# 不同时间尺度下刺槐蒸腾耗水与环境因子关系

张荣<sup>1</sup>,毕华兴<sup>1,2,3,4,5</sup>,王宁<sup>1</sup>,赵丹阳<sup>1</sup>,黄靖涵<sup>1</sup>,赵少波<sup>6</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083;
3.水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学),北京 100083;4.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学), 北京 100083;5.林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学),北京 100083;6.北京国土丹青工程技术有限公司,北京 100083)

摘要:探究不同时间尺度下植物蒸腾变化与环境因子的关系,对理解植物生长的驱动机制及估算林分耗水 具有重要的理论意义。以晋西黄土区蔡家川人工刺槐纯林为研究对象,于 2021 年 5-12 月采用热扩散探 针(TDP)测定8株样树树干液流,并同步监测太阳辐射、空气温度、降雨量、土壤温度、土壤含水量等环境 因子,分析不同时间尺度(小时、日、月)下刺槐蒸腾特征及其对环境因子的响应。结果表明:(1)环境因子 对刺槐蒸腾耗水的影响在不同时间尺度下存在差异,整体上随着时间尺度的变大,土壤含水量成为影响刺 槐蒸腾的主要因子,并且短时间尺度是主要取决于表层土壤水分,长时间尺度不仅为表层同时也取决于较 深层土壤含水量。小时尺度下,刺槐蒸腾随太阳辐射、空气温度、水汽压亏缺、土壤温度变化而变化,但蒸 腾峰值与环境因子的峰值均存在时间差异性,并无完全同步,差异时长可达-180~30 min,在各环境因子 中太阳辐射与空气温度对刺槐蒸腾的影响较大;日尺度下,刺槐蒸腾速率主要取决于浅层土壤含水量,并 随浅层含水量的增加而增大;月尺度下刺槐蒸腾耗水则取决于浅层与深层土壤含水量的共同作用;(2)构 建了不同时间尺度下环境因子与刺槐蒸腾耗水的模型,各时间尺度下模型拟合度均较高。(3)在短历时尺 度下可使用测定植物蒸腾的仪器直接测定与计算蒸腾耗水,而较大时间尺度下可以通过监测较少的环境 因子应用建立模型进行蒸腾耗水的计算,可大大提高效率且可减少蒸腾耗水监测的成本。 关键词:刺槐;时间尺度;蒸腾速率;气象因子;土壤水分;时间差异性 中图分类号:S715.4 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)05-0204-08 DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.026

# Relationship Between Transpiration of *Robinia Pseudoacacia* and Environmental Factors at Different Time Scales

ZHANG Rong<sup>1</sup>, BI Huaxing<sup>1,2,3,4,5</sup>, WANG Ning<sup>1</sup>, ZHAO Danyang<sup>1</sup>, HUANG Jinghan<sup>1</sup>, ZHAO Shaobo<sup>6</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing 100083;

3. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry

University), Beijing 100083; 4. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 5. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education

(Beijing Forestry University), Beijing 100083; 6.Beijing Beauty China Engineering Technology Co., LTD., Beijing 100083) Abstract: The study of transpiration change and its relationship with environmental factors at different time scales is of great theoretical significance for understanding the driving mechanism of plant growth and estimating the water consumption of stands. In this study, eight sample trees were selected from Robinia pseudoacacia forest in Caijiachuan from May 2021 to December 2021 and thermal diffusion probe (TDP) was used to measure stem sap flow of Robinia pseudoacacia. Environmental factors such as solar radiation, air temperature, rainfall, soil temperature and soil water content were monitored synchronously. The characteristics of Robinia pseudoacacia transpiration and its response to environmental factors at different time scales (hour, day and month) were analyzed. The results showed that: (1) The relationships between transpiration and environmental factors were different at different time scales, on the whole, with the increase of time scale, soil water content became the main factor affecting transpiration. And the short time scale depended on

**收稿日期:**2022-02-03

第一作者:张荣(1997一),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail:13020028856@163.com

通信作者:毕华兴(1969一),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail:bhx@bjfu.edu.cn

资助项目:国家自然科学基金项目(31971725);国家自然科学基金区域创新发展项目(U2243202)

surface soil water content, while the longtime scale depended on both surface soil water content and deeper soil water content. Hourly scale, the transpiration varied with the variation of solar radiation, air temperature, water vapor pressure deficit and soil temperature, but the peak value of transpiration and the peak value of environmental factors were different in time, and the time difference was up to -180 to 30 min. Among the environmental factors, solar radiation and air temperature had great influence on transpiration. At the daily scale, the transpiration rate increased with the increase of shallow soil water content, and shallow soil water content had a great influence on daily transpiration. At the monthly scale, the effect of shallow and deep soil water content on transpiration was more obvious. (2) In this paper, models of environmental factors and transpiration at different time scales were constructed, and the fitting degree of models at different time scales was high. (3) Based on this study, it is recommended to use instruments to measure plant transpiration at small scales, while plant transpiration can be calculated by monitoring fewer environmental factors at large scales, which can greatly improve efficiency and reduce the cost of monitoring water consumption of transpiration.

