

# 热带人工混交林蒸散测定的初步分析

黄录基 李国琛 陈琍 张绍贤

(广州地理研究所)

## 摘 要

本文根据 1984年 6月 8—20日在广东省小良热带人工林进行的蒸散测定, 采用空气动力学方法、通用函数—图解法和热量平衡法, 计算了逐时蒸散量, 並表明前二种方法比后一种方法效果好些。讨论了蒸散与湍流交换系数、湿度梯度的关系, 得到有意义的结果。为研究热带人工混交林水量平衡提供了一定的理论依据。

## 一、前 言

林木通过叶的气孔和叶表皮角质层把吸收的水分大部分以汽态散发到大气中, 植物这种蒸腾也是一种蒸发现象。在森林中, 林地的蒸发和植物的蒸腾是同时发生的过程, 森林的这种蒸发蒸腾作用称为蒸散 (evapotranspiration)。蒸散是基本的输出变量。在植物群体中, 只有当水分的蒸发和蒸腾处于正常进行的状态下, 才有可能得到良好的生产能力。因此, 蒸散的测定研究, 对于如何提高植物的累积能力、探索植物的需水规律、改进森林生态系统的水分循环以及在森林的水源涵养方面, 都具有十分重要的意义。

由于蒸散现象的复杂性, 森林蒸散面高, 厚度大以及不均匀等, 致使蒸散测定工作极为困难。小良热带人工森林蒸散研究是由中国科学院华南植物研究所主持, 广州地理研究所参加的协作项目。我们曾在1982年7月至1983年7月各季节代表月份进行过林冠蒸散测定, 采用能重平衡法, 取得了1、4、7、10月各月蒸散量<sup>[3]</sup>。在此工作基础上, 1984年6月, 我们在原测点附近建造了气象铁塔, 增加了若干仪器, 对蒸散测定作进一步的研究。确定蒸散的方法很多, 有理论推导、经验估算方法以及直接的器测法等。国内森林蒸散测定工作甚为薄弱, 其方法研究更为罕见。本文根据1984年6月的梯度观测资料, 采用多种估算蒸散的理论方法进行试验, 其中有三种方法得到较好的结果, 取得了较为精确的蒸散量日变化, 为人工森林生态系统的水份循环研究, 提供可靠的数据。

## 二、方 法

### (一)、空气动力学方法

水汽量、热量和动量的湍流扩散通量方程通过积分后得到

$$E = - \frac{P \varepsilon}{P_a} K_v \frac{e_2 - e_1}{Z_2 - Z_1} \quad (1)$$

$$H = - PC_p K_h \frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} \quad (2)$$

$$\tau = PK_m \frac{U_2 - U_1}{Z_2 - Z_1} \quad (3)$$

式中,  $K_v$ 、 $K_h$ 、 $K_m$ 分别为水汽、热量和动量的湍流交换系数,  $P$ 为空气的密度,  $\varepsilon$ 为水的分子量与空气分子量之比,  $C_p$ 为空气的定压比热,  $P_a$ 为大气压,  $q$ 为比湿,  $e$ 为水汽压,  $T$ 为空气温度,  $U$ 为水平风速。

假定各项湍流扩散系数都相等, 即  $K_v = K_h = K_m = K$ , 于是由方程(1)、(2)推导出水汽和显热通量方程为

$$E = \frac{P \varepsilon k^2 (U_2 - U_1) (e_2 - e_1)}{P_a \left(1 + \frac{Z_2 - d}{Z_1 - d}\right)^2} \quad (4)$$

$$H = \frac{PC_p k^2 (U_2 - U_1) (T_2 - T_1)}{\left(1 + \frac{Z_2 - d}{Z_1 - d}\right)^2} \quad (5)$$

其中,  $k$ 为卡曼常数,  $d$ 为零平面位移。方程(4)、(5)只适用于在完全强迫对流的条件下。在稳定和不稳定的条件下, 须有稳定度函数给予订正。根据A. S. Thom的推导<sup>[2]</sup>, 水汽和热量交换的广义通量方程可表示为

$$\lambda E = - \left(\frac{PC_p}{\gamma}\right) k^2 (Z-d)^2 \frac{\delta U}{\delta Z} \frac{\delta e}{\delta Z} (\phi_v \phi_m)^{-1} \quad (6)$$

$$H = - PC_p k^2 (Z-d)^2 \frac{\delta U}{\delta Z} \frac{\delta T}{\delta Z} (\phi_h \phi_m)^{-1} \quad (7)$$

