 398-401.
- [9] 易金鑫,侯喜林. 茄子耐热性遗传表现[J]. 园艺学报, 2002, 29(6): 529-532.
- [10] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京:中国农业出版社, 1992.
- [11] 郝再彬,苍晶,徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [12] STEWART R R C., BEWLEY J D. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes 1[J]. Plant Physiology, 1980, 65(2): 245-248.
- [13] BERRY J, BJORKMAN O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants[J]. Annual Reviews in Plant Physiology, 1980, 31(1): 491-543.
- [14] 张桂莲,陈立云,张顺堂,等. 抽穗开花期高温对水稻剑叶理化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1345-1352.
- [15] 杨秋珍,李军,王金霞,等. 高温胁迫下甜瓜生理生态特性研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 20-22.
- [16] 吴国胜,曹婉虹. 细胞膜热稳定性及保护酶和大白菜耐热性的关系[J]. 园艺学报, 1995, 22(4): 353-358.
- [17] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [18] 欧祖兰,曹福亮,郑军. 高温胁迫下银杏形态及生理生化指标的变化[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2008, 32(3): 31-34.
- [19] 李云,张钢,杨际双. 热激锻炼对高温胁迫下菊花生理代谢的影响[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(2): 175-178.
- [20] 汤日圣,郑建初,陈留根,等. 高温对杂交水稻籽粒灌浆和剑叶某些生理特性的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 657-662.
- [21] 庞金安,张延军. 高温处理对黄瓜幼苗蛋白质含量的影响[J]. 天津农业科学, 2001, 7(1): 10-13.

【责任编辑 李晓卉】

(上接第 50 页)

- [8] 招礼军. 我国北方主要造林树种耗水特性及抗旱造林技术研究[D]. 北京:北京林业大学图书馆, 2003.
- [9] 万雪琴,夏新莉,尹伟伦,等. 不同杨树无性系扦插苗水分利用效率的差异及其生理机制[J]. 林业科学, 2006, 42(5): 133-137.
- [10] 赵凤君,高荣孚,沈应柏,等. 黑杨无性系长期水分利用效率差异的生理基础[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2079-2086.
- [11] LADEFOGED K. A method for measuring the water consumption of large intact tree[J]. Physiologia Plantarum, 1960, 13: 648-658.
- [12] ROBERTS J. The use of tree-cutting technique in the study of water relation of mature[J]. Pinus sylvestris L J Exp Bot, 1977, 28: 751-767.
- [13] KNIGHT D H, FAHEY T J, RUNNING S W, et al. Transpiration from 100-yr-old lodgepole pine forests estimated with whole-tree potometers[J]. Ecology, 1981, 62(3): 717-726.
- [14] 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.
- [15] 何茜,李吉跃,齐涛. “施丰乐”对国槐蒸腾耗水日变化的影响[J]. 福建林学院学报, 2006(4): 358-362.
- [16] 何茜,李吉跃,齐涛. 植物生长调节剂对国槐蒸腾耗水的影响[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 74-78.

【责任编辑 李晓卉】