Keywords: Robinia pseudoacacia; time scale; transpiration rate; meteorological factors; soil water; Temporal variability

植物蒸腾是植物根系吸收土壤水分,通过木质部 运输到植物叶片并散发到大气中的过程<sup>[1-2]</sup>,植物蒸 腾受多种因素影响,植物生物学结构决定自身的蒸腾 潜能,气象因子决定植物蒸腾的瞬时变化,土壤含水 量决定植物的蒸腾峰值和蒸腾总量<sup>[3]</sup>。已有研究<sup>[4-6]</sup> 表明,区域与树种的差异性导致环境因子对植物蒸腾 特征的影响不同,因此量化各区域环境因子对植物蒸 腾的影响对研究植物蒸腾在林地水量平衡与水循环 中的作用具有重要意义。

目前,关于植物蒸腾与环境因子的关系已经开展了 大量的研究,已有研究[7-8]发现,不同时间尺度下植物蒸 腾对环境因子的响应存在差异,王文杰等[7] 对兴安落叶 松蒸腾研究中发现,小时尺度下主导蒸腾的因子为太阳 辐射、空气相对湿度,日尺度下为土壤温度,月尺度下为 土壤温度与土壤湿度;莫康乐等[8]发现,永定河杨树在 小时间尺度下受太阳辐射与水汽压亏缺的影响较大,大 时间尺度下受降雨量的影响较大;但现有研究仍然存在 不足,如在研究环境因子变化对植物蒸腾影响时未考虑 蒸腾与环境因子变化在时间上不同步性;选取环境因子 时忽视土壤温度的存在,而有学者[9-10]研究表明,土壤 温度能够影响植物根系活性与土壤水分有效性间接 控制植物的蒸腾作用;此外,环境因子与植物蒸腾关 系在不同时间尺度下的差异性研究也较少。因此,在 前人研究的基础上,有必要继续研究不同时间尺度下 植物蒸腾与环境因子的关系。

作为速生树种的刺槐被广泛栽植于中国北方地 区,目前关于刺槐蒸腾与环境因子关系研究多集中于 单一尺度,对多时间尺度下的研究较少。黄土高原是 世界上最严重的水土流失地区之一,为治理水土流 失,已经栽植大量的水土保持树种<sup>[11-12]</sup>。其中,位于 晋西黄土区的蔡家川流域于 1991—1995 年栽植大量 刺槐人工林,已为当地的水土流失防治工作发挥了重 要作用。基于此,本文选取晋西黄土区蔡家川流域立 地条件、林分结构相似的刺槐人工林作为研究对象, 长期定位观测刺槐树干液流与环境因子变化,其主要 目的是在综合考虑环境因子与刺槐蒸腾变化不同步 的前提下,探究不同时间尺度下刺槐蒸腾对环境因子 的响应,研究影响刺槐蒸腾耗水的主要环境因子,分 析不同时间尺度下刺槐蒸腾与环境因子关系的差异 性,并建立不同时间尺度下刺槐蒸腾与环境因子关系的差异 的方程模型,以期为黄土区刺槐人工林地建设和水资 源管理提供理论依据。

### 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地位于晋西黄土残塬沟壑区的蔡家川流域 (36°14′27″—36°18′23″N,110°39′45″—110°47′45″E), 蔡家川流域属于黄河支流,面积 40.10 km²。该流域 处于温带大陆性季风气候,海拔 900~1 513 m,多年 平均气温 10 °C,年内降水分配不均,主要集中在 6— 9月,约占全年降水的 70%,年均降水量 575.9 mm, 年均蒸发量 1 723.9 mm。研究区土壤主要为褐土, 黄土母质。该地营造防护林中主要乔木树种有山杨 (Populus davidiana Dode)、刺槐(Robinia pseudoacacia)、辽东栎(Quercus wutaishansea Mary)、侧 柏(Platycladus orientalis (Linn.) Franco)等。

