

刺槐日蒸腾过程的 Penman-Monteith 方程模拟

贺康宁¹, 田 阳¹, 张光灿²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083; 2. 山东农业大学林学院, 泰安 271018)

摘要:研究半干旱地区林木的实际蒸腾量, 对研究防护林密度调控、提高林木水分利用率及林分稳定有着重要的理论意义。试验地位于山西省方山县的北京林业大学径流林业试验场(北纬 37°36'58", 东经 110°02'55")。试区平均海拔 1200m, 多年平均降水量 416mm, 水面蒸发 1857.7mm。研究试验林为 1986 年春季造林的刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.), 6 种造林密度(830~3330 株/hm²), 郁闭度 0.85~0.9。研究的主要思路是: 如忽略大气热层结问题, 考虑气压订正, 并用冠层整体气孔阻力 r_{c} 代换冠层阻力 r_{c} , 将蒸散面净辐射限定于冠层截留净辐射 R_{nl} , 便可在林木气孔阻力等实测数据的基础上, 应用修改后的 Penman-Monteith 公式并使用常规气象数据进行生长季林木蒸腾量的连续计算。研究通过各月 R_{nl} 和叶面积指数 LAI 的实地观测资料统计计算出了不同月份林冠的消光系数 k , 进而确定了由 R_{nl} 、 k 和 LAI 计算 R_{nl} 日变化的关系式; 以各月典型天气实测的蒸腾量和冠层中部的平均单位叶片气孔阻力数据为依据(由 LI-1600 稳态气孔计测定), 采用反推法并适度精度调整后推算出由 LAI 和 r_{c} 计算冠层整体气孔阻力 r_{c} 的经验系数 K' 值。经与典型实测结果对比, 模拟的相对误差平均在 12% 以内。最后, 采用常规气象数据及由此计算出的 R_{nl} , 进行了刺槐林分全年连续日蒸腾模拟估算, 结果是 1998 年、1999 年和 2000 年 5~10 月生长季不同密度刺槐林的平均总蒸腾量分别为 192mm、187mm 和 196mm。

关键词: 刺槐; 蒸腾; 净辐射; 叶面积指数; 消光系数; 气孔阻力

Modeling of the daily transpiration variation in locust forest by Penman-Monteith equation

HE Kang-Ning¹, TIAN Yang¹, ZHANG Guang-Can² (1. Soil and Water Conservation and Combating Desertification Key Lab. of MOE, China, College of Soil and Water Conservation, Beijing For. Uni., Beijing 100083, China; 2. Forestry College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 251~258.

Abstract: It is necessary to study on the real transpiration of forests in growth seasons, to solve the problems of adjusting forest density, improving water use efficiency and maintaining forest stability of the shelter forest in semiarid area. The experimental site in this study locates at Runoff Forestry Experimental Station of Beijing Forestry University in Fangshan, Shanxi (north latitude 37°36'58", east longitude 110°02'55"). It has an average altitude of 1,200 m, average precipitation of 416 mm and average potential

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39970622); 教育部高等院校青年骨干教师科研专项基金资助项目

收稿日期: 2001-06-14; **修订日期:** 2002-05-20

作者简介: 贺康宁(1962~), 男, 博士, 教授。主要从事水土保持专业林业生态工程建设抗旱造林技术研究。E-mail: hekangning@yahoo.com.cn

Foundation item: Supported by the Natural Science Foundation of China(No. 39970622) and the Teaching and Research Award Program for Young Cadreman Teachers in Higher Education Institutions of MOE, P. R. China

Received date: 2001-06-14; **Accepted date:** 2002-05-20

Biography: HE Kong-Ning, Ph. D. Professor. Main research on the field of soil and water conservation and dry combating afforestation of forestry ecological engineering. E-mail: hekangning@yahoo.com.cn

evapotranspiration of 1857.7 mm. The experimental materials, the black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) forests were planted in spring of 1986, with six different densities from 830 to 3330 tree/hm² and the canopy closure degree of 0.85~0.9. The principle ideas of the study were as follows. If omitting the atmospheric thermal stratification, correcting air pressure, replacing the canopy layer stomatic resistance r_i with the canopy integral stomatic resistance r_{iT} , and limiting the net radiation R_n with the canopy intercepted net radiation R_{ni} in Penman-Monteith equation, the forestry transpiration in growth season could be calculated continuously with the measured stomatic resistance data and general weather data. In this study the monthly canopy radiation extinction coefficient k was firstly calculated with the monthly data of R_n and leaf area index LAI . The daily variational model of R_{ni} was then derived on the basis of R_n , k and LAI . According to the practical transpiration measured in typical day of each month and the unit surface leaf stomatal resistance r_s in the middle part of the canopy measured with LI-1600 Steady Porometer, K' , the empirical coefficient to calculate r_{iT} together with LAI and r_s was determined. When comparing with the typical measured data, the average relative error of this modeled was found to be less than 12%. Finally the total average transpiration of the Black Locust forests in growth seasons (May to October) during the period of 1998 to 2000, as an average transpiration of the different density stands, was simulated as 192.46 mm, 187.07 mm and 195.59 mm respectively.