这里,  $\phi$ 为无量纲的稳定度函数, 在稳定条件下, 取  $\phi_v = \phi_h = \phi_m = (1 - 5R_i)^{-1}$ ; 在不稳定条件下, 取  $\phi_v = \phi_h = \phi_m = (1 - 16R_i)^{-\frac{1}{2}}$ , 其中  $R_i$ 为里查逊数,  $\phi$ 是  $R_i$ 的特定

(二) Paulson-Badgley 通用函数-图解法  
 动量、热量和水汽的湍流扩散系数可表示为

$$K_m = \frac{\tau}{\rho} / \frac{\delta U}{\delta Z} = \frac{kZU_*}{\varphi_m \left( \frac{Z}{L} \right)} \quad (8)$$

$$K_h = -\frac{H}{\rho C_p} / \frac{\delta \theta}{\delta Z} = \frac{kZU_*}{\varphi_h \left( \frac{Z}{L} \right)} \quad (9)$$

$$K_q = -\frac{E}{\rho} / \frac{\delta q}{\delta Z} = \frac{kZU_*}{\varphi_q \left( \frac{Z}{L} \right)} \quad (10)$$

其中,  $\tau$ 、 $H$ 、 $E$ 分别为动量、热量和水汽的通量,  $\theta$ 和 $q$ 为位温和比湿,  $U_*$ 为摩擦速度,  $L$ 为湍流混合的铅直尺度。

根据在近地层动量、热量和水汽的通量不随高度变化的假设, 对(8)、(9)和(10)式分别积分, 则有

$$\tau = \frac{\rho k U_*}{\int_{z_1}^{z_2} \frac{\varphi_m \left( \frac{Z}{L} \right)}{Z} dz} (U_2 - U_1) \quad (11)$$

$$H = \frac{\rho C_p k U_*}{\int_{z_1}^{z_2} \frac{\varphi_h \left( \frac{Z}{L} \right)}{Z} dz} (\theta_1 - \theta_2) \quad (12)$$

$$E = \frac{\rho k U_*}{\int_{z_1}^{z_2} \frac{\varphi_q \left( \frac{Z}{L} \right)}{Z} dz} (q_1 - q_2) \quad (13)$$

在(11)~(13)式中的  $kU_* \int_{z_1}^{z_2} \frac{\varphi_m \left( \frac{Z}{L} \right)}{Z} dz$ ,

$$kU_* \int_{z_1}^{z_2} \frac{\varphi_h \left( \frac{Z}{L} \right)}{Z} dz \quad \text{和} \quad kU_* \int_{z_1}^{z_2} \frac{\varphi_q \left( \frac{Z}{L} \right)}{Z} dz$$

分别称作动量、热量和水汽的积分湍流系数<sup>[4]</sup>。

陈万隆等根据A. C. Моңин 和A. M. Обухов 的相似理论, 利用梯度观测资料 和C. A. Paulson 和 F. I. Badgleg 提出的通用函数, 设计了一种查算上述积分湍 流系数的图解, 同时给出计算式为<sup>[4]</sup>:

$$\tau = 1.29 \Phi_{1,3} (U_2 - U_1) \quad \text{千克/米} \cdot \text{秒}^2 \quad (14)$$

$$H = 1.858 \Phi_{1,2} (\theta_1 - \theta_2) \quad \text{卡/厘米}^2 \cdot \text{分} \quad (15)$$

$$\lambda E = 2.874 \Phi_{1,2} (e_1 - e_2) \quad \text{卡/厘米}^2 \cdot \text{分} \quad (16)$$

其中

$$\Phi_{1,3} = \begin{cases} \Phi_1 & \frac{Z}{L} \geq 0 \\ \Phi_3 & 0 \geq \frac{Z}{L} \geq -2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\Phi_{1,2} = \begin{cases} \Phi_1 & \frac{Z}{L} \geq 0 \\ \Phi_2 & 0 \geq \frac{Z}{L} \geq -2 \end{cases} \quad (18)$$

实际应用时, 利用风速与温度的梯度观测资料, 在列线图上直接确定积分湍流系数 $\Phi$ , 再按(14)~(16)式计算出动量, 热量和潜热的湍流铅直输送通量。

(三)关于能量平衡法, 我们在过去的文献中<sup>[3]</sup>已有叙述。本文在应用此方法 时, R用净辐射仪测定, G用地中热流计测定,  $\beta$ 通过遥测通风干湿球表来测量计算。