### 1.2 样地与样树的选取

通过文献与现场林分调查发现,研究区刺槐多栽 植于 1991—1995年,林龄为 27~31年,林分密度范 围为 1 650~2 550 株/hm<sup>2</sup>,坡向基本为阳坡和半阳 坡,研究区内刺槐林地林分特征及其立地条件基本相 似。基于调查结果,选取 3 块可代表研究区刺槐林平 均水平(如林分密度、林龄以及立地条件)的刺槐样 地,在所选择的3块样地中进行每木检尺后按照径阶 比例(图1)选择树干笔直、长势良好,无病虫害的标 准木8株,样地及样树基本特征见表1和表2。

### 1.3 树干液流的测定及整树蒸腾量的计算

采用 Granier 热扩散探针监测树干液流速率,探 针安装在距离地面约 1.3 m 的样树树干上,采用铝箔 纸将安装部位包裹起来,防止雨水与太阳直射影响数 据的准确性,设置为每 30 s 读取 1 次数据,每 15 min 记录 1 次数据。刺槐蒸腾速率采用 Granier 经验公 式获得,计算公式为:

$$J_{s} = 0.0119 \times \left(\frac{\Delta T_{m} - \Delta T}{\Delta T}\right)^{1.231} \times 3600 \qquad (1)$$

式中: $\Delta T_m$  为无液流时加热探针与参考探针的最大 温差值( $\mathbb{C}$ ); $\Delta T$  为瞬时温差值( $\mathbb{C}$ ); $J_s$  为刺槐蒸腾 速率[g/( $\mathbf{h} \cdot \mathbf{cm}^2$ )]。



#### 表1 样地基本信息

样地	海拔/	坡度/	林龄/	平均密度/	平均	平均	灌木	草本	却闪床
编号	m	(°)	а	(株・hm <sup>-2</sup> )	树高/m	胸径/cm	盖度/%	盖度/%	即凶及
1	1098	23	28	1825	10.2	16.6	23.5	32.4	0.56
2	1123	22	27	1750	9.5	18.1	26.7	36.7	0.52
3	1256	23	30	2050	10.5	21.5	25.3	35.3	0.56

表 2 标准木基本	参数
-----------	----

树种	胸径/	树高/	边材面积/
编号	cm	m	$cm^2$
1	16.8	9.5	85.2
2	17.4	10.3	90.2
3	18.0	11.0	93.4
4	18.2	10.8	92.6
5	20.6	9.8	138.7
6	21.3	11.2	140.2
7	21.9	11.0	141.5
8	22.5	10.2	142.2

用生长锥钻取试验样木木芯,分别测量提取木芯 的树皮厚度和边材厚度,计算该树的边材面积。边材 面积确定方程为:

$$A_{s} = \pi \left[ \left( \frac{\text{DBH}}{2} - R_{1} \right)^{2} - \left( \frac{\text{DBH}}{2} - R_{1} - R_{2} \right)^{2} \right] (2)$$

式中: $A_s$ 为样树边材面积( $cm^2$ );DBH 为样树胸径(cm);  $R_1$ 为样树树皮厚度(cm); $R_2$ 为样树边材厚度(cm)。

整树单位时间蒸腾量(E,kg/h)的计算公式为:

$$E = (A_s \times J_s) / 1000 \tag{3}$$

### 1.4 环境因子的测定

1.4.1 气象因子的测定 刺槐样地内安装有全自动 气象站同步观测距地面 20 m 处的气象因子,包括太 阳辐射(Rs, $W/m^2$ ,CMP-3总辐射传感器)、空气温 度(Air T,C,HMP155A 空气温湿度传感器)、空气 相对湿度(RH,%,HMP155A 空气温湿度传感器)、 降雨量(P,mm,TE525MM 翻斗式雨量桶)、风速 (WS,m/s,010C-1 风速传感器),林内 20 cm 深度 土壤温度( $T_{soil}$ ,C,109 土壤温度传感器),设置数据 采集时间间隔为 30 min,并采用 CR1000 数据采集与 记录器收集数据,水汽压亏缺(VPD)综合反映空气 相对湿度与空气温度的协同效应,计算方法为:

$$VPD = 0.611 e^{\frac{17.502T}{T+240.97}} (1 - RH)$$
(4)

1.4.2 土壤含水量的测定 在样地内布设 Enviro-SMART 土壤水分测定仪 FDR,该仪器可对林地土 壤水分长期连续观测,观测深度为 0—100 cm,分为 0—10,10—20,20—40,40—70,70—100 cm 共 5 个 观测层。同时,为了对 FDR 的测量数据进行标定,对 每个试验样地使用土钻取土,并用烘干法测定土壤 含水量。