Key words: black locust; transpiration; net radiation; leaf area index; extinction coefficient; stomatic resistance

文章编号:1000-0933(2003)02-0251-08 中图分类号:P463.22+2,S715 文献标识码:A

研究半干旱地区林木的实际蒸腾量,对研究防护林密度调控、提高林木水分利用率及林分稳定有着重要的理论意义^[1]。国内外大量观测研究多采用自动小气候观测装置或大型自记蒸散器(Lysimeter)进行长时期的蒸散定位观测^[2,3],对较长期林木蒸腾量的定量研究缺乏有效的方法和手段,原因是自然状态下将植物蒸腾和土壤蒸发分项测定有一定的技术困难^[4]。采用 LI-1600 稳态气孔仪可以较精确的测定短时间内林木叶片的实际蒸腾速率,但很难连续精确测定较长时间的林木蒸腾总量。植物蒸腾量的研究大多以短时间的仪器测定为主,涉及理论计算多采用 Penman-Monteith 公式^[4,5],其可用于缺水条件下植物蒸腾的计算。在充分郁闭、林冠没有水湿的森林中用该方程估算蒸散,可以得到相当满意的结果^[6~21]。

1 试验地概况和观测方法

1.1 试验地概况

试验地位于山西省吕梁山西麓、方山县峪口镇的北京林业大学径流林业试验场(北纬 37°36'58",东经 110°02'55")。流域最高海拔 1446m,平均海拔 1200m。该地区属暖温带大陆性季风气候,干燥度 1.3。据该县气象站 1975~1992 年资料统计,多年平均降水量 416mm,6~9 月份降水占全年的 70%以上,年内分配不均;多年平均水面蒸发量高达 1857.7mm,最大蒸发出现在 4~6 月份,表现出典型的北方严重春旱的特征。试验区属典型黄土丘陵沟壑地貌。

1.2 研究方法

本项研究的刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)试验林为 1986 年春季反坡整地、截杆造林,6 种造林密度(830~3330 株/hm²),郁闭度 0.85~0.9。

林木蒸腾采用生长季典型天气全天观测,每 2h 一次。蒸腾速率观测设备为两台 LI-1600 稳态气孔计。观测时在冠层中部南、北两面,测定标准枝活体枝条上的健康成叶,叶片的正、反面同时测定。叶片总的蒸腾速率结果是正、反面之和;叶片的总气孔阻力计算式为^[7]:

$$R_{st}^{-1} = R_{sa}^{-1} + R_{sb}^{-1} \quad (1)$$

式中, R_{st} 为叶片总气孔阻力(s/cm); R_{sa} 为叶片正面气孔阻力(s/cm); R_{sb} 为叶片反面气孔阻力(s/cm)。

由于气孔计测定的蒸腾速率一般高于自然蒸腾值^[8,9],且水分环境条件越好,误差越大。由不同土壤水

分梯度条件下快速称重法(1/1000 精度天平)与 LI-1600 稳态气孔计法结果绘制的校正曲线,对具体土壤水分条件下的仪器实测值进行适度校正。

叶面积采用 LI-3000A 型叶面积仪进行实地测定。测定方法^[10,11]是在标准木不同部位确定标准枝,在确定标准枝叶面积和叶重之比值后,由全株叶重推算全株总叶面积;5~9 月份仅测定标准枝叶面积,待 10 月份标准木伐倒做树干解析时,由标准枝叶重与全株的叶重比推算各月全株叶面积。

小气候观测在林冠上层分两个高度安装电动阿斯曼通风温湿度计和三杯风速仪,由太阳辐射计(MI-110)测定林上太阳辐射、林下辐射和林冠反射辐射、地面反射辐射,由净全辐射计(DFY5 型)测定林上和林内净辐射。常规气象数据由山西省方山县气象局提供。

