

文章编号: 1001-1498(2000) 04-0360-06

# 稳态气孔计与其它 3 种方法 蒸腾测值的比较研究

巨关升<sup>1</sup>, 刘奉觉<sup>1</sup>, 郑世锴<sup>1</sup>, 吴晓春<sup>2</sup>, 汝成祥<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091; 2. 山东省沂南县林业局, 山东 沂南 276300)

**摘要:** 1989~1992年, 分别在山东(鲁克斯杨)与宁夏(合作杨)人工林中, 用3种方法(快速称量法、热脉冲法和整树容器法)多次对比了气孔计测值的变化。结果表明, 气孔计测值恒大于实际蒸腾值。根据10次1026个样本比较, 气孔计测值约为自然蒸腾值的1.3~3.2倍, 平均为2.649倍, 其平均校正系数为0.3775, 干旱地区为0.6452, 较湿润地区为0.3407, 此值可作为蒸腾耗水研究的参考。

**关键词:** 稳态气孔计; 快速称量法; 热脉冲法; 整树容器法; 蒸腾测定技术; 蒸腾耗水

**中图分类号:** S715.4      **文献标识码:** A

近年来, 国内许多单位购买了美国LI-COR公司的稳态气孔计, 用于树木蒸腾耗水量的测定<sup>[1]</sup>, 但这种仪器的测值与实际蒸腾值的差异并未引起人们的重视, 致使有些结果无法解释, 这说明对稳态气孔计测值有研究的必要。近年来结合研究工作, 对气孔计测值与其它方法的测值进行了多次比较, 其结果可供同行参考。

## 1 材料与方 法

试验于1989~1992年分别在山东莒县、沂南县(35°33' N, 118°30' E, 温带季风气候, 年均气温12.8℃, 降水量837 mm)和宁夏永宁县(38°01' N, 106°31' E, 大陆性气候, 年均气温8.5℃, 降水量202 mm)进行。试验材料分别为鲁克斯杨(*Populus deltoides* Bartr. cv. 'Lux')不同树龄的人工林(山东)和4年生合作杨(*P. × xiaozhuanica* W. Y. Hsu et Liang cv. 'Opera')人工林(宁夏)。采用3种方法(叶片处于自然条件下蒸腾)与气孔计叶室值进行同林分、同树木、同叶片的蒸腾测值比较。方法简述如下。

### 1.1 气孔计法(LI-1600 Steday state porometer)

将测定时环境相对湿度设定为仪器叶室的平衡湿度, 选树冠中层正常生长的叶片夹入叶室, 分别测定上、下两个表面的蒸腾速率, 两者之和即为叶的蒸腾速率, 重复6次, 用平均蒸腾速率与树冠叶面积换算树冠蒸腾耗水量<sup>[2]</sup>。

### 1.2 快速称量法(Quick-weighing method, 以下简称快称法)

用KS-016A快速天平在田间防风罩内进行。从树冠中部摘叶, 称质量后悬挂2 m高处, 间

收稿日期: 1999-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(38970169)、中国林科院科学技术发展基金资助, 世界银行贷款国家造林项目(NAP)“杨树研究与推广”课题的一部分

作者简介: 巨关升(1965-), 男, 陕西岐山人, 助理研究员。

隔 2 min 再称质量, 以单位鲜叶的失水量表示蒸腾速率, 重复 6 次, 用平均值与树冠叶鲜质量计算某时刻的树冠蒸腾耗水量<sup>[3]</sup>。

### 1.3 热脉冲法(Heat pulse technique)

该方法以 Huber 的热脉冲补偿系统、Marshal 的流速流量转换分析和 Swanson 的损伤分析为基础, 由 Edwards 总结成系统的理论技术, 刘奉觉等首次在国内测定。在树干定点部位以热脉冲间断地加热树液, 在上下位点用电桥测定热平衡时间, 换算出树干液流速度和树干液流量, 即树冠蒸腾耗水量, 用热脉冲速度记录仪连续自动记录<sup>[4]</sup>。

