

# 黄土丘陵区辽东栎和刺槐树干液流时滞效应与蒸腾特征的关联性

杨洁<sup>1,2</sup> 吕金林<sup>2,3</sup> 何秋月<sup>1,2</sup> 闫美杰<sup>2,3</sup> 李国庆<sup>2,3</sup> 杜盛<sup>2,3\*</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 运用 Granier 热扩散探针法,于2016年7—9月对半干旱黄土丘陵区天然次生林树种辽东栎和人工林树种刺槐的树干液流进行连续测定,并同步监测气象因子和土壤含水量,用错位相关法分析液流通量密度与空气水汽压亏缺日变化的时滞长度,研究2个树种不同径级个体在不同土壤水分条件下液流通量密度与蒸腾驱动因子之间的时滞效应。结果表明:辽东栎和刺槐液流通量密度的日变化节律与气象因子显著相关,空气水汽压亏缺峰值的出现较辽东栎树干液流通量密度滞后 118.2 min,较刺槐树干液流通量密度滞后 39.5 min;而光合有效辐射的峰值通常滞后于辽东栎 12.4 min,提前于刺槐 68.5 min。液流通量密度和空气水汽压亏缺的时滞长度与树种和土壤含水量显著相关,辽东栎、刺槐在土壤含水量较高时段的时滞长度分别大于土壤含水量较低时段 32.2 和 68.2 min。时滞长度与径级的相关性整体上未达到显著水平,但在土壤含水量较低时段小径级刺槐的时滞长度大于大径级 21.4 min,差异达到了显著水平。两树种液流通量密度与空气水汽压亏缺之间的时滞效应反映了对蒸腾驱动因子的敏感性,较好的土壤水分条件有利于液流通量密度提早达到峰值,较低土壤水分会导致树干液流对气象环境因子响应的敏感性降低;刺槐树干液流受土壤水分的影响更显著。

**关键词** 辽东栎; 刺槐; 土壤含水量; 径级; 树干液流; 时滞

**Time lag of stem sap flow and its relationships with transpiration characteristics in *Quercus liaotungensis* and *Robinia pseudoacacia* in the loess hilly region, China.** YANG Jie<sup>1,2</sup>, LYU Jinlin<sup>2,3</sup>, HE Qiu-yue<sup>1,2</sup>, YAN Mei-jie<sup>2,3</sup>, LI Guo-qing<sup>2,3</sup>, DU Sheng<sup>2,3\*</sup> (<sup>1</sup> College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup> State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup> Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** Using Granier-type thermal dissipation probes (TDP), we measured stem xylem sap flow of the natural dominant species *Quercus liaotungensis* and a reforestation species *Robinia pseudoacacia* from July to September in 2016 in the semiarid loess hilly region. Meteorological factors and soil water content were simultaneously monitored during the study period. Using cross-correlation analysis, time lag between diurnal patterns of sap flux density and vapor pressure deficit (VPD) was quantitatively estimated. Differences in the time lag between the two species and possible influence by different diameter classes and soil water contents were analyzed. The results showed that the diurnal courses of sap flux density were similar to those of meteorological factors, with daily peaks earlier than VPD. The peak of VPD lagged behind the sap flux densities of *Q. liaotungensis* and *R. pseudoacacia* 118.2 min and 39.5 min, respectively. The peak of PAR lagged behind the sap flux density of *Q. liaotungensis* 12.4 min, but was 68.5 min ahead of that for *R. pseudoacacia*. Time lag between sap flux density and VPD significantly varied between tree species and was affected by soil

本文由国家重点研发计划项目(2017YFC0504601)和国家自然科学基金项目(41471440)资助 This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0504601) and the National Natural Science Foundation of China (41471440).

2019-03-05 Received, 2019-05-19 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

water content. Those during higher soil water content period were about 32.2 min and 68.2 min longer than those during the period with lower soil water content for the two species, respectively. There was no correlation between time lag and tree diameter classes. The time lag between VPD and sap flux density for *R. pseudoacacia* was about 21.4 min longer in smaller diameter trees than in larger trees, which was significantly different under the lower soil water content. Our results suggested that the time lag effect between VPD and sap flux densities in the two species reflected their sensitivities to driving factors of transpiration, and that higher soil water content was favorable to sap flux density reaching its peak early. The lower soil water content might lead to lower sensitivity of the trees to meteorological factors. *R. pseudoacacia* was more sensitive to changes of soil water content.