2 应用理论

在假定动量、热量和水汽输送的边界层阻力相差较小(不考虑温度层结问题),考虑气压订正、并用冠层整体气孔阻力 r_{st} (s/cm) 代换冠层阻力后, Penman-Monteith 方程的基本式可变化为^[4,12,13]:

$$LT = \frac{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} R_n + \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{(e_t - e_a)}{r_a}}{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + \left(1 + \frac{r_{st}}{r_a}\right)} \quad (2)$$

式中, LT 为冠层的蒸腾潜热 (W/m^2); R_n 为林冠截留净辐射 (W/m^2); ρ 为空气密度; C_p 为定压比热 ($1012 J/(kg \cdot K)$); Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率; γ 为干湿表常数; e_a 为实际空气水汽压 (hPa); e_t 为气温 t 时的饱和水汽压 (hPa); r_a 为空气动力学阻力 (s/cm); P_0/P 为气压订正, $P_0/P = 10^{\frac{LH}{18400(1+t/273)}}$ ($t > 0^\circ C$)。

3 方程参数确定

3.1 林冠上方净辐射

在没有实测净辐射资料的情况下,需采用常规气象数据根据常规方法计算林冠上方净辐射 R_n (W/m^2),其具体计算式不再赘述。基本计算项目包括^[4,6,13]:(1)由研究地区地理纬度确定的日出时角 ω_0 和理论日照时数 N 计算每天的理论太阳辐射 (W/m^2)。 (2)计算各日实际净辐射 R_n (W/m^2)。其计算中的反射率 α ,采用了由各林地各月实测值所建立的刺槐林冠反射率与时间的回归方程^[12](方程参数及回归相关系数见表 1);实际日照时数 n 采用了当地气象站提供资料;由日照比率计算太阳辐射的经验系数 a 和 b 取自太原站值^[1](0.1675, 0.5858)。

表 1 生长季各月刺槐林反射率 α 随时间 t 的回归方程
Table 1 The daily change of Albedo α in locust forest, in each month of growing season

月份 Month	回归方程 Regression equation	R 平方 R squared	F 值 F	自由度 df	显著水平 Sig.	标准差 Std. error
5	$\alpha = 0.0017t^2 - 0.0371t + 0.3508$	0.8313	219.97	90	0.00	0.0667
6	$\alpha = 0.0011t^2 - 0.0247t + 0.2808$	0.6885	42.00	38	0.00	0.0713
7	$\alpha = 0.0008t^2 - 0.0160t + 0.2243$	0.5378	36.65	63	0.00	0.0826
8	$\alpha = 0.0014t^2 - 0.0303t + 0.3079$	0.4399	25.46	65	0.00	0.0897
9	$\alpha = 0.0028t^2 - 0.0630t + 0.5102$	0.6475	105.04	110	0.00	0.0693
10	$\alpha = 0.0027t^2 - 0.0585t + 0.4506$	0.5365	15.04	26	0.00	0.0834

* t 为一天的时序,以小时为单位,取 7:00~19:00

3.2 冠层截留净辐射

冠层所截获的净辐射 R_{nl} 等于冠层上方的净辐射 R_n 与透过冠层到达林下地表的净辐射 R_{nd} 之差,即^[4]:

$$R_{nl} = R_n - R_{nd} \quad (3)$$

在考虑叶面积指数 LAI 和林冠各层叶片的消光作用(对辐射的减弱程度用消光系数 k 表示)后,有:

$$R_{nd} = R_n(1 - e^{-k \cdot LAI}) \quad (4)$$

$$\text{或 } R_n/R_s = e^{-k \cdot LAI} \quad (5)$$

林冠上方净辐射 R_s 和林下地表净辐射 R_n 可通过净辐射仪进行实地实测,而直接精确的确定 k 值是比较困难的^[6]。各研究林地实测叶面积指数月变化见表 2。

表 2 1998~2000 年各试验地平均叶面积指数 LAI 月变化
Table 2 The monthly change of average LAI of each testing stands from 1998 to 1999

时间 Time	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
1998	0.7368	1.0989	1.3971	2.0352	2.7546	2.6539
1999	0.7493	0.8183	1.0928	2.0209	2.4117	2.2789
2000	0.8465	1.2553	1.8734	2.1704	2.4505	2.2718