### 1.4 整树容器法(Whole-tree potometer)

参照 Roberts<sup>[5]</sup> 和 Knight<sup>[6]</sup> 的方法进行。凌晨从地面处锯断树干, 放入盛有水的容器中, 定时(间隔 20 min)观测容器的水量损失, 即为树冠蒸腾耗水量<sup>[7]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 气孔计与整树容器法蒸腾测值的比较

1991年9月6日(山东沂南县)在同一株2年生鲁克斯杨(树高6.71 m, 胸径8.2 cm, 树冠叶面积24.43 m<sup>2</sup>, 叶鲜质量6140 g)上, 基部用整树容器法测定水量损失, 冠部用气孔计每小时测定一次叶室中叶的蒸腾速率。根据树体水分平衡原理, 从树干基部吸入的水量, 几乎全部用于树冠的蒸腾消耗, 它等于树冠的蒸腾耗水量。因此可以认为, 整树容器中的水分损失量等于树冠的实际耗水量。两种方法的同步比较结果见图1。可以看出, 两种测值的日进程变化趋势是一致的, 均为单峰曲线, 峰值出现在13:00左右, 但气孔计的测值始终大于整树容器法测值。在10:00~16:00蒸腾高值期, 气孔计值约为整树容器法测值的2~3倍, 直到18:00以后蒸腾极低时, 两种测值才逐渐接近。

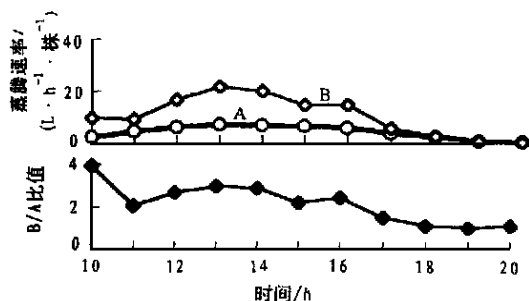


图1 气孔计(B)与整树容器法(A)蒸腾测值的比较  
(1991-09-06, 2年生, 鲁克斯杨)

两种数值的相关分析呈极显著的线性相关:

$$y = 0.3157x + 911.8285$$

$$(r = 0.9503), P < 0.01, n = 11)$$

其中:  $x$ ——气孔计测值/( $g \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ );

$y$ ——整树容器法测值/( $g \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )。

比较全天单位叶面积的平均蒸腾速率, 整树容器法值为  $148.40 g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ , 气孔计测定值为  $432.50 g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ , 为前者的 2.91 倍。

本次比较表明, 气孔计测定的蒸腾值与树冠实际耗水的变化趋势基本一致, 但其数值偏大, 约为实际耗水值的 2~3 倍, 仅在傍

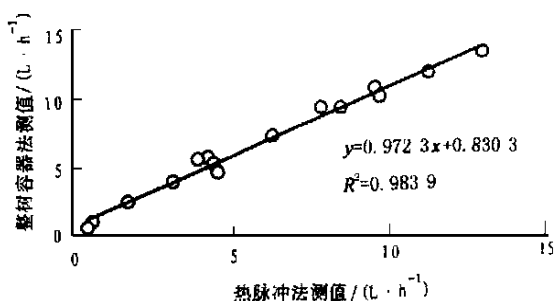


图2 热脉冲法与整树容器法测值的相关分析  
(1991-09-09, 6年生, 鲁克斯杨)

晚蒸腾极低时,测值间差异才变小。

## 2.2 气孔计与热脉冲法蒸腾测值的比较

在 6 年生鲁克斯杨树上(树高 19.95 m,胸径 18.2 cm,树冠叶面积 67.60 m<sup>2</sup>),用整树容器法与热脉冲法同步测定表明,两种数值十分接近,并且相关极显著(图 2)。整树容器法的单株日耗水量为 85 541 g,热脉冲法为 77 110 g,为前者的 90.14%。表明热脉冲法的测值基本上可代表实际蒸腾耗水值。