各土层储水量计算公式为:

$$W_i = \theta_i \times D_i \tag{5}$$

总储水量计算公式为:

$$W = \sum_{1}^{5} \theta_i \times D_i \tag{6}$$

式中: $W_i$ 为各土层储水量(mm); $\theta_i$ 为第*i*个探头监测的土壤体积含水量(%); $D_i$ 为各测层厚度(mm); W为0—100 cm土层的总储水量(mm)。

土壤相对有效含水率(REW)计算公式为:

$$REW = \frac{SWC - SWC_{min}}{SWC_{max} - SWC_{min}}$$
(7)

式中:SWC 为实测土壤含水量;SWC<sub>min</sub>为研究期间 实测土壤含水量最小值;SWC<sub>max</sub>为林地田间持水量。

### 1.5 Guass 方程

$$f(t) = y + \frac{A}{\omega \sqrt{\pi/2}} e^{-2(t-t_c)^2/\omega^2}$$
(8)

式中:f(t)为拟合函数的因变量;t 为时间;t。为因变

量达到峰值时对应时间;y、A、 $\omega$ 为方程参数。

### 1.6 数据处理

采用 Excel 2019 软件对数据进行处理与计算, 使用 SPSS 22 和 R 语言软件分析数据,采用 Origin 2021 软件绘图,并将蒸腾速率与环境因子数据进行 归一化处理。在小时、日尺度上采用 Person 相关分 析法分析蒸腾速率与环境因子的相关性,月尺度上采 用皮尔逊相关分析法;采用蒸腾速率与单个环境因子 回归方程拟合度 R<sup>2</sup>量化环境因子对蒸腾速率的影响 程度;采用逐步回归法构建模型解释环境因子对蒸腾 速率的综合影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分动态变化

由图 2 可知,0-40 cm 土层土壤含水量随降雨 波动明显,而 40-100 cm 土层土壤含水量变化不明 显,根据降雨历时与降雨量分析可得 5-8 月短期降 雨只能补充浅层土壤水分,深层土壤水分需要历时 长、降雨量大才能得到补充,因此在分析刺槐蒸腾与 土壤水分关系时将土壤水分分为 2 个深度,即降雨快 速补充土壤水分层(0-40 cm)和土壤水分不明显变 化层(40-100 cm)。



### 2.2 小时尺度刺槐蒸腾与环境因子的关系分析

已有研究<sup>[13-15]</sup>表明,植物蒸腾与气象因子的变化 在时间上并不同步,目前关于刺槐蒸腾与气象因子变 化的时间差异性研究多集中在太阳辐射、空气温度、 水汽压亏缺3个方面,有关土壤温度的研究较少,采 用 Guass 方程绘制刺槐蒸腾速率与气象因子随时间 变化过程线(图 3),刺槐蒸腾与太阳辐射、空气温度、 水汽压亏缺、土壤温度变化存在时间差异性,达到峰 值的差异时长分别为 30,-90,-90,-180 min。





根据以上分析结果采用 Person 相关分析法分析 刺槐蒸腾速率与环境因子的关系(表 3),在小时尺度 下,除空气相对湿度外,刺槐蒸腾速率与环境因子均 为正相关关系,相关关系由大到小分别为太阳辐射、 空气温度、水汽压亏缺、土壤温度、空气相对湿度、风 速、0—40 cm 土层土壤含水量、40—100 cm 土层土 壤含水量。

刺槐蒸腾速率与各个环境因子进行回归分析,拟 合度 R<sup>2</sup>表示环境因子对蒸腾速率变化解释程度(表 4),小时尺度下,太阳辐射与蒸腾速率的回归方程对 蒸腾速率变化解释程度最大,解释程度为 68.3%;其 次是空气温度,解释程度为 47.6%;土壤含水量的解 释程度最小,解释程度为 0.03%左右。刺槐蒸腾速率 与环境因子的逐步回归分析反映了刺槐蒸腾速率与 环境因子的综合影响,刺槐蒸腾速率变化受到太阳辐 射、空气温度、0—40 cm 土层土壤含水量、风速、土壤 温度、水汽压亏缺、空气相对湿度的综合影响,逐步回 归方程式能解释 74.7%蒸腾速率变化。