由于不同的时期 R_n/R_s 随叶面积指数 LAI 的变化而不同,同时一天中消光系数 k 受太阳高度角变化影响,在考虑时间因素后参照修改康绍忠^[4,5]的计算方法,刺槐冠层截留净辐射 R_{cl} 的日变化计算式为:

$$R_{cl} = R_s(1 - |\cos((t - A)\pi/12)|e^{-k \cdot LAI}) \quad (6)$$

其中, t 为一天的时序,以小时为单位,取 7:00~19:00; k 为消光系数; A 为常数。 k 和 A 值可通过各月典型日实测净辐射日变化数据及相应林分的 LAI ,经回归计算后确定(表 3)。

3.3 冠层整体气孔阻力 r_{st}

Penman 最早使用冠层表面阻力的概念是,把计算单片叶子水汽交换的方程(叶片表面阻力 r_s)用于冠层,将冠层看成一个整体或是一片巨大的叶片,对应的冠层阻力为 r_c ^[6]。Jones^[14]将冠层整体气孔阻力看作是植物冠层内各层或不同部位叶片气孔阻力相并联的结果。因此,在确定方程 2 中替代 r_c 的冠层整体气孔阻力 r_{st} 时,可以将整个冠层看成一个整体,并假设冠层内蒸腾水汽主要来自叶片分布最集中的中部,将冠层中部的平均单位叶片气孔阻力 r_a 乘一比例系数 K' ,则简化式为:

$$r_{st} = K' \cdot r_a / LAI \quad (7)$$

有效的方法是首先得到实测蒸散值 LT 和 2 式中的相关数据,然后反过来求算 r_{st} 。有了 r_{st} 便可按 7 式计算出系数 K' 。根据相关研究结果^[4,15],当群体结构变化不大时对应的比例系数 K' 基本比较稳定。

本研究以实测的各月典型天气日蒸腾量和实测单位叶片气孔阻力 r_a 数据为依据,采用上述方法并适度精度调整后推算出不同密度林分各月平均 K' 值(图 1 内所示)。

由于表示气孔状况的气孔阻力的大小除受制于叶组织结构特点,主要受气象因子的调节而不是土壤水分的供应能力,因此通过大量实测资料,可以很容易的建立起不同季节冠层中部的平均单位叶片气孔阻力 r_a 与主要气象因子间的回归计算式^[6]。

3.3 空气动力学阻力 r_a

本研究中计算空气动力学阻力的表达式为^[16]:

$$r_a = 4.72 \left[\ln \left(\frac{Z-d}{Z_0} \right) \right]^2 / (1 + 0.54u) \quad (9)$$

式中, Z 为蒸散面以上 2m 处的风速高度; d 为零平面位移,取 0.78 倍平均树高^[17]; Z_0 为粗糙度,取 0.075 倍平均树高^[17]; u 为风速,须将气象站常规高度风速或实测高度风速通过风速廓线分布换算为蒸散面以上 2m 高度值。

4 结果

4.1 计算验证

表 3 生长季各月刺槐林冠层截留净辐射日变化的经验系数
Table 3 The empirical coefficient of daily change of net radiation in Locust forest

月份 Month	消光系数 k	常数 A	相关系数平方 R squared	回归标准差 Asymptotic Std. error k	Asymptotic Std. error A
5	1.5885	1.5103	0.8148	0.0241	0.0802
6	1.4599	1.0430	0.7950	0.0225	0.1151
7~8	0.9826	1.1060	0.5935	0.0234	0.2168
9	0.4676	1.0540	0.8227	0.0066	0.0792
10	0.3126	1.1616	0.6977	0.0077	0.1025

