

# 基于 MATLAB 的华北落叶松蒸腾仿真模拟

李海光<sup>1</sup>, 余新晓<sup>1</sup>, 李钢铁<sup>2</sup>, 信忠保<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

**摘要:** 蒸腾是植株主要的耗水形式。以六盘山北侧的华北落叶松为研究对象, 采用当前国内外较先进的热扩散式树干边材液流测定技术从单株水平上探讨了华北落叶松的蒸腾速率特性以及其与环境因子之间的影响机理。就气象因子和蒸腾速率进行了分析, 提出了气象因子和华北落叶松蒸腾耗水的数学模型。应用 Matlab 软件对华北落叶松进行了模糊蒸腾模型的设计和仿真。研究结果表明, 空气相对湿度和空气温度是影响华北落叶松蒸腾速率的直接因子, 太阳辐射式通过改变空气湿度和空气温度进而影响华北落叶松的蒸腾速率。

**关键词:** 华北落叶松; 蒸腾速率; 环境因子; 模糊蒸腾模型

文献标识码: A

文章编号: 1000 288X(2010) 03-0117-05

中图分类号: S157

## Simulation Research on Transpiration of *Larix Principis-rupprechtii* Mayr Based on MATLAB

LI Hai-guang<sup>1</sup>, YU Xin-xiao<sup>1</sup>, LI Gang-tie<sup>2</sup>, XIN Zhong-bao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Combating Desertification of the Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Ecology and Environmental Science, Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

**Abstract:** Transpiration water is the main mode of plant water consumption. This study takes *Larix principis-rupprechtii* Mayr in the north of Liupanshan Mountains as a study object. The water consumption characteristics of *Larix principis-rupprechtii* Mayr are studied using advanced SL-F technology and then the relationship between transpiration rate and environmental factors is analyzed. A regressive model is constructed through analyzing the meteoric factors. The fuzzy transpiration model based on Matlab is designed and simulated. Results indicate that air temperature and air relative humidity directly affect transpiration rate. Solar radiation intensity can affect the transpiration rate of *Larix principis-rupprechtii* Mayr by influencing air temperature and air relative humidity.

**Keywords:** *Larix principis-rupprechtii* Mayr; transpiration rate; environmental factor; fuzzy transpiration model

蒸腾耗水量是植树造林设计与环境水分研究中的重要水分参数, 也是森林流域水量平衡的重要组成部分, 它对森林生态系统的水分循环具有重要影响<sup>[1-6]</sup>。树干液流是蒸腾耗水的一个重要衡量指标, 因此研究树木树干液流具有重要的实践意义, 同时国内外进行了大量的研究工作, 并积累了大量研究资料, 如白云岗<sup>[7]</sup>、Huber B. 等<sup>[8]</sup>、EDWARDS WRN<sup>[9]</sup>等利用不同方法对不同树种的蒸腾耗水进行了研究。

Matlab 即矩阵实验室, 1984 年由美国的 Math-

Works 公司推出, 它提供了丰富的数值分析、矩阵运算、图形绘制、数据处理、图像处理、多媒体处理等功能, 并提供了丰富实用的图形界面设计方法, 是一套功能强大的工程计算及数值分析软件。因其简单易用、人机界面良好而成为当前国际科学与工程领域中应用最广, 最受人们喜爱的软件环境<sup>[10-13]</sup>。当前此软件在农业上的应用很少, 王晓丽<sup>[14]</sup>以辐射量和相对湿度为输入应用此软件对温室作物进行了模糊蒸腾模型的研究, 对于野外植被蒸腾的仿真研究尚未见报

收稿日期: 2009-08-10

修回日期: 2009-12-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原多尺度耦合流域土地利用/覆被对水循环的影响及水文生态响应研究”(40871136)

作者简介: 李海光(1980—), 男(汉族), 河北省承德市人, 林业助理工程师, 博士研究生。主要从事林业生态工程、水土保持研究。E-mail: lihaiguang4@126.com。

通信作者: 余新晓(1961—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 教授, 博士生导师。主要研究方向为森林水文、水土保持等。E-mail: yuxinxiao11@126.com。