由于 9 月 5 日尚未安装整树容器,故将此日的气孔计测值与热脉冲法测值进行比较(表 1)。可以看出,两种测值变化趋势一致,气孔计测值高于热脉冲法测值,约为后者的 133%~361%,平均比值为 1.70。两种测值的相关关系为:

$$y = 0.8768x - 2.9578$$

$$(r = 0.8338, P < 0.01, n = 9)$$

其中:  $x$ ——气孔计测值( $L \cdot h^{-1} \cdot 株^{-1}$ ),  
 $y$ ——热脉冲法测值/ $(L \cdot h^{-1} \cdot 株^{-1})$ 。

比较结果表明,气孔计蒸腾测值约为热脉冲法测值的 1~3 倍。

## 2.3 气孔计与快称法蒸腾测值的比较

用快称法测定树木蒸腾耗水量,因其投资较少,简便易行,且有一定准确性,故目前仍有应用。叶片离体可能使蒸腾值产生偏差<sup>[4,8]</sup>,但据研究,这种误差一般不会超过 30%(待发表)。用快称法与气孔计在山东、宁夏等地进行多次比较,结果如下:

(1) 1989 年在宁夏永宁县不同供水处理的 4 年生合作杨人工林中,用气孔计与快称法进行同步测定,结果见表 2。可以看出,随着田间供水水平的提高,两种测定的蒸腾值均在上升,但气孔计值上升较快,说明土壤供水对两者的比值有一定影响。供水促进气孔计值的提高,气孔计值一般为快称法测值的 1.3~1.9 倍,平均为 1.50 倍。

表 2 气孔计法与快称法蒸腾测值的比较(1989 年,宁夏永宁)

$g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$

年供水量/mm	06-30 测定			09-14 测定		
	快称法(B)	气孔计法(A)	A/B	快称法(B)	气孔计法(A)	A/B
306	0.884	1.207	1.365	1.100	1.200	1.091
460	0.991	1.899	1.916	1.159	1.564	1.349
615	1.271	2.105	1.656	1.121	1.822	1.625

(2) 1989 年 8~10 月,在山东莒县进行了 3 次共 51 个样品的比较。方法是:在 2 年生鲁克斯杨人工林中,选定一片功能叶,先用气孔计测定上下表面的蒸腾值,然后立即用快称法测定,气孔计值按叶面积换算成全叶上下表面失水量。比较结果表明,气孔计测值始终大于快称法的相应测值,两者存在着极显著的相关关系(表 3)。回归系数  $a$  因环境条件和生长状况而变化,

表 1 气孔计与热脉冲法蒸腾测值的比较(1991-09-05,鲁克斯杨,2 年生)

$L \cdot h^{-1} \cdot 株^{-1}$

时间	热脉冲法(A)	气孔计法(B)	B/A
9:00	2.05	7.41	3.61
10:00	7.03	14.94	2.13
11:00	8.78	14.70	1.67
12:00	11.70	17.77	1.52
13:00	13.88	17.46	1.26
14:00	13.15	19.73	1.50
15:00	15.2	19.95	1.31
16:00	14.33	19.11	1.33
17:00	13.13	12.49	0.95
合计	99.25	143.56	1.70(平均)

生长旺盛期中,晴天回归系数大,云天则小,秋天树木封顶后回归系数更小。在多数情况下,气孔计测值约为快称法的 2~3 倍。

表 3 快称法( $x$ )与气孔计法( $y$ )同叶蒸腾测值的相关分析(1989 年,山东莒县)

日期(月-日)	$r$	$a$	$b$	$n$	气象条件			生长状况
					天气	中午气温/ °C	中午光照/ 10 <sup>4</sup> lx	
08-16	0.863**	8.735	-3.798	10	晴	31	6.0	生长
08-19	0.706**	3.792	-0.464	14	云	28	1.4	生长
10-11	0.932**	2.452	-0.414	27	晴	32	8.0	封顶
合计	0.754**	5.849	-2.989	51				