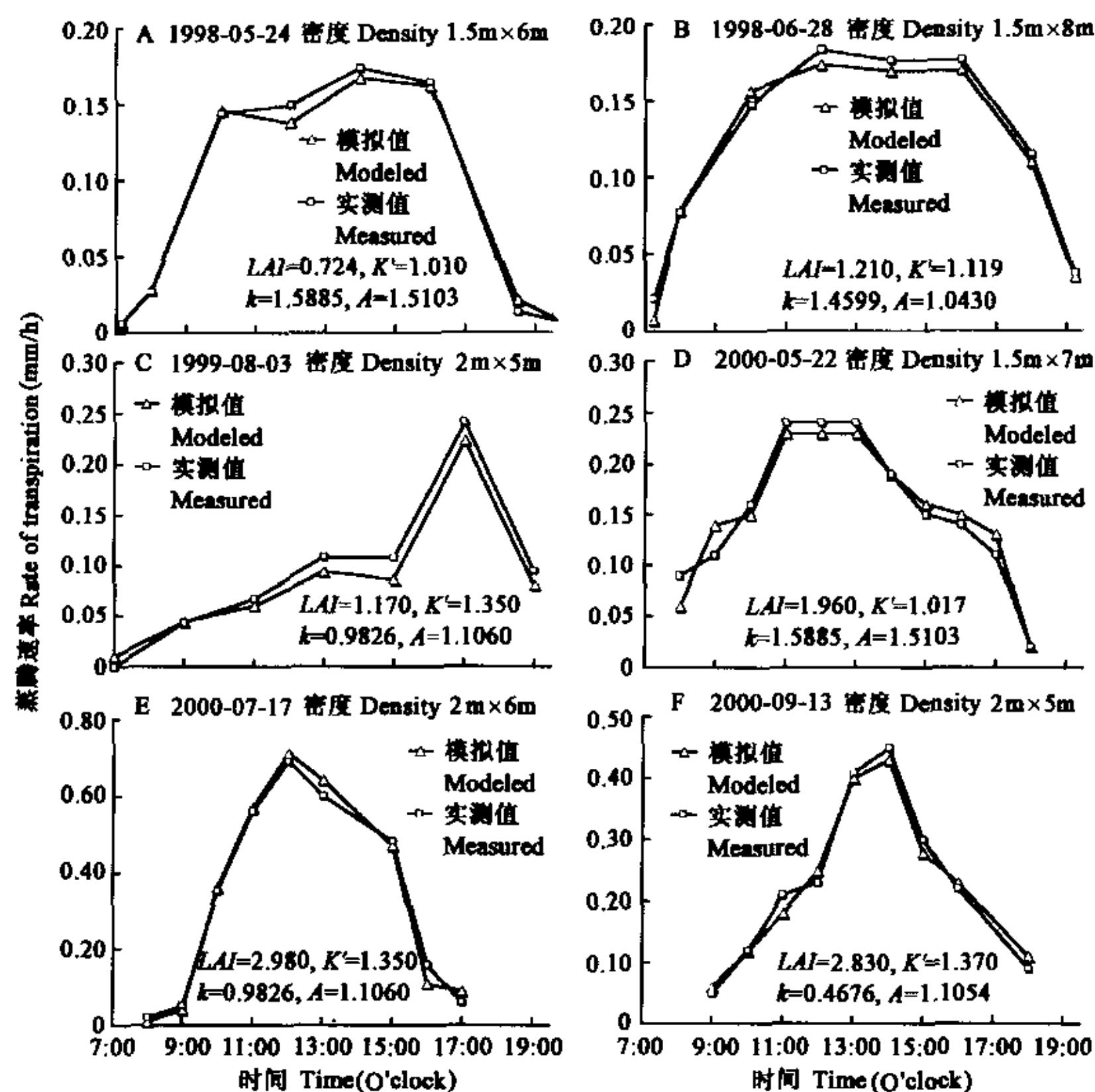


图 1 蒸腾速率计算值与实测值的比较

Fig. 1 Compare between the data calculated and measuring ones of transpiration rate

为验证各参数的适宜程度,按全天实测过程进行了计算模拟验证,在保证计算值与模拟值的同步的前提下,计算中净辐射 R_n 值和冠中层平均气孔阻力 r_{sa} 值采用了实测数据,计算模拟的部分输入参数和结果见表 4。

观测日计算值与实测值对比以图 1(A~F)为例,其中 A 图和 D 图为多云晴天, B 图和 E 图为全晴天, C 图和 F 图为上午阴、午后放晴天气。其结果显示:各月早晚的偏差较大,相对误差达 60%~200%,其主要原因是,早晚 R_n 项在能量平衡方程中占较大比重,其能量平衡方程中忽略不计的部分带来了影响^[4]。8:00~18:00 的精度较好,相对误差在 25%以内。A 图和 D 图的计算精度较高,日平均误差为 7%左右,原因是在多云的天气,计算方程忽略温度层结的因素影响较小,而晴天天气的空气层结稳定度对计算精度的影响较大。6 项模拟结果的平均相对误差在 12%以内,对比相关研究结果,上述计算精度水平基本可行。

4.2 生长季连续日蒸腾估算

采用研究点山西省方山县气象局提供的 1998~2000 年常规气象数据,根据前述推算的计算参数,模拟估算了试验地不同密度刺槐林分的生长季连续日蒸腾,其中夜间蒸腾速率根据过去研究的经验按白天的十分之一估计^[3],图 2 所示为以 1998 年 2 种密度林分为例的计算结果。估算结果表明:1998 年、1999 年和 2000 年 5~10 月生长季不同密度刺槐林的平均蒸腾总量分别为 192.46mm、187.07mm 和 195.59mm。