#### 表 3 不同时间尺度下刺槐蒸腾速率与环境因子相关分析

	相关系数				
环境因子	小时尺度	日尺度	月尺度		
	蒸腾速率	蒸腾速率	蒸腾速率		
太阳辐射	0.829 * *	0.402 * *	0.858 * *		
空气温度	0.726 * *	0.491 * *	0.955 * *		
土壤温度	0.599 * *	0.485 * *	0.952 * *		
空气相对湿度	-0.563**	-0.381 * *	-0.710 *		
水汽压亏缺	0.721 * *	0.416 * *	0.761 *		
风速	0.188 * *	0.049	-0.235		
0-40 cm 土层土壤含水量	0.185 * *	—	-0.913 * *		
40-100 cm 土层土壤含水量	0.156 * *	_	-0.932**		

注:\*\*表示极显著相关(p<0.01);\*表示显著相关(p<0.05)。

### 2.3 日尺度刺槐蒸腾与环境因子的关系分析

2.3.1 日尺度下不同土壤含水量对刺槐蒸腾的影响 以土壤有效含水率(REW)为依据研究日尺度不同 土壤含水量条件下刺槐蒸腾速率的变化特征(图 4), 5-8月(生长初期与生长盛期)0-40 cm 土层土壤有效 含水率小于 0.6,40-100 cm 土层土壤有效含水率小于 0.1,说明浅层和深层土壤水分均处于亏缺状态,且由 于 5-8月降雨无法补充深层土壤水分,因此深层土壤 水从亏缺更严重,9-10月(生长末期)降雨补充水分,土 壤有效含水率升高,此时刺槐进入生长末期,蒸腾速率 变小。为了准确研究植物蒸腾对不同土壤含水量的 响应,选取 5-8月的试验数据进行统计分析。由表 5可知,当 0-40 cm 土层土壤有效含水率为 0~0.1, 0.1~0.2,0.2~0.3,0.3~0.5时,刺槐平均蒸腾速率 分别为 1.789,2.018,2.050,2.046 g/(h·cm<sup>2</sup>),当 0-100 cm 土层土壤有效含水率为 0~0.1 时,刺槐 平均蒸腾速率为 1.933 g/(h·cm<sup>2</sup>),说明浅层土壤 有效含水率与刺槐蒸腾速率成正比,浅层土壤含水量 的增加能够提高刺槐的蒸腾速率。

表 4 不同时间尺度下蒸腾速率与环境因子回归分析拟合度

	小时尺度		日尺度		月尺度	
小 現 因 丁	$R^{2}$	显著性	$R^{2}$	显著性	$R^{2}$	显著性
太阳辐射	0.683	0	0.161	0	0.735	0.006
空气温度	0.476	0	0.241	0	0.912	0
土壤温度	0.216	0	0.235	0	0.906	0
空气相对湿度	0.317	0	0.145	0	0.503	0.049
水汽压亏缺	0.441	0	0.173	0	0.760	0.028
风速	0.188	0	0	0	0.055	0.578
0—40 cm 土层土壤含水量	0.034	0	0.506	0	0.913	0.002
40—100 cm 土层土壤含水量	0.024	0	0.423	0	0.932	0





表 5 不同土壤有效含水率下日均蒸腾速率变化特征

	日均蒸腾速率/(	$\mathbf{g} \cdot \mathbf{cm}^{-2} \cdot \mathbf{h}^{-1}$ )
REW	0—40 cm	40—100 cm 土层
	土层土壤含水量	土壤含水量
0~0.1	$1.789 \pm 0.610$	$1.933 \pm 0.570$
0.1~0.2	$2.018 \pm 0.496$	—
0.2~0.3	$2.050 \pm 0.551$	—
0.3~0.5	$2.046 \pm 0.377$	—

注:表中数据为平均值±标准差;一表示 REW 分类为无。

2.3.2 日尺度下刺槐蒸腾对环境因子的响应 由图5 可知,日尺度上,刺槐蒸腾速率与空气温度、土壤温

度、太阳辐射、水汽压亏缺呈现明显的正相关,相关系数分别为 0.491,0.485,0.402,0.416,与空气相对湿度 呈负相关,相关系数为一0.381,与风速的相关性不明 显,相关系数为 0.049(*p*>0.05)(表 3)。

由表 4 和表 6 可知, 日尺度下, 0—40 cm 土层土 壤含水量与蒸腾速率的回归方程对蒸腾速率变化解 释程度最大, 解释程度为 50.6%; 其次是 40—100 cm 土层土壤含水量、空气温度、土壤温度, 解释程度分别 为 42.3%, 24.1%, 23.5%; 空气相对湿度的解释程度 最小, 解释程度为 14.5%。刺槐蒸腾速率与环境因子 的逐步回归分析引入了空气温度、空气相对湿度、