注:  $y = ax + b$ , \*\* 示  $P < 0.01$ 。

(3) 1991 年 8~9 月在山东沂南县进行了林分(鲁克斯杨, 2 年生)、同类叶、同时间的比较。结果表明: 两种方法的蒸腾日变化节律十分一致, 测值之间相关极显著, 测值变化范围也较稳定, 气孔计测值约为快称法的 2.4~3.2 倍(平均 2.87 倍, 见表 4、表 5)。

表 4 两种方法蒸腾测值的比较(1991 年, 山东沂南)

日期 (月-日)	日间气象因子			日均蒸腾量/( $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )		B/A
	气温/ °C	相对湿度/%	光合有效辐射(PAR)/ ( $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )	快称法(A)	气孔计法(B)	
08-16	31.2	70.0	520	153.46	458.24	2.99
08-17	32.2	56.8	1840	225.79	544.72	2.41
09-05	29.2	59.2	1570	172.95	557.73	3.22

表 5 快称法( $x$ )与气孔计法( $y$ )同类叶蒸腾测值的相关分析(1991 年, 山东沂南)

日期(月-日)	$r$	$a$	$b$	$n$
08-16	0.995**	2.765	474.1	6
08-17	0.821*	2.308	331.9	6
09-05	0.971**	2.649	1260.2	11

注:  $y = ax + b$ , \* 示  $P < 0.05$ , \*\* 示  $P < 0.01$ 。

快称法与气孔计法多次比较表明, 在干旱地区, 气孔计测值约为快称法的 1.3~1.9 倍, 而在较湿润地区, 则为 2.4~3.2 倍; 清晨或傍晚蒸腾低值时, 两者相差较小, 而日间蒸腾高值时相差增大; 阴天、干旱条件下相差较小, 晴天、水分状况良好时相差较大; 树木生长弱时(封顶)相差较小, 旺盛生长时相差较大。

### 3 讨 论

几年来, 在山东、宁夏地区用 3 种方法与气孔计法对比测定不同年龄杨树的蒸腾速率, 结果表明(表 6), 气孔计的蒸腾测值始终高于自然蒸腾速率。如果用气孔计测值直接估算自然条件下的蒸腾耗水, 就会夸大树木的实际耗水量, 显然是不够恰当的。已如前述, 在一定条件下, 气孔计测值与自然蒸腾值相关都很显著, 具有较稳定的比例关系。据此, 我们建议, 鉴于气孔计小巧轻便, 易于观测, 可以用气孔计测定树木蒸腾之后, 再用校正系数进行校正, 使蒸腾耗水值接近实际。校正系数受环境与植物状况的影响, 须用整树容器法、热脉冲法或快称法与气孔计同步比较测定求得, 考虑到蒸腾时空变化的复杂性, 建议用整树整日的耗水值作为基础进行计算。作者总结杨树的校正系数平均约为 0.377 5。即:

自然蒸腾值 气孔计测值  $\times 0.3775$ 

校正系数可因气候、地区而不同, 山东近海较湿润地区为 0.4065, 宁夏干旱区为 0.6452。

表 6 气孔计与 3 种方法蒸腾测值的比较

时间(年-月)	地点	树种	树龄/a	对照方法	气孔计值/对照值	测定样本数
1991-09	山东沂南	鲁克斯杨	2	整树容器法	2.91	264
1991-09	山东沂南	鲁克斯杨	2	热脉冲法	1.45	90
1989-06	宁夏永宁	合作杨	4	快称法	1.65	72
1989-09	宁夏永宁	合作杨	4	快称法	1.36	72
1989-08	山东莒县	鲁克斯杨	2	快称法	6.26	48
1989-10	山东莒县	鲁克斯杨	2	快称法	2.45	54
1991-08	山东沂南	鲁克斯杨	2	快称法	2.70	144
1991-09	山东沂南	鲁克斯杨	2	快称法	3.22	72
1991-09	山东沂南	鲁克斯杨	2	快称法	2.96	102
1992-08	山东沂南	鲁克斯杨	1	快称法	1.53	108
					平均 2.649	$\Sigma=1026$