5 分析与讨论

5.1 消光系数的准确推求和叶面积指数的精确测定,对计算精度的影响很大。在式 5 和式 7 中,各密度林分(不同叶面积指数)净辐射观测数据的不同步,对拟和精度也会产生影响,特别是在阴晴变化频繁的 7~8

月。但同步观测则需多套净辐射观测设备和大量人力。另外,由于各月计算采用的叶面积指数 LAI 为当月中旬的结果,时间差异形成的叶面积变化必然对计算精度带来一定影响。标准木的数量和叶面积指数的测定方法得当与否,也会左右拟和结果。

5.2 各冠层叶片气孔阻力可通过 LI-1600 稳态气孔计在实地观测,叶面积指数也可实地测定,这对于农业作物研究不算什么问题,但对高大而又具复杂冠层的乔木研究而言,在不同时段、不同冠层精确测定这两项指标是非常困难的。这一客观不利因素阻碍了 Penman-Monteith 方程在林业科学研究中的广泛应用。

表 4 输入参数和模拟结果的精度

Table 4 The parameters input and precision of modeling result

日期 Date	项目 Item	时间 Time (O'clock)								H (m)	LAI
		7:10	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:30	19:50		
1998-05-24	R_n (W/m ²)	9.02	46.73	272.50	221.16	328.14	310.08	15.08	-7.06	9.5	0.724
	T_a (°C)	8.13	12.04	20.52	26.52	21.96	22.72	18.56	14.40		
	e_a (hPa)	6.4	3.24	4.19	6.25	5.99	7.05	4.84	7.00		
	u (m/s)	1.27	0.79	1.03	1.35	1.59	1.03	0.48	0.79		
	r_a (s/cm)	14.9735	7.8793	2.6643	3.9461	2.3584	2.4517	15.4503	29.0923		
	计算值 ^① (mm/h)	0.0060	0.0274	0.1449	0.1366	0.1661	0.1611	0.0208	0.0064		
	实测值 ^② (mm/h)	0.0060	0.0266	0.1431	0.1486	0.1725	0.1632	0.0137	0.0064		
	相对误差 ^③ (%)	0.00	2.94	1.22	-8.83	-3.90	-1.29	34.51	0.18		
1998-06-28	R_n (W/m ²)	-66.10	140.80	234.86	263.00	253.19	238.13	154.85	-51.27	9.8	1.21
	T_a (°C)	20.60	23.82	33.37	37.90	38.81	37.13	34.02	29.40		
	e_a (hPa)	11.10	12.48	12.43	12.83	12.64	12.61	8.58	6.33		
	u (m/s)	2.86	2.38	2.62	2.86	3.18	2.38	1.59	0.79		
	r_a (s/cm)	54.1758	6.3296	7.0533	8.5352	9.2940	8.3268	11.5479	28.0970		
	计算值 (mm/h)	0.0071	0.0783	0.1557	0.1730	0.1688	0.1693	0.1089	0.0347		
	实测值 (mm/h)	0.0211	0.0772	0.1472	0.1826	0.1760	0.1763	0.1143	0.0377		
	相对误差 (%)	-198.62	1.48	5.44	-5.57	-4.25	-4.11	-4.92	-8.62		
1999-08-03	R_n (W/m ²)	-0.03	78.80	107.43	156.53	155.52	326.47	128.21		7.1	1.17
	T_a (°C)	22.20	24.97	25.35	30.82	34.40	36.93	29.98			
	e_a (hPa)	12.40	12.60	13.03	12.57	17.49	14.39	14.97			
	u (m/s)	4.30	4.70	4.30	1.70	1.70	2.00	6.30			
	r_a (s/cm)	30.9974	9.9697	7.4267	7.7465	9.6318	4.7836	7.7800			
	计算值 (mm/h)	0.0108	0.0441	0.0600	0.0932	0.0859	0.2230	0.0801			
	实测值 (mm/h)	0.0000	0.0432	0.0668	0.1080	0.1076	0.2416	0.0942			
	相对误差 (%)	99.90	1.96	-11.45	-15.81	-25.28	-8.33	-17.69			