**Key words:** *Quercus liaotungensis*; *Robinia pseudoacacia*; soil water content; diameter class; sap flow; time lag.

蒸腾作用是植物将其体内的水分以水蒸气的形式散失到大气中的过程.叶部气孔蒸腾是蒸腾作用的主要形式,也是植物从土壤中吸收水分的主要动力.植物个体间的差异及环境条件的不同都会影响蒸腾耗水.测定树干液流是研究树木蒸腾耗水的重要手段.树干液流动态及其对环境因子的响应特征基本上反映叶部气孔蒸腾及其对环境因子的响应特征<sup>[1]</sup>.有研究表明,树干液流与光合有效辐射、空气温度、空气相对湿度以及空气水汽压亏缺等蒸腾驱动因子都有很强的相关性<sup>[2-3]</sup>,但是受树体储水、根系吸水和木质部水分传输效率以及树种蒸腾耗水策略的遗传特性等多种因素的影响,环境因子与基于树干液流测定值的蒸腾变化动态之间存在几分钟到几个小时不等的时间差,即液流的时滞现象<sup>[4-5]</sup>.如果通过构建树干液流对环境因子响应的拟合方程对冠层蒸腾和气孔导度进行模拟,考虑时滞现象可以提高模拟的准确性.有研究发现,在忽略环境因子与树干液流的时滞效应时会导致估测结果产生高达30%的误差<sup>[6]</sup>.

对新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis*)和兴安落叶松(*Larix gmelinii*)生长季的液流动态研究发现,液流通量密度通常滞后于光照但提前于空气水汽压亏缺<sup>[7-8]</sup>.关于辽东栎(*Quercus liaotungensis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等树种树干液流日变化的研究显示,液流通量密度的峰值通常滞后于太阳辐射峰值并提前于空气温度和相对湿度,但是提前于太阳辐射的情况也很常见<sup>[1,9-10]</sup>.影响液流与环境因子时滞的因素很多.王华等<sup>[11]</sup>对几个城市绿化树种的研究发现,液流速率与蒸腾驱动因子之间的时滞主要受生物学结构因素(树高、胸径、冠层投影面积、边材面积等)及夜间水分补充量的影响,与树种无明显关系;另有研究表明,边材的导水效率可能是影响时滞的重要原因<sup>[12]</sup>;还有研究发现,植物体内

的储存水也是影响树干液流时滞的重要因素<sup>[13]</sup>.可见,不同树种或个体间时滞效应的差异及其机制仍有待进一步研究.另外,目前关于不同土壤水分条件及不同径级对时滞的影响研究较少,这方面的研究对于揭示根系吸水阻力对时滞的影响以及不同树种和个体蒸腾耗水对环境因子的响应机制十分重要.

辽东栎是我国温带森林的主要建群种,在黄土高原中部分布着大面积的天然辽东栎次生林;刺槐是速生外来树种,适应性强,在黄土高原有大规模栽培.辽东栎天然次生林和刺槐人工林在该地区的水土保持、水源涵养和生态服务等方面发挥着重要作用<sup>[14]</sup>.关于辽东栎、刺槐树干液流的研究已较多,例如关于边材厚度、边材面积、土壤水分和气象环境因子对辽东栎液流通量密度的影响<sup>[1,15-17]</sup>,辽东栎、刺槐林分蒸腾耗水及其对环境因子的响应特征<sup>[9-10,18]</sup>,以及刺槐林树干液流对人工截留降雨处理的响应<sup>[19]</sup>等.本研究对比分析了辽东栎和刺槐不同径级个体在不同土壤水分条件下的时滞效应特征,探究液流时滞效应与树种蒸腾耗水策略的相互关系,为该地区生态建设和森林植被的科学管理提供科学依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地位于陕西省延安市南郊公路山林区(36°25' N, 109°32' E),包括距离相近的2个林分,即以辽东栎为建群种的天然次生林和外来树种刺槐人工林,海拔1395 m.该地区具有黄土丘陵沟壑区的典型地形地貌特征,土壤类型为黄绵土,气候属于温带大陆性季风气候,夏季炎热,冬季寒冷干燥.根据延安市气象台1981—2010年的统计数据,该地区年均降雨量为515.8 mm,其中6—9月降雨量占全年降雨量的72%,年均温为10.3℃.辽东栎天然次生