### 三、观测条件

测点位于广东电白县小良水土保持试验推广站的贵山岭, 该处地势平缓, 为热带人 工多层多种阔叶混交林所复盖, 上层乔木树种有沙撈 (*Aphanamixis polystachya*)、 大叶相思 (*Acacia auriculaeformis*)、麻楝 (*Chukrasia tabularis*) 和油榄仁 (*Ter minalia bellirica*) 等; 林下灌木有黄杞子 (*Gardenia jasminoides*) 和鸡藤 (*Calamus bonianus*) 等; 地被层为禾本科草类。平均林高约8米, 林龄8—10年, 林冠郁闭 度约0.7。测点离上风方向林缘大于200米。

在铁塔的不同高度上, 分别对风速(6.0, 7.5, 10.5, 16.5和25.0米等)、气温和 湿度(1.5, 4.5, 7.5, 和10.5米)、净辐射和气压(7.5米)等进行了连续测定; 在铁 塔周围的SE、NW和NS等方向林地下(约10厘米深处)分别埋没了土壤热流板。温度 层结是用MC-10型大气稳定度仪进行自动连续测定。从1984年6月8日至20日, 基本 上每隔一小时测量一次, 每次测量时间为10分钟。

在观测期间, 前期的天气晴朗, 后期天气转阴, 多雨, 观测工作时被中断。

## 四、结果分析

空气动力学参数 $d$ 和 $Z_0$ 采用实验方法来确定,即利用中性风梯度观测资料,经反复试验,由 $\ln(Z-d)$ 与实测的 $U_z$ 的直线关系得到, $d=6.2$ 米, $Z_0=0.26$ 米。零平面位移与林冠平均高度的关系为: $d=0.82h$ 。Jarvis等曾归纳13块森林(高度为10—28米)中的研究结果,得出 $d/h$ 值的范围从0.61—0.92<sup>[1]</sup>。

蒸散测定取得的数据资料采用空气动力学法、热量平衡法以及 Paulson-Badgley 通用函数-图解法计算。计算的结果表明,在6月8日至20日期间,平均日蒸散量为4.3毫米,最大日蒸散量达6.0毫米。1982年7月我们曾应用热量平衡法测定并计算得到日平均值为4.7毫米/日,最大值为8.3毫米/日<sup>[9]</sup>。从平均日蒸散量来看,两次测定的结果接近。

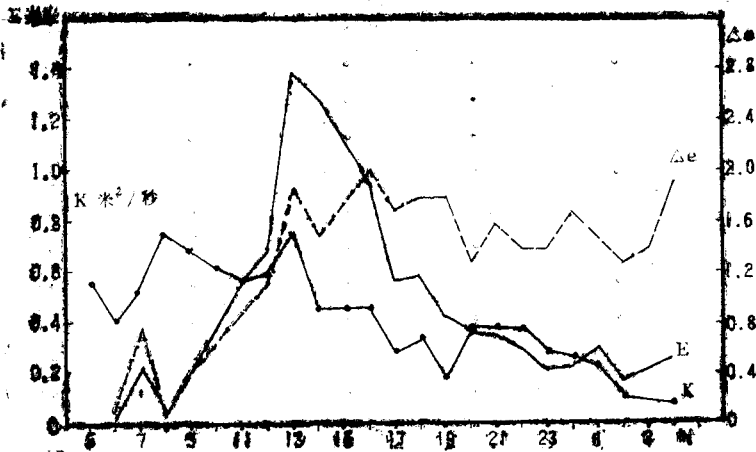


图1 蒸散(E)与湍流交换系数(K)、湿度梯度( $\Delta e$ )的关系(小良人工阔叶混交林, 1984. 6. 13)

Fig. 1 Correlation of evapotranspiration (E) with turbulence coefficients (K), humidity gradient ( $\Delta e$ ) (In the artificial forests in Xiaoliang, Guangdong, 13 June 1984)

图1为小良热带人工阔叶混交林蒸散量以及冠面上湿度梯度、湍流交换系数的日变化。可以看出,蒸散量的最大值出现在13点,即正午稍后的时间,最小值出现在下半夜。一般在比较干燥的地段,蒸发最高值偏向上午出现,因为午后湍流虽有发展,但是由于土壤上层干化,可供蒸发的水分减小。图1说明了小良阔叶混交林的水分状况是比较湿润的;午前湍流运动已相当发展,但湿度梯度偏小,所以蒸散作用还较弱,午后

