

用空气动力学原理测算树木 蒸腾速率的初步探讨*

刘 奉 觉

(中国林业科学研究院林业研究所)

关键词 树木蒸腾速率; 蒸腾测定方法

蒸腾速率是树木重要的水分生理指标, 它携带着耗水信息^[1]。到目前为止, 测定蒸腾的方法已有很多, 如大棚法、蒸渗仪法、树干液流法、微气候法和气孔计法等。但每种方法都有一定局限性, 不是耗资太高, 就是不适用于自然条件下的耗水估算。快速称重法简便易行, 已延用数十年。我们最近发现, 杨树叶离体后蒸腾速率偏离原先水平, 在不同水分状态下, 偏离方式与程度各异^[2,3]。而陶大立等对长白山树木测定发现叶片离体后蒸腾持续下降^[4]。这些结果增加了该方法估算耗水量的复杂性。能否找到一种既不破坏树木又能较准确地估算林木蒸腾速率的方法? 本试验在这方面做了一些尝试。以 Norman J. M. 的工作为基础^[5], 进行了一些比较测定。现报道以供参考。

一、试 验 原 理

树木叶中的液态水从叶肉细胞表面蒸发变成水汽, 经过细胞间隙和气孔, 散失到大气中的过程, 称为蒸腾作用。这个过程的原动力是叶内间隙水势与大气水势的差值。根据空气动力学关于水汽扩散的理论, 树木的蒸腾通量应为:

$$T_r = \frac{C_L - C_a}{r_s + r_a} \quad (1)$$

式中 T_r 为蒸腾通量, 即蒸腾速率(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); C_L 与 C_a 分别为叶气孔室与叶表面层的水汽浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); r_s 和 r_a 分别为气孔阻抗和界面层阻抗($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)。为了测定与计算方便, 将水汽浓度换算成水汽分压(单位: mb 或 hPa), 则(1)式可改写为:

$$T_r = \frac{\rho_a \frac{M_w}{M_{aw}}}{P(r_s + r_a)} (e_L' - e_a) \quad (2)$$

式中 ρ_a 为空气密度(按 $1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 计); M_w 为水分子量(为18); M_{aw} 为空气分子量(约29); P 为大气压(按999 mb 计); r_s 为气孔阻抗(单位: $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); r_a 为界面层阻抗(单位:

本文于1990年2月3日收到。

*本研究承王世绩研究员与郑世谱副研究员的热情支持, 韩泽民、吕爱香、臧道群、寇宗军、蔺云霄、刘雅荣、杨炳才、王永江等同志参加部分工作, 谨此一并致谢。

$s \cdot m^{-1}$); e_L' 为叶气孔下腔的饱和水汽压(单位: mb), e_a 为界面层水汽压(单位: mb)(亦可用大气水汽压 e_a)

$$\text{数值代入(2)式中的 } \frac{\rho_a M_w}{M_{aw} P} = \frac{1.2 \times \frac{18}{29}}{999} = 0.745 \times 10^{-3}$$

根据物理化学手册, 水在20℃时的蒸发潜热为 $2.45 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 30℃时为 $2.43 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

$$\text{因此 } T_r = \frac{0.745 \times 10^{-3}}{r_s + r_a} (2.45 \times 10^3)(e_L' - e_a)$$

水量以 mg 表示, 则

$$T_r = \frac{1825}{r_s + r_a} (e_L' - e_a) \quad [\text{单位: } \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

式中的常数(1825)因气温、气压及空气密度的变化而有微小改变, 在一定条件下是恒定的。只要测得 r_s 、 r_a 、 e_L' 与 e_a , 即可根据(3)式计算出树木每平方米叶面积每秒钟蒸腾水分的毫克数。这4个参数按下列方法求得:

1. r_s 气孔阻抗, 用气孔计直接测定, 或用其它方法推算。
2. r_a 界面层阻抗用下式计算:

$$r_a = 180 \sqrt{\frac{D}{V}} \quad (4)$$

式中 V 为风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), D 为叶直径(可用叶长与叶宽的平均值)。

$$3. e_L' = 6.108 \times 10^{\left(\frac{7.5t}{237.3+t}\right)} \quad (5)$$

$$4. e_a = e_L' \times RH \quad (6)$$

(5)式 T 为叶温(℃); (6)式 RH 为环境相对湿度(%)。

综上所述, 如果在田间测定了树木的气孔阻抗、单叶面积(或长与宽)、叶温、气温、相对湿度和风速, 就可以根据(3)~(6)式计算出叶片的蒸腾速率^[6]。

二、试验材料、方法与结果

试验一 1984年5月下旬在山东省莒县中国林科院试验点上进行。以2~3年生 I-69 杨(*Populus deltoides* Bartr. cv. "Lux" ex. I-69/55) 树冠南面中部的小枝或功能叶为试材, 将已知渗透势的蔗糖溶液¹⁾ 装入50 ml 的三角瓶。其中插入在水中剪取的单叶(或小枝), 密封瓶口, 置室外阳光下, 用快速天平称取一定时间的失水量, 同时用 L1-1600 稳态气孔计测定叶的气孔阻抗(上、下两表面)、叶温、气温、相对湿度以及风速和叶面积, 按(3)~(6)式计算出叶的蒸腾速率, 并与实际蒸腾速率相比较^[2](表1)。可以看出, 在试验水势范围内, 用空气动力学原理测算的蒸腾速率与实际蒸腾速率很接近, 相对误差在10%以下, 说明这种测算方法可以得到较好的结果。

1) 试验时没有买到PEG, 考虑到蔗糖是植物营养物质, 且无毒性, 故采用之。

表 1

用空气动力学原理的测算值与实际蒸腾值的比较

(山东省莒县, 1984.5.28~29)

测定时间 (月·日·时)	插液水势 (MPa)	重复号	空气动力学参数与蒸腾速率								实际蒸腾速率 ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误差 (%)	
			叶总阻抗 r_a ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	风速 V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	叶直径 D (m)	界面层阻抗 r_a ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	叶温 t ($^{\circ}\text{C}$)	叶内饱和水汽压 $e_{L'}$ (mb)	空气相对湿度 RH (%)	大气水汽压 e_{at} (mb)			蒸腾速率 ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
5-29 9:30~	0	1	212	0.01	0.05	402.5	24	29.83	65	19.39	3.10	3.36	-7.7
		2	249	0.01	0.05	402.5	24	29.83	65	19.39	2.92	3.01	-3.0
		3	307	0.01	0.05	402.5	24	29.83	65	19.39	2.69	2.59	3.9
		4	249	0.01	0.05	402.5	24	29.83	65	19.39	2.92	3.28	-11.0
		5	272	0.01	0.06	440.9	24	29.83	65	19.39	2.67	2.79	-4.3
10:30	-0.07	6	195	0.01	0.05	402.5	24	29.83	65	19.39	3.02	3.22	-6.2
		7	215	0.01	0.05	402.5	24	29.83	65	19.39	3.09	2.98	3.7
		8	188	0.01	0.05	402.5	24	29.83	65	19.39	3.23	3.43	-5.8
		9	225	0.01	0.05	402.5	24	29.83	65	19.39	3.04	2.81	8.2
		10	241	0.01	0.06	440.9	24	29.83	65	19.39	2.79	2.62	6.5
5-29 8:30~ 9:30	-0.07	6	362	0.01	0.05	402.5	22	26.43	75	19.82	1.58	1.61	-1.9
		7	355	0.01	0.05	402.5	22	26.43	75	19.82	1.59	1.56	1.9
		8	312	0.01	0.05	402.5	22	26.43	75	19.82	1.69	1.84	-8.2
		9	305	0.01	0.05	402.5	22	26.43	75	19.82	1.71	1.62	5.5
		10	380	0.01	0.06	440.9	22	26.43	75	19.82	1.47	1.46	0.7
5-28 9:30~ 11:30	-0.29	7	1017	0.05	0.05	180	28	37.79	60	22.67	2.31	2.17	6.5
		8	519	0.05	0.05	180	28	37.79	60	22.67	3.95	3.85	2.6
		9	845	0.05	0.06	197	28	37.79	60	22.67	2.65	2.53	4.7
		10	1351	0.05	0.05	180	28	37.79	60	22.67	1.80	2.02	-10.9