道。本文应用热扩散技术研究华北落叶松不同生长条件下蒸腾耗水的时空动态规律,进而确定华北落叶松耗水速率和环境之间的关系,应用 Matlab7.0 对华北落叶松蒸腾耗水速率进行了模糊蒸腾模型并进行了仿真的研究。旨在为保护和发展华北落叶松林提供一定理论依据。

## 1 项目区概况

研究区位于宁夏六盘山北侧叠叠沟林场。试验区是黄土高原西部保存比较完整的山地森林生态系统,是我国西北典型的干旱半干旱林区。受东南暖湿气流影响,其气候特征表现出由半湿润向半干旱过渡的特征。据统计,该地区年平均气温为 5.8℃,最冷月(1月)平均温度为-7℃,最热月(7月)平均温度为 17.4℃。无霜期 90~130 d 左右,年日照时数为 2 100~2 400 h,10℃积温 1 846.6℃,年均降雨量为 676 mm,年均蒸发量为 1 426 mm。由于受山地地形的影响,年降雨量在地域分布上呈现出较大的分布梯度,具体表现为山区中心高于边缘地区,而边缘地区则出现从南向北减少的趋势。

叠叠沟林场试验地的主要人工植被类型有华北落叶松和沙棘群落。总体看,人工林分虽然面积较大,但林分结构相对简单,基本上为同龄纯林。

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查

2.1.1 树木调查 统计样地内华北落叶松植株,编号后进行调查,进行每木检尺,调查指标有:树高、枝下高、冠幅、胸径,用打生长锥方法调查边材宽、心材宽、皮厚,然后计算边材面积。

2.1.2 样树选择 根据树木调查结果,以树高、胸径、冠幅为依据,选取六盘山北侧(宁夏回族自治区固原市叠叠沟林场)的主要造林树种—华北落叶松 8 株进行研究。所选择的样木要求树干圆满,不偏心,不偏冠且胸径上下 5 cm 处无节疤。

### 2.2 气象观测

应用自动气象观测:在试验区内设置美国 LFCOR 公司生产的 LF1401 小型自动气象站(agrormeteorological station),连续测定太阳辐射(solar radiation intensity, 简写 SRI),空气温度(air temperature, 简写 AT),空气相对湿度(air relative humidity, 简写 ARH),风速(wind speed, 简写 WS),土壤温度(soil temperature, 简写 ST)等。每 15 min 自动采集一组数据,在华北落叶松整个生长季连续观测。

### 2.3 蒸腾速率观测

华北落叶松的蒸腾速率(transpiration rate, 简写 TR)用德国 Ecomatik 公司生产的 SF-L 树干液流探头测定的树干液流进行推算。与气象观测同步,在整个生长季每 5 min 观测 1 组数据,连续观测。

SF-L 树干液流仪测定的液流量密度是指单位时间单位面积上的水分通量。

液流量密度的计算公式为:

$$J_s = 0.714 [(d_{\max}/d_{\text{fact}}) - 1]^{1.231} \quad (1)$$

$$d_{\text{fact}} = T_{1-0} - (T_{1-2} + T_{1-3})/2 \quad (2)$$

式中:  $d_{\max}$ : 当  $J_s = 0$  时根据公式(1)计算的,一般在夜间空气湿度 100% 长达 2 d 或树干直径停止变化处于相对稳定状态时计算的  $d_t$  值;

$d_{\text{act}}$ : 根据公式(2)计算的值;

$T_{1-0}$ : 探头  $S_0$  与探头  $S_1$  的温度差(℃);

$T_{1-2}$ : 探头  $S_2$  与探头  $S_1$  的温度差(℃);

$T_{1-3}$ : 探头  $S_3$  与探头  $S_2$  的温度差(℃)。

蒸腾速率  $T_r$  用边材液流量表示,计算公式为:

$$T_r = J_s \cdot A_s \quad (3)$$

式中:  $A_s$  ——边材面积( $\text{cm}^2$ )。

## 3 结果分析

### 3.1 华北落叶松液流速率与气象因子关系

华北落叶松树干蒸腾随着时间的变化而变化。华北落叶松蒸腾通常在夜间 20:00—22:00 开始,并且非常微弱,且时断时续,其值一般约在 0.0002  $\text{m}^3/\text{h}$  以下。