林固定监测样地以辽东栎为主要建群种,伴生树种有山杏(*Armeniaca sibirica*)、桃叶卫矛(*Euonymus bungeanus*)、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)、细裂槭(*Acer stenolobum*)等。刺槐人工林固定监测样地为刺槐纯林。两样地灌木主要有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)和荚蒾(*Viburnum dilatatum*)等,草本植物主要有披针苔草(*Carex lancifolia*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)和三脉紫菀(*Aster ageratoides*)等。

### 1.2 试验材料

2016年4—9月,在2个样地分别选择生长良好的辽东栎8株,刺槐9株。根据胸径大小,将辽东栎样树分为A径级和B径级2组,刺槐样树也分为2个径级(C、D),其中A径级和C径级为较大径级样本,平均胸径分别为20.9和13.5 cm; B径级和D径级为较小径级样本,平均胸径分别为16.5和9.5 cm; 供试样树基本参数见表1。

### 1.3 树干液流测定

于2016年生长季的7—9月,在样树胸高处安装Granier热扩散探针(thermal dissipation probe, TDP),为了避免太阳辐射引起的温度误差,将探针用防辐射铝箔覆盖。用数据采集器(CR1000, Campbell Scientific)每30 s读取一次数据,记录30 min平均值<sup>[17]</sup>。

根据监测得到的加热探针和参考探针间的温度差,采用Granier经验公式<sup>[20-21]</sup>计算树干边材液流通量密度( $F_d$ , mL·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>),公式如下:

$$F_d = 119 \times \left( \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231}$$

式中: $\Delta T_{\max}$ 为无液流时加热探针与参考探针的最大温差(°C); $\Delta T$ 为瞬时温差(°C)。

### 1.4 气象因子的测定

在样地附近一处空旷地布设气象要素自动监测

装置,实时监测光合有效辐射(PAR)、空气温度( $T$ )、空气相对湿度(RH)和降雨量等。其中,将光量子传感器(Li-190, Li-Cor Inc., USA)水平安装于距地面2 m高处,温湿度计(HMP50, Vaisala, Finland)安装于2 m高的防辐射罩内,分别与数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, Logan, UT, USA)连接,每30 s测量一次,并自动记录30 min平均值。降雨量用水平放置于地面0.5 m高处的翻斗式雨量计(Davis 7852, Davis Instruments, USA)测定,数据记录于HOBO数据采集器(Onset, Bourne, USA)中。空气水汽压亏缺(VPD)可综合反映相对湿度和空气温度的协同效应<sup>[21]</sup>,计算公式如下:

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

式中: $T$ 为空气温度(°C);RH为空气相对湿度(%)。

### 1.5 土壤水分测定

林地土壤水分的测定采用6支S-SMC-M005土壤水分探头连接HOBO数据采集器(Onset, Bourne, USA)记录,对0~100 cm深度范围土壤剖面进行连续监测。探头埋设在样地内具有代表性的位置,将0~100 cm分为6层(0~6、6~12、12~30、30~50、50~70、70~90 cm)监测土壤含水量,每小时记录一次数据,采用各探头对应土层的加权平均计算获得0~100 cm土层的平均容积含水量。

### 1.6 数据处理

选取的液流数据为2016年7—9月期间典型天气(晴天或多云)监测值,其中在7月20—29日选择5 d代表土壤含水量较高时段(15.4%~19.0%),8月28日—9月10日选择9 d作为土壤含水量较低时段(9.0%~11.8%)的监测值。使用Baseliner软件将探针所测得的电压差值计算为树干液流通量密度,建立各样木液流通量密度与对应的光合有效辐射、空气水汽压亏缺数据列。将液流通量密度分别与光合有效辐射和空气水汽压亏缺逐次向前(提前)或向后(滞后)30 min进行错位移动,计算对应时间差的相关系数,将相关系数最大的错位时间确定为时滞时间(正值表示气象因子峰值的时刻滞后于液流峰值,反之为负值)。由于光合有效辐射和空气水汽压亏缺的日变化趋势保持相对稳定的规律,即液流与这2个气象因子的时滞值保持一个固定的差值,所以本研究只分析两树种液流通量密度与空气水汽压亏缺之间的时滞关系。采用多因素方差分析分析树种、径级和土壤含水量状况对时滞影响的显著性;采用独立样本的 $t$ 检验分别比较2个树种液流时滞在不同径级和不同土壤含水量之间的差异显

表1 供试样木数量及其平均树高和胸径

Table 1 Number of sampled trees and their mean height and diameter at breast height (DBH)

树种 Species	径级 Tree diameter classes	样木数 Number	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)
辽东栎	A	4	21.9±2.0a	8.9±0.8a
<i>Quercus liaotungensis</i>	B	4	16.5±1.9b	8.8±0.5a
刺槐	C	5	13.5±2.6a	10.5±2.0a
<i>Robinia pseudoacacia</i>	D	4	9.5±1.4b	9.3±2.4a

同列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

著性.采用 SPSS 20.0 和 SigmaPlot 12.5 软件进行数据统计分析和作图.图表中数据为平均值±标准误.