试验二 1987年8月11日在甘肃省金塔县潮湖林场3年生的二白杨-胡杨-沙枣混交林中进行,天气晴,气温 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$,中午的光合有效辐射为 $1800\sim 1900\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。取样与测定部位一般为树冠阳面中部侧枝由顶向下第4~6片叶。用快速称重法测定蒸腾速率^[6],重复6次;用L1-1600气孔计测定叶的气孔阻抗(上、下表面)、叶温、气温、相对湿度、风速以及叶长与叶宽^[6],按(3)~(6)式计算蒸腾速率并与快速称重法进行比较(表2)。可以看出,11时的两种方法的误差较小,胡杨、沙枣仅为2%左右,二白杨稍大一些为18%;但20时的相对误差很大,达到50%左右,这与测定前刮起一阵突然的风暴有关,风暴使扩散阻抗和蒸腾速率出现异常,蒸腾锐减,阻抗剧增^[6]。本次试验结果说明,空气动力学测算值与快速称重法测定值有时比较接近,有时误差很大。两者不一致的原因是由于快速称重法的离体蒸腾偏差所引起,还是空气动力学测算偏差所造成,或二者兼而有之?目前尚不清楚。说明野外比较测定技术需要改进。

以上结果仅仅显示出用空气动力学原理测算树木蒸腾速率的可能性。由于野外条件复杂,气候、土壤、植物种类变化很大,测定技术尚需改进。因此,还要进行大量的研究,才能使这个方法趋于成熟。

表 2

两种方法蒸腾测定值的比较

(甘肃省金塔县, 1987·8·11)

树 种	测定 时间 (时)	空气动力学参数与蒸腾速率									快 速 称 重 法 蒸 腾 速 率 ($g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)	相 对 误 差 (%)
		叶 总 阻 抗 r_s ($s \cdot m^{-1}$)	风 速 V ($m \cdot s^{-1}$)	叶 直 径 D (m)	界 面 层 阻 抗 r_a ($s \cdot m^{-1}$)	叶 温 t ($^{\circ}C$)	叶 内 饱 和 水 汽 压 e_i' (mb)	空 气 相 对 湿 度 RH (%)	大 气 水 汽 压 e_{at} (mb)	蒸 腾 速 率 ^① ($g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)		
二 白 杨	11	85.2	0.01	0.02	254.5	29.6	41.46	50	20.73	1.387	1.175	18.0
	20	852.4	3.80	0.02	13.1	27.0	35.65	30	10.70	0.655	0.424	54.5
胡 杨	11	80.1	0.01	0.02	254.5	28.9	39.82	50	19.91	1.352	1.322	2.3
	20	570.6	3.80	0.02	13.1	24.2	30.19	30	9.06	0.823	0.576	42.9
沙 枣	11	90.8	0.01	0.02	254.5	30.4	43.41	50	21.71	1.429	1.400	2.1
	20	2626.9	3.80	0.02	13.1	25.9	33.41	30	10.02	0.201	0.395	-49.1

①由叶重与叶面积的关系换算出单位叶重的蒸腾值。

参 考 文 献

- [1] 刘奉觉等, 1986, 杨树几个水分关系指标的主分量分析, 植物生理学通讯, (3), 13~16.
- [2] 刘奉觉, 1990, 杨树叶片离体前后蒸腾速率的变化, 植物生理学通讯, (1), 57~59.
- [3] 刘奉觉, 1990, 用快速称重法测定杨树蒸腾速率的研究, 林业科学研究, 3(2), 162~165.
- [4] 陶大立等, 1989, 长白山树木蒸腾和气孔阻力的日变化, 植物生理学通讯, (3), 22~25.
- [5] Norman, J. M., 1986, Instrumentation use in a comprehensive description of plant-environment interactions, In: Advanced agricultural instrumentation (Gensler, W. G. ed.) Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers, 249~266.
- [6] 刘奉觉等, 1988, 干旱地区深栽树木的水分优势和几个树种水分生理指标的比较, 甘肃林业科技, (1), 1~9.

A PRELIMINARY APPROACH TO THE DETERMINATION OF TRANSPIRATION RATE IN TREES BY AERODYNAMICS

Liu Fengjue

(The Research Institute of Forestry CAF)

Abstract This paper recommended the principle and technique for determining transpiration rate in trees by aerodynamics. The result has showed that the method is feasible for determination in the field. Some further studies are needed.

Key words transpiration rate; method for determining transpiration