据研究,夜间液流微弱上升则是为了在树体内部蓄水,补偿恢复白天失去的水分,以保证第 2 d 冠层正常耗水所需,其动力是根压的存在;白天从 7:00—8:30 开始,随着太阳辐射、空气温度的升高和空气相对湿度的下降表现为持续上升,呈现出双峰或多峰曲线,其峰值大小随测定日气象条件、土壤湿度和土壤温度等因子变化。选取 7 月 7、8、9 日作为特征天气,在研究时间内,7 日和 8 日为晴天无云,9 日为晴天有云。

华北落叶松蒸腾耗水量变化呈明显的昼夜节律,白天蒸腾速率快,这是由于白天树冠强大的蒸腾作用,大量的水分通过根部,以被动方式吸收进入体内;而夜间存在着微弱的蒸腾,主要是由于根压产生的,水分以主动方式进入体内,补充白天植物蒸腾所损失的大量水分,恢复植物体内的水分平衡。

华北落叶松液流量日变化曲线各日峰形状基本相同,但峰值差异很大,其表现特征变化规律完全与

同步检测的气象因子如光照强度、大气温度、大气湿度、风速的变化相吻合(图 1)。

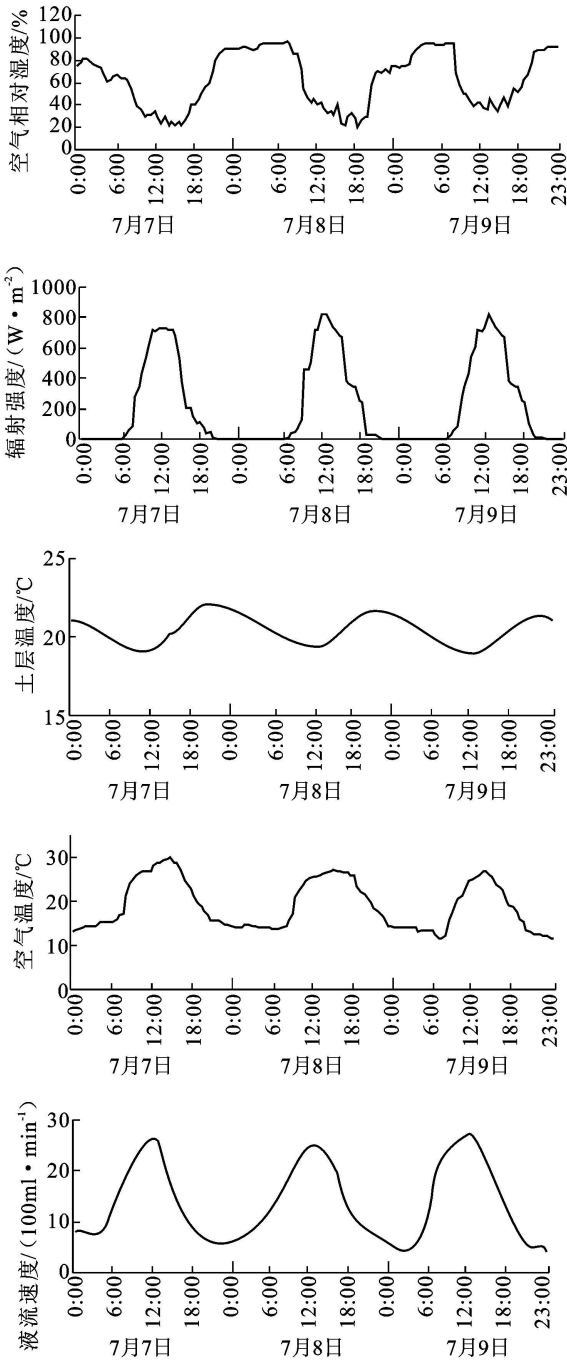


图 1 蒸腾速率与影响因子间日变化特征

应用数据处理软件 SPSS 对华北落叶松整个生长季的液流速率与其同步的影响因子进行相关分析, 见表 1。在所有的天气因子中, 空气温度与液流速率相关系数最大为 0.954, 其次为空气相对湿度和太阳辐射强度。太阳辐射强度与空气温度和空气相对湿度相关系数较大, 分别为 -0.743 和 0.772。由此可知, 太阳辐射强度决定空气温度和空气相对湿度进而影响华北落叶松的液流速率。