因此, 应根据本地气候条件, 并考虑植物生长状况, 对校正系数作适当的调整。此种校正, 可使蒸腾耗水估计值进一步接近实际值。

关于气孔计测值高的原因, 考虑有两个因素: 一是干燥空气的导入, 可能对气孔产生瞬间刺激; 二是仪器叶室的界面层阻力较小, 一般稳定在  $0.15 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 使叶室处于微风之中, 迅速提高了局部叶面的蒸腾速率, 这可以称之为气孔计叶室对蒸腾的增效作用。这种作用对不同蒸腾状况的叶片, 可能产生不同程度的效果。对于天气晴朗、水分状况良好、生长旺盛、蒸腾处于高值的叶片, 增效很显著, 可使蒸腾值提高 2~3 倍; 而在土壤干旱、光照不足(阴天、傍晚等)、树木封顶等情况下蒸腾处于低值的叶片, 增效作用较小。由此可见, 气孔计对叶片的增效作用与植物的生理状况关系甚大, 在测定和校正时应予注意。

## 参考文献:

- [1] 杨文斌, 蒋士梅. 半干旱地区四种针叶林蒸腾作用的研究[J]. 生态学杂志, 1991, 10(3): 18~21.
- [2] 刘奉觉, 郑世锴, 臧道群, 等. 干旱地区深栽杨树的水分优势与几个树种水分生理指标的比较[J]. 甘肃林业科技, 1988, (1): 1~9.
- [3] 刘奉觉, 郑世锴, 臧道群. 杨树人工幼林蒸腾变异与耗水量估算方法的研究[J]. 林业科学, 1987, 23(营林专辑): 35~44.
- [4] 刘奉觉. 杨树叶片离体前后蒸腾速率的变化[J]. 植物生理学通讯, 1990, (1): 157~159.
- [5] Roberts J. The use of tree-cutting technique in the study of water relation of mature *pinus sylvestris* L. [J]. J Exp Bot, 1977, 28: 751~767.
- [6] 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.
- [7] 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升, 等. 树木蒸腾耗水测定技术的比较研究[A]. 见: 中国植物生理学会. 全国植物环境生理会议论文汇编[C], 1994, 51.
- [8] 刘奉觉. 用快速称重法测定杨树蒸腾速率的技术研究[J]. 林业科学研究, 1990, 3(2): 162~165.

## A Comparison on the Transpiration Values Measured with Steady State Porometer and Other Three Methods

JU Guan-sheng<sup>1</sup>, LIU Feng-jue<sup>1</sup>, ZHENG Shi-kai<sup>1</sup>,

WU Xiao-chun<sup>2</sup>, RU Cheng-xiang<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091, China;

2. Bureau of Forestry of Yinan County, Yinan 276300, Shandong, China)

**Abstract:** From 1989 to 1992, quick-weighting method, heat-pulse technique, whole-tree potometer were applied for many times together with steady state porometer to measure the transpiration of the poplar forests in Ningxia (*Populus × xiaozhuanica* cv. 'Opera') and in Shandong (*Populus deltoides* cv. 'Lux'). The results showed that the values measured with steady state porometer were always higher than the actual values of transpiration while the values measured with the other three methods were believed to be close to the latter. The former were 1.3~3.2 (2.649 on average) times as high as the latter, varying with weather and plant conditions. So, the former values need to be adjusted with a coefficient. The correction coefficient would approximately be 0.3775 on an average, with 0.6452 in arid area and 0.3407 in more humid area.

**Key words:** steady state porometer; quick-weighting method; heat-pulse technique; whole-tree potometer; technique for measuring transpiration; water-consumption of transpiration