①Calculated data, ②Measured data, ③Relative error

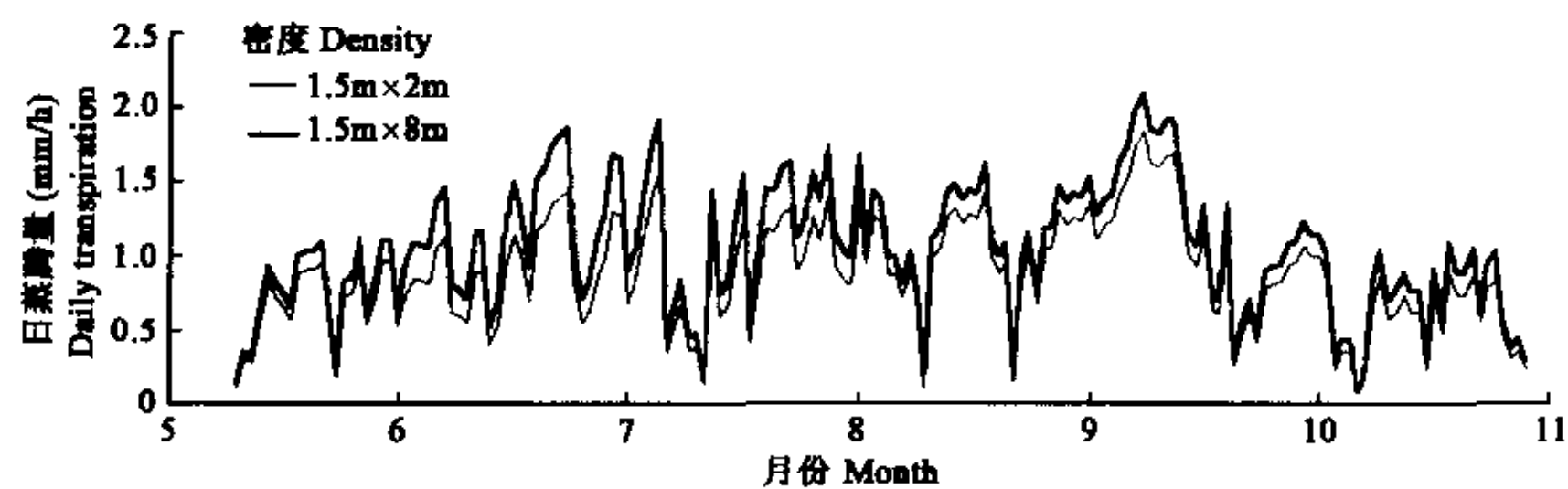


图 2 1998 年刺槐林生长季日蒸腾量变化过程线

Fig. 2 The variation of daily transpiration in locust forest plots within growing season of 1998

5.2 在本项研究中,由回归计算出的消光系数 k 值在各月的变化,呈现随刺槐新叶的不断稠密,随叶面积指数的递增而逐月降低的趋势。由于半干旱地区林木叶面积指数的变化,明显随各月降水量的不稳定性呈一定的波动。因此,在采用 Penman-Monteith 方程计算时,要具备较充足的前期叶面积调查和净辐射观测资料。

5.3 应用 Penman-Monteith 方程,仅靠常规气象数据不能建立夜间森林环境净辐射的计算关系,在缺乏实测资料的情况下,无法连续计算夜间蒸腾。需要通过前期其他途径的蒸腾观测来建立夜间估算的计算关系,如目前国际上多采用热脉冲技术(Flow-meter),通过测定树干导管液流通量(sap flow)进行林木蒸腾的研究^[21,22]。