表 1 液流速率与影响因子相关系数

因子	$T_r$	WS	ARH	SRI	ST	AT
$T_r$	1.000	0.239	-0.967	0.733	-0.321	0.954
WS	0.239	1.000	-0.148	-0.074	0.238	0.207
ARH	-0.967	-0.148	1.000	-0.743	0.307	-0.964
SRI	0.733	-0.074	-0.743	1.000	-0.213	0.772
ST	-0.321	0.238	0.307	-0.213	1.000	-0.250
AT	0.954	0.207	-0.964	0.772	-0.250	1.000

注: ARH 为空气湿度; AT 为空气温度; WS 为风速; ST 为土壤温度; SRI 为太阳净辐射强度;  $T_r$  为蒸腾速率。

随着太阳辐射强度较大, 空气温度升高, 空气湿度降低, 在此过程中蒸腾速率增加。空气相对湿度增加使得植株体内和外界的湿度差降低, 因此空气湿度增加可以较慢蒸腾速率, 而空气温度的增加可以在一定程度上加大湿度差。太阳辐射使空气温度和湿度的变化相对蒸腾速率的变化一个较为缓慢的过程, 辐射的变化直接影响的是空气的温度和相对湿度, 进而由湿度和温度来改变蒸腾速率。

对华北落叶松液流速率和相关影响因子以及影响因子的交互作用进一步分析, 得其复相关系数  $R^2$  为 0.985, 相关性极显著。相应均值为 7.335 667, 残差平方根为 0.698 761, 变异系数为 9.525 500。这表明华北落叶松液流速率在受到单个影响因子作用的同时, 在一定程度上受到交互作用的影响。华北落叶松液流速率与各影响因子间回归方程为:

$$T_r = 135.048 + 417.862WS - 2.738ARH + 0.065SRI + 5.791ST - 8.694AT - 0.003ARH * SRI + 0.088SRH * AT$$

华北落叶松的回归方程明显的显示出各影响因子贡献率的大小。同时也反映出太阳辐射强度是通过改变空气相对湿度和空气温度来影响树干液流。

### 3.2 华北落叶松模糊蒸腾模型的设计和仿真

Matlab 模糊系统是由模糊化、模糊规则、模糊逻辑推理和非模糊化构成的, 可以代表一个输入和输出的映射关系。

由华北落叶松蒸腾速率和各影响因子的关系可以明显看出: 蒸腾速率与空气湿度和空气温度相关系数最高, 分别为 -0.967 和 0.954, 其次是太阳辐射强度为 0.733; 其余的影响因子的相关性较小, 在显著水平为 0.01 上可以忽略, 因此可以根据空气温度与空气湿度和太阳辐射强度来确定华北落叶松蒸腾。

3.2.1 模糊蒸腾模型的设计 由以上分析可知, 华北落叶松模糊蒸腾模型是一个三输入单输出系统, 输

入变量为: 空气湿度 ARH, 空气温度 AT, 太阳净辐射强度 SRI, 输出量为蒸腾速率  $T_r$  (图 2)。



图 2 模糊蒸腾模型结构

最为常见的模糊推理系统有 3 类: 纯模糊推理系统、高木—关野 (Takagi—Sugeno) 型模糊逻辑系统 (又称 Sugeno 型) 和具有模糊产生器和模糊消除器的 Mamdani 型模糊逻辑系统。

由于 Mamdani 型模糊逻辑系统具有模糊产生器和模糊消除器, 得到的输入与输出均为精确量, 因而可以直接在实际工程中应用, 具有广泛的应用性, 所以这单选择 Mamdani 型模糊逻辑系统。 (fuzzy inference system)。