图 5 日尺度刺槐蒸腾速率与环境因子响应

### 2.4 月尺度刺槐蒸腾与环境因子的关系分析

由图 6 可知,在月尺度上,刺槐蒸腾量与空气温 度、土壤温度变化特征一样,均为先增后减变化;2 个 深度土壤含水量的变化特征与蒸腾量相反,为先减 后增变化;风速、水汽压亏缺、太阳辐射逐月递减; 空气相对湿度逐月递增。采用皮尔逊相关分析法分 析月尺度上刺槐蒸腾速率与各环境因子的相关关 系(表 3)显示,蒸腾速率与太阳辐射、空气温度、土 壤温度呈极显著正相关关系,相关系数分别为0.858, 0.955,0.952,与 0—40 cm 土层土壤含水量、40—100 cm 土层土壤含水量呈极显著负相关关系,相关系数 为-0.913,-0.932;刺槐蒸腾速率与表征大气湿度 的指标空气相对湿度、水汽压亏缺相关性较弱,相关 系数分别为-0.710,0.761;蒸腾速率与风速在月尺 度上没有相关关系。

由表4和表6可知,月尺度下,2个深度土壤含 水量与蒸腾速率的回归方程对蒸腾速率变化解释程 度最大,解释程度分别为91.2%,93.2%;其次是空气 温度、土壤温度,解释程度分别为91.2%,90.6%,说 明月尺度上刺槐蒸腾主要受到土壤含水量与温度因 子的影响。刺槐蒸腾速率与环境因子的逐步回归分 析引入了40—100 cm 土层土壤含水量、空气温度,回 归方程式能解释97.6%的蒸腾变化。

- 3 讨论
- **3.1** 不同时间尺度下刺槐蒸腾速率对环境因子响应 忽视蒸腾与环境因子变化的时间差异会导致蒸腾

速率对环境因子的响应研究存在误差,环境因子与蒸腾 速率相关性研究中很少考虑两者变化在时间上的差异 性,为提高研究结果的准确性,本文研究得到刺槐蒸腾 速率与太阳辐射、空气温度、土壤温度、水汽压亏缺的差 异时长,此结论与前人<sup>[14+15]</sup>的研究结果相似,可能是树 种与地区差异的影响,差异时长与前人<sup>[14-15]</sup>的研究结 果不同。分析刺槐蒸腾速率与环境因子关系可得,小 时尺度上对刺槐蒸腾速率影响较大的环境因子为太 阳辐射、空气温度、水汽压亏缺,阮存鑫等<sup>[16]</sup>研究表 明,影响麻栎和栓皮栎蒸腾的气候因子依次为太阳辐 射、饱和水汽压、空气温度和土壤含水量,且不同天气 下植物蒸腾对各气候因子响应的敏感度不同。

日尺度上,研究不同土壤水分条件下刺槐蒸腾速率 发现,5—8月刺槐林地一直处于水分短缺状态(REW < 0.4),伴随着土壤有效利用水分效率提高,刺槐蒸腾速 率增大。降雨是研究区土壤水分的主要补给来源,它 通过影响土壤含水量的变化来影响植物蒸腾,目前关 于植物蒸腾对降雨响应的研究已有很多,陈胜楠 等<sup>[17]</sup>通过分析不同降雨类别前后油松蒸腾量变化比 例发现,降雨对油松蒸腾具有促进作用;何秋月等<sup>[18]</sup> 采用人工截雨试验发现,降雨的减少会导致刺槐蒸腾 速率降低并引起其对气象因子敏感性减弱;赵春彦 等<sup>[19]</sup>研究认为,不同量级小降雨对胡杨蒸腾的影响 存在差异。本研究发现,5—8月降雨量只能补充浅 层土壤水分,而日尺度下浅层土壤水分对刺槐蒸腾的 影响较大,说明浅层分布着大量刺槐细根,浅层水分 的变化会影响植物根系吸水能力。通过对日尺度上 刺槐蒸腾速率与环境因子分析可得,主导环境因子为 土壤含水量、空气温度、土壤温度,这与莫康乐等<sup>[8]</sup>的 研究结果不同,且他的研究并未将土壤温度作为环境 因子考虑在内,而孙旭等<sup>[20]</sup>研究认为,土壤温度才是 主导北京山区油松液流的关键环境因子,本文在对晋 西黄土区刺槐蒸腾研究中也发现了土壤温度的重要 性,因此各地在研究环境因子对树种耗水影响时需考 虑土壤温度这一因素。在月尺度上,有研究<sup>[20]</sup>认为, 土壤温度是影响植物蒸腾的主导环境因子,本文通过 对月尺度上刺槐蒸腾速率与环境因子的分析认为主 导环境因子为土壤含水量、空气温度、土壤温度,可能 是地理位置与树种差异导致不同的研究结果<sup>[21]</sup>,本 研究只聚焦于单一空间尺度的研究,研究结果具有一 定的局限性,在今后的研究应该扩大研究的空间尺 度,建立不同尺度下植物蒸腾与环境因子关系模型, 为林地建设与水资源管理提供理论指导。