$\Delta e$ 一直维持较高的水平, 然而湍流已逐渐减弱, 故蒸散量的最高值出现在 $\Delta e$ 与 $K$ 同时偏大的正午时刻。

表 1 用三种方法计算的逐时蒸散量\*

Table 1 Hourly evapotranspiration capacity calculated by three methods

时间 (时) time (hours)	日期 date	1984.6.9			1984.6.10		
		空气动力学法 aerodynamic method	图解法 diagram method	热量平衡法 method of heat balance	空气动力学法 aerodynamic method	图解法 diagram method	热量平衡法 method of heat balance
		方法 method					
7		—	—	0.02	—	0.01	0.05
8		0.07	0.10	0.09	0.02	0.18	0.17
9		0.01	0.14	0.51	—	—	0.27
10		0.01	0.06	0.38	0.24	0.19	0.19
11		0.04	0.31	0.67	—	—	—
12		0.26	0.43	0.76	0.23	0.35	0.72
13		0.35	0.48	0.81	0.21	0.22	0.80
14		0.62	0.64	0.70	0.12	0.22	0.62
15		0.47	0.45	0.65	0.24	0.32	0.72
16		—	—	0.42	0.24	0.24	0.30
17		0.24	0.21	0.27	0.02	0.02	0.06
18		0.18	0.17	0.03	0.02	0.01	0.01
19		0.05	0.06	0.04	0.01	—	0.13
20		0.00	0.02	0.05	0.04	0.01	0.07
21		—	—	0.10	0.01	—	0.07
22		—	—	0.03	—	—	0.05
23		—	—	0.06	—	—	0.04

\* 表中数字的单位为毫米 (mm)

表 1 给出用三种方法计算的逐时蒸散量的比较, 说明了几种方法计算的结果存在一定的差异, 即空气动力学法和 Paulson-Badgley 通用函数-图解法所得的结果, 较为相近, 它们与热量平衡法所得的结果相差较大。我们认为, 在小良地区, 采用热量平衡法估算人工林的时蒸散量的数值可能偏大。当然, 我们仍不能排除诸方法本身误差的影响。

微气象学方法需要建立在一些重要的假设之上, 即认为假定蒸发面是相当广泛而均质的, 水汽扩散是垂直的一维输送, 水汽、显热和动量的湍流交换系数是相等的。事实

上要完全满足这些假设还相当困难。上述的理论假定及实际测定中的问题，都有待于今后进一步的研究。

### 参 考 文 献

- [1] 马钦彦, 1982: 研究森林与大气间CO<sub>2</sub>交换的微气象学法(综述)。北京林学院学报, 1期, 59—85页。
- [2] 王天铎主编, 1982: 植物群体的动量, 质量和热量交换。光合作用与作物生产译丛, (4), 133—165页。
- [3] 李国琛等, 1984: 小良热带人工阔叶混交林林冠蒸散测定研究。热带亚热带森林生态系统研究, 第2集, 122—131页。
- [4] 陈万隆等, 1983: 一种查算积分湍流系数的图解。南京气象学院学报, 1期, 127—137页。
- [5] Panolfo, J.P., 1966: *J. Atmos. Sci.* 23: 495—502.
- [6] Webb, E.K., 1970: *Quart. J. R. Met. Soc.* 96: 67—90.
- [7] Werner, J. 1980: Ein Vereinfachter Verfahren zur Bestimmung der Aktuellen Evapotranspiration von Waldbeständen. *Wasserwirtschaft*, 70 (7—8): 270—274.

## AN ANALYSIS OF THE EVAPOTRANSPIRATION IN THE TROPICAL ARTIFICIAL MIXED-FOREST IN XIAOLIANG, GUANGDONG

Huang Lu-ji    Li Guo-shen    Chen Li    Zhang Shao-xian

(*Guangzhou Institute of Geography*)

### Abstract

Based on the evapotranspiration in the tropical artificial mixed-forest from 8th June to 20th June, 1984 in Xiaoliang, the hourly evapotranspiration capacity has been calculated by the methods of aerodynamics, universal function-diagram, and heat balance respectively. The two former methods are more effective than the later. Some reasonable results are obtained from the discussion of the correlation of evapotranspiration to turbulence coefficients and humidity gradient. The analysis provides a theoretical ground for studying the hydrological balance of tropical artificial mixed-forest.