3.2.2 变量的模糊化

(1) 输入量 ARH。论域: 20% ~ 100%; 模糊子集 {VL, L, M, H, VH}。

(2) 输入量 SRI。论域: 0~ 40 MJ/(m<sup>2</sup>·d); 模糊子集 {VL, L, M, H, VH}。

(3) 输入量 AT。论域: - 5 °C ~ 30 °C; 模糊子集 {VL, L, M, H, VH}。

(4) 输出量  $T_r$ 。论域: 0~ 20(ml/d); 模糊子集 {VL, L, M, H, VH}。

(5) 中间变量 C。论域: 0.5 ~ 1.5; 模糊子集 {VL, L, M, H, VH}。

其中: 模糊子集中 VL, L, M, H, VH 分别表示非常低、低、适中、高、非常高。如输入量中的 T 气模糊子集 VL, L, M, H, VH 分别表示空气的温度非常低、低、适中、高、非常高, 其余同理。

3.2.3 模糊控制规则的确定 采用 Mamdani 模糊推理系统, 清晰化法为重心法则可以建立针对  $H_{气}$ ,  $T_{气}$ ,  $R_{净}$  3 个参数的模糊规则, 见表 2—3。

表 2 推理系统 1 中的模糊控制规则

AT	ARH				
	VL	L	M	H	VH
VL	VL	M	H	H	VH
L	L	M	M	H	H
M	VL	H	L	M	M
H	H	VL	L	L	M
VH	VL	VL	VL	VL	L

表 3 推理系统 2 中的模糊控制规则

C	SRI				
	VL	L	M	H	VH
VL	VL	VL	VL	L	L
L	VL	VL	L	M	M
M	VL	L	L	M	H
H	L	L	M	H	VH
VH	L	M	H	H	H

3.2.4 模糊蒸腾模型的仿真 用 Matlab 模糊逻辑工具箱 (fuzzy logic toolbox) 提供的图形用户界面 (GUI) 编辑函数, 由计算机可以方便、直观迅速地得出输入与输出的关系曲线即仿真。模糊模型的仿真结果如图 3 所示。

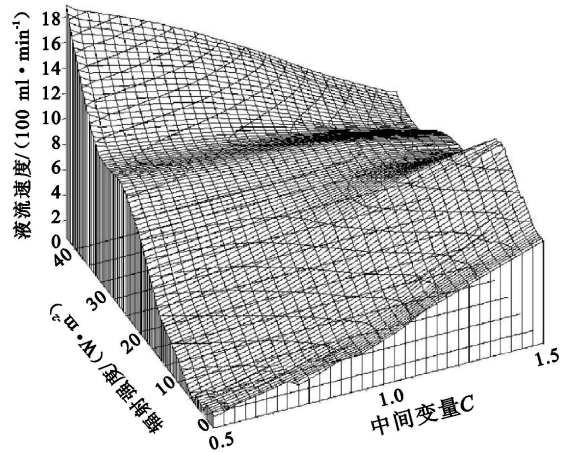


图 3 模糊蒸腾模型输入与输出关系曲线

图 3 中显示, 当太阳净辐射强度较弱、空气温度较低、空气湿度大时, 华北落叶松的蒸腾量很小, 与之相反, 当太阳净辐射强度较强、空气温度较高、空气湿度小时, 华北落叶松的蒸腾量很大。这与华北落叶松蒸腾耗水规律是一致的。同时, 在净辐射很弱的时候, 其对蒸腾没有太大的影响, 主要影响蒸腾的是空气温度和空气湿度; 当净辐射很强的时候, 净辐射对蒸腾的作用最大, 但是一天净辐射达到这种强烈程度的时间很少。净辐射强度和空气的湿度与温度关系极为密切。这同时也说明了净辐射是通过改变空气相对湿度和空气温度来影响树干蒸腾。