方程

时间尺度	环境因子	方程式	$R^{2}$	
	太阳辐射	$Y = 0.631 + 0.005 x_5$	0.683	
	空气温度	$Y = -1.021 + 0.093 x_3 + 0.004 x_5$	0.727	
	0-40 cm 土层土壤含水量	$Y = -2.088 + 0.009x_1 + 0.120x_3 + 0.004x_5$		
小时	风速	$Y = -2.189 + 0.009x_1 + 0.113x_3 + 0.004x_5 + 0.100x_8$	0.738	
	土壤温度	$Y = -1.123 + 0.006x_1 + 0.182x_3 - 0.111x_4 + 0.003x_5 + 0.121x_8$	0.742	
	水汽压亏缺	$Y = -1.294 + 0.006x_1 + 0.234x_3 - 0.146x_4 + 0.003x_5 - 0.264x_7 + 0.154x_8$	0.745	
	空气相对湿度	$Y = -0.823 + 0.007x_1 + 0.239x_3 - 0.136x_4 + 0.004x_5 - 0.009x_6 - 0.537x_7 + 0.148x_8$	0.747	
	空气温度	$Y = 0.033 - 0.362x_3$	0.241	
	空气相对湿度	$Y = 0.149 - 0.298x_3 - 0.130x_6$	0.329	
H	40—100 cm 土层土壤含水量	$Y = 0.343 - 0.274x_2 + 0.181x_3 - 0.133x_6$	0.451	
	水汽压亏缺	$Y = 0.574 - 0.222x_2 + 0.358x_3 - 0.479x_6 - 0.446x_7$	0.592	
月	40—100 cm 土层土壤含水量	$Y = 0.916 - 1.159 x_2$	0.898	
	空气温度	$Y = 0.266 - 0.626x_2 + 0.826x_3$	0.976	

注:x1表示 0-40 cm 土层土壤含水量;x2表示 40-100 cm 土层土壤含水量;x3表示空气温度;x4表示土壤温度;x5表示太阳辐射;x6表示空 气相对湿度;x7表示水汽压亏缺;x8表示风速。



图 6 刺槐蒸腾量与环境因子月均值变化

### 3.2 不同时间尺度下刺槐蒸腾对环境因子响应差异

本研究发现,不同尺度下刺槐蒸腾与环境因子的关 系存在差异,小尺度浅层土壤含水量对蒸腾速率影响较 大,长时间尺度浅层与深层土壤含水量共同作用影响刺 槐蒸腾。此外,随着尺度的增大,土壤温度与土壤含水 量对刺槐蒸腾的影响逐渐增大;太阳辐射、水汽压亏缺 对刺槐蒸腾的影响逐渐减小;风速仅在小时尺度上对 蒸腾有影响,日、月尺度上无影响。研究结果说明,在 较大尺度下,地下因素逐渐变成影响蒸腾的主导因 子,地上因素的作用逐渐减弱。考虑到降雨量、地下 水与地被覆盖物等会直接影响土壤状态变化,间接影 响到植物蒸腾过程,因此,在今后的植物蒸腾研究中, 需要进一步探讨间接因子对蒸腾变化的作用机理。

小时尺度上的逐步回归中,一共进入7个环境因 子,第1进入因子为太阳辐射,第2进入因子为空气 温度,第3进入因子为0—40 cm 土层土壤含水量,第 4进入因子为风速,第5进入因子为土壤温度,第6 进入因子为水汽压亏缺,第7进入因子为空气相对湿 度;日尺度上的逐步回归中,一共进入4个环境因子, 第1进入因子为空气温度,第2进入因子为空气相对 湿度,第3进入因子为40—100 cm 土层土壤含水量, 第4进入因子为水汽压亏缺;月尺度的逐步回归中, 一共进入2个环境因子,第1进入因子为40—100 cm 土层土壤含水量,第2进入因子为空气温度。这 个结果说明随着尺度的增大,在构建刺槐蒸腾模型时 需要考虑的因素会减少,因此较大尺度上的刺槐蒸腾 估算可以考虑通过监测环境因子达到目的。