5.4 尽管有上述众多困难因素,但在积累了大量相关基础数据的条件下,通过该方程采用常规气象数据来精确估算林木蒸腾耗水量,仍是一种获得满意结果的便捷方法。

References

- [1] Wang B R, Wang B T, eds. Runoff Forestry on Loess Plateau. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996, 155~162.
- [2] Chen Y M, Guo G S, Wang G X, et al. ed. The Water Requirement of Main Crop and Irrigation in China. Beijing: Irrigation Works Publishing House, 1995. 45~69.
- [3] He K N, Zhang X P. Heat energy budget characteristics and evapotranspiration of protection forest in loess region of southwestern Shanxi Province. *J. Beijing Forestry University*, 1998, 20(6): 7~13.
- [4] Kang S Z, Liu X M, Xiong Y Z, eds. Theory of water transport in soil-plant-atmosphere continuum and its application. Beijing: Chinese water conservancy publishing company, 1994. 122~147.
- [5] Kang S Z, Liu X M. A study of Penman-Manteith model to estimate transpiration from Crops. *Acta Univ. Agri.*, 1991, (1): 13~20.
- [6] Xiao W F, Xu D Y. The physiological and ecological basis of forest energy utilization and yield forming. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999. 73~84, 103~106.
- [7] Kang S Z, Liu X M. Relations between leaf water potential, stomatal resistance and transpiration rate of winter wheat, and environmental factors. *Irrigation and Drainage*, 1991, 10(3): 1~5.
- [8] Liu F J, zheng S K. *Research on water physiology of poplar*. Beijing: Beijing Agric. Univ. House, 1991. 78~96.
- [9] Liu F J, Zheng S K, Ju G S. A study on comparison of measuring water-consumption for transpiration in poplar. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33(2): 117~126.
- [10] Xia R X, Jiang Z. The method of crop leaf area measurement. *Plant Physiology Communications*, 1987, (5): 58~60.
- [11] Duan A W. Mensuration on Leaf Area Index of crop Population. *Irrigation and Drainage*, 1996, 159(1): 50~53.
- [12] Hattori S. Radiation balance of a hinoki stand (1) seasonal variation of the albedo. *J. Jap. For. Soc.*, 1984, 66: 149~156.
- [13] Tomas J S, Jean claud A. Land surface evaporation measurement and parameterization. New York: Springer-Verlag Inc., 1991. 5~28, 92~111.
- [14] Mo X G. A model for the relationship between canopy surface resistance and environmental factors and its application to evapotranspiration estimation. *Geographical Research*, 1997, 16(2): 81~88.
- [15] Jones P G. Plant and microclimate. Cambridge University press, 1983.
- [16] Thom A S, Oliver H R. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1977, 103: 345~357.
- [17] Jarvis P G, James G B, Landsberg J J. *Coniferous forest. in vegetation and the atmosphere*. In: Monteith, J L ed. London: Academic Press, 1976. 2: 171~240.
- [18] Robins P C. A method of measuring the aerodynamic resistance to the transport of water vapour from forest

- canopies. *J. Appl. Ecol.*, 1974, **11**: 315~325.
- [19] Monteith J L, Szeicz G. The radiation balance of bare soil and vegetation. *Q. J. R. Met. Soc.*, 1961, **87**: 159~170.
- [20] Bosveld F C and Bouten W. Evaluation of transpiration models with observations over a Douglas-fir forest. *Agricultural and forest meteorology*, 2001, **108**(4): 247~264.
- [21] Fernández J E, Palomo M J, DiazEspejo A. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, 2001, **51**(2): 99~123.
- [22] Morén A S, Anders Lindroth, Jeremy Flower-Ellis, Emil Cienciala, Meelis Molder. Branch transpiration of pine and spruce scaled to tree and canopy using needle biomass distributions. *Trees*, 2000, **14**(7): 384~397.

参考文献

- [1] 王斌瑞,王百田,等著. 黄土高原径流林业. 北京:中国林业出版社,1996.155~162.
- [2] 陈玉民,郭国双,王广兴著. 中国灌区主要作物需水量. 北京:灌溉工程出版社,1995.45~69.
- [3] 贺康宁,张学培. 晋西黄土残塬沟壑区防护林热收支特性及蒸散研究. 北京林业大学学报,1998, **20**(6):7~13.
- [4] 康绍忠,刘晓明,熊运章等著. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用. 北京:中国水利电力出版社,1994.122~147.
- [5] 康绍忠,刘晓明. 运用彭曼-蒙特斯模型估计作物蒸腾的研究. 西北农业大学学报,1991, (1):13~20.
- [6] 肖文发,徐德应. 森林能量利用和生产过程的生理生态基础. 北京:中国林业出版社,1999.73~84.
- [7] 康绍忠,刘晓明. 冬小麦的叶水势、气孔阻力和蒸腾速率与环境因素的关系. 灌溉排水,1991, **10**(3):1~5.
- [8] 刘奉觉,郑适错. 杨树水分生理研究. 北京:北京农业大学出版社,1991,78~96.
- [9] 刘奉觉,郑适错,巨关升. 杨树蒸腾耗水测算技术的比较研究. 林业科学,1997, **33**(2):117~126.
- [10] 夏仁学,江泽. 作物叶面积测定方法. 植物生理学通讯,1987, (5):58~60.
- [11] 段爱旺. 作物群体叶面积指数测定. 灌溉排水,1996, **159**(1):50~53.
- [14] 莫兴国. 冠层表面阻力与环境因子关系模型及其在蒸散估算中的应用. 地理研究,1997, **16**(2):81~88.