4 结论

华北落叶松液流速率与各影响因子间的回归方程为:

$$T_r = 135.048 + 417.862WS - 2.738ARH + 0.065SRI + 5.791ST - 8.694AT - 0.003ARH * SRI + 0.088SRH * AT$$

式中:  $T_r$  ——蒸腾速率;  $WS$  ——风速;  $ARH$  ——空气相对湿度;  $SRI$  ——太阳辐射强度;  $ST$  ——土壤湿度;  $AT$  ——空气湿度。

应用 Matlab 进行仿真对华北落叶松蒸腾进行的仿真表明, 太阳辐射强度并不是直接影响华北落叶松树干液流, 而是通过改变空气相对湿度和空气温度来影响树干液流。同时也说明了一些月份液流速率最高点不是出现在太阳辐射强度最大的时候。

本文应用 Matlab 对华北落叶松蒸腾耗水设计了模糊模型, 并进行了仿真。但此过程只计算了主要因子: 空气湿度、空气温度、净辐射强度, 并没有体现出表现不明显的因子。这种只是考虑主要问题的主要方面的方法是符合哲学和自然辩证法的, 尤其是对于影响因素较多, 不容易全部考虑的情况, 此种方法更体现其优势。

应用 Matlab 对野外树木的蒸腾耗水进行仿真, 在国内外的报道中尚未见到, 方法的推广性有待进一步探讨。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 阮宏华, 郑阿宝, 钟育谦, 等. 次生栎林蒸腾强度与蒸腾量的研究[ J ]. 南京林业大学学报, 1999, 23(4): 32-35.
- [ 2 ] 穆天民, 阎伟. 兴安落叶松森林蒸腾的初步研究[ J ]. 东北林学院学报, 1982( 2 ): 21-29.
- [ 3 ] 王鹤松, 孟平, 张劲松, 等. 华北石质山区山茱萸人工林蒸腾特征及水分供求关系[ J ]. 林业科学, 2007, 43(10): 14-18.
- [ 4 ] Cao S, Chen L, Liu Z, et al. A new tree planting technique to improve tree survival and growth on steep and arid land in Loess Plateau of China[ J ]. Journal of Arid Environments, 2008( 72 ): 1374-1382.
- [ 5 ] Wang H S, Meng P, Zhang J S, et al. Transpiration variation and relationship between supply and demand of water for cornus officinalis plantations in the rocky mountainous area of north China[ J ]. Scientia Silvae Sibiricae. 2007( 10 ): 14-18.
- [ 6 ] Cao Shixiong, Chen Li, Xu Chenguang, et al. Impact of three soil types on afforestation in China's Loess Plateau: Growth and survival of six tree species and their effects on soil properties[ J ]. Landscape and Urban Planning, 2007( 83 ): 208-217.
- [ 7 ] 郭卫华, 李波, 张新时, 等. 水分胁迫对沙棘和中间锦鸡儿蒸腾作用影响的比较[ J ]. 生态学报, 2007, 27( 10 ): 4132-4140.
- [ 8 ] 白云岗, 宋郁东, 周宏飞, 等. 热脉冲法对胡杨树树干液流的监测与蒸腾过程模拟[ J ]. 水土保持学报, 2007, 21( 3 ): 30-32.
- [ 9 ] Huber B, Selvmidt E. Water balance in three Pinus radiata plantations and a meadow[ J ]. Bosque, 1985( 2 ): 74-82.
- [ 10 ] Edwards W R N. Operator's manual of custom heat velocity data Logger[ J ]. Background Theory. Chapter, 1992, 2: 313-332.
- [ 11 ] 李勇国. 智能控制及其 MATLAB 实现[ M ]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 193-222.
- [ 12 ] 叶军. 模糊控制系统的计算机设计与仿真的研究[ J ], 计算机仿真, 2002, 19(6): 49-52.
- [ 13 ] Odhiambo L O, Yoder R E. Estimation of Reference Crop Evapotranspiration Using Fuzzy State Models [ J ]. American Society of Agricultural Engineers, 2001, 44( 3 ): 543-550.
- [ 14 ] 王晓丽, 邓璐娟. 基于 Matlab 语言的温室作物蒸腾模型[ J ]. 控制工程, 2005, 11( S1 ): 99-100.