### 4 结论

(1)小时尺度下,刺槐蒸腾与太阳辐射、空气温度、水汽压亏缺、土壤温度变化在时间上不同步,错位时长分别为 30,-90,-90,-180 min。

(2)不同深度土壤水分对刺槐蒸腾的影响在时间 尺度上存在差异,小时间尺度取决于表层土壤水分, 长时间尺度同时取决于表层与较深层土壤含水量。

(3)刺槐蒸腾与环境因子的关系在不同时间尺度 下存在差异,在小时尺度下太阳辐射、空气温度、水汽 压亏缺为主导因子;日尺度下,空气温度、土壤含水 量、土壤温度为主导因子;月尺度下空气温度、土壤含 水量、土壤温度为主导因子。

(4)在估算植物蒸腾耗水时,小尺度推荐使用测 定植物蒸腾的仪器直接计算,大尺度可以通过监测较 少的环境因子间接计算。

### 参考文献:

- [1] Liu H, Guo J B, Liu Z B, et al. Time-lag effect between sap flow and environmental factors of *Larix principisrupprechtii* Mayr [J].Forests,2019,10(11):971-986.
- [2] Daley M J, Phillips N G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest [J]. Tree Physiology, 2006,26(4):411-419.
- [3] 赵春彦,司建华,冯起,等.树干液流研究进展与展望[J]. 西北林学院学报,2015,30(5):98-105.
- [4] Deng Y, Wu S, Ke J, et al. Effects of meteorological factors and groundwater depths on plant sap flow velocities in karst critical zone [J].Science of the Total Environment, 2021, 781; e146764.
- [5] Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, et al. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environ-

ment in Northern China [J]. Journal of Hydrology, 2011,402(3):388-400.

- [6] 卢志朋,魏亚伟,李志远,等.辽西北沙地樟子松树干液 流的变化特征及其影响因素[J].生态学杂志,2017,36 (11):3182-3189.
- [7] 王文杰,孙伟,邱岭,等.不同时间尺度下兴安落叶松树 干液流密度与环境因子的关系[J].林业科学,2012,48 (1):77-85.
- [8] 莫康乐,陈立欣,周洁,等.永定河沿河沙地杨树人工林 蒸腾耗水特征及其环境响应[J].生态学报,2014,34 (20):5812-5822.
- [9] 王玥, 鄢春华, 邱国玉. 土壤温度对油松树干液流启动与 停止的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55 (3): 580-586.
- [10] 徐军亮,马履一.土壤温度对油松(Pinus tabulaeformis)树干液流活动的影响[J].生态学报,2008,28 (12):6107-6112.
- [11] 陈丽华,余新晓.晋西黄土地区水土保持林地土壤入渗性 能的研究[J].北京林业大学学报,1995,17(1):42-47.
- [12] 王国梁,刘国彬,常欣,等.黄土丘陵区小流域植被建设的 土壤水文效应[J].自然资源学报,2002,17(3):339-344.
- [13] 夏银华,章新平,戴军杰,等.亚热带季风区樟树蒸腾与
   气象因子之间的时滞效应[J].水土保持学报,2021,35
   (5):194-203.
- [14] 王华,欧阳志云,郑华,等.北京城区常见树种生长季树 干液流的时滞特征[J].应用生态学报,2009,20(9): 2111-2117.
- [15] 韩磊,展秀丽,王芳,等.河东沙区侧柏树干液流与蒸腾
   驱动因子的时滞效应研究[J].生态环境学报,2018,27
   (8):1417-1423.
- [16] 阮存鑫,胡海波,季婧,等.长江三角洲地区麻栎和栓皮 栎蒸腾规律及其对气候因子的响应[J].水土保持学 报,2021,35(2):338-344.
- [17] 陈胜楠,孔喆,陈立欣,等.半干旱区城市环境下油松林 分蒸腾特征及其影响因子[J].生态学报,2020,40(4): 1269-1280.
- [18] 何秋月,闫美杰,张建国,等.黄土高原半湿润区刺槐树 干液流对人工截留降雨输入及环境因子的响应[J].植 物生态学报,2018,42(4):466-474.
- [19] 赵春彦,司建华,冯起,等.胡杨(Populus euphratica)蒸 腾耗水对小降雨事件的响应[J].中国沙漠,2017,37 (5):942-949.
- [20] 孙旭,杨文慧,焦磊,等.不同时间尺度北京蟒山油松树 干液流对环境因子的响应研究[J].生态学报,2022,42 (10):4113-4123.
- [21] Gutierrez L J, TorNgern P, Oren R, et al. How tree species, tree size, and topographical location influenced tree transpiration in northern boreal forests during the historic 2018 drought [J].Global Change Biology,2021,27(13):3066-3078.