## 2 结果与分析

### 2.1 两树种液流通量密度的日变化特征

选取一个典型晴天(2016年9月1日),以辽东栎和刺槐各一株样树为例,分析液流通量密度与光合有效辐射、空气水汽压亏缺的日变化特征.从图1可以看出,辽东栎和刺槐液流通量密度的日变化曲线为单峰型,总体上与光合有效辐射和空气水汽压亏缺变化趋势相同,表明在日尺度上蒸腾作用的主要驱动因子是太阳辐射和空气水汽压亏缺.辽东栎和刺槐的液流通量密度与光合有效辐射、空气水汽压亏缺的变化节律存在明显的提前或滞后现象.辽东栎液流通量密度提前于 PAR 和 VPD 时间分别为 60 和 180 min,刺槐液流通量密度滞后于 PAR 60 min,提前于 VPD 60 min.另外,在整个试验期间,辽东栎全部样木液流通量密度提前于 PAR ( $12.4 \pm 0.3$ ) min,提前于 VPD ( $118.2 \pm 0.5$ ) min;刺槐全部样木液流通量密度滞后于 PAR ( $68.5 \pm 0.4$ ) min,提前于 VPD ( $39.5 \pm 0.6$ ) min.可见,树木蒸腾作用的日变化进程在树种间存在提前或滞后的时间差异,也表明不同树种对气象环境因子的响应敏感性存在差异.

### 2.2 土壤含水量对树干液流时滞效应的影响

由于光合有效辐射和空气水汽压亏缺的日变化

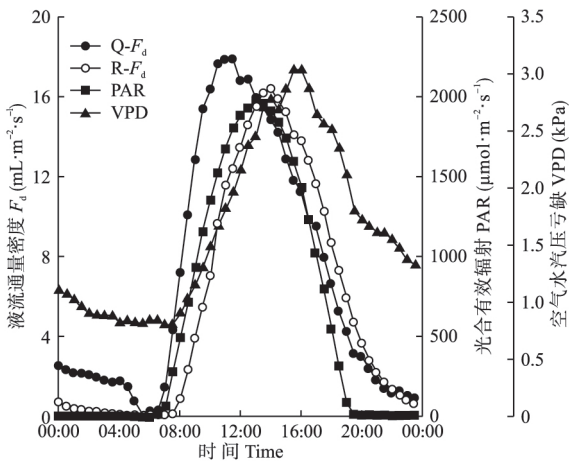


图1 典型晴天内两树种液流通量密度与光合有效辐射及空气水汽压亏缺的日变化

Fig.1 Diurnal changes of photosynthetically active radiation (PAR), vapor pressure deficit (VPD), and sap flux density ( $F_d$ ) in the two tree species on a typical clear day.

Q: 辽东栎 *Quercus liaotungensis*; R: 刺槐 *Robinia pseudoacacia*. 下同 The same below.

趋势保持相对稳定的规律,所以分析树干液流与环境因子之间的时滞效应时,仅选取辽东栎和刺槐典型样树液流通量密度与空气水汽压亏缺之间的关系进行分析.图2以2个树种各选取1株为例,通过错位相关分析获得空气水汽压亏缺与树干液流日变化的时滞值.辽东栎较刺槐呈现出更长的时滞时间,在较高土壤含水量时段,辽东栎、刺槐液流通量密度日变化峰值较空气水汽压亏缺分别提前 180 和 60 min.在较低土壤含水量时段,两树种液流通量密度提前于空气水汽压亏缺的时间分别为 120 和 30 min.可见,两树种在土壤含水量较高时段的时滞都长于土壤含水量较低时段.对两个树种全部供试样木进行分析可知,在较高土壤含水量时段的 7 月 20—29 日(15.4%~19.0%),辽东栎、刺槐液流通量密度日变化峰值较空气水汽压亏缺分别提前 ( $141.0 \pm 3.5$ ) 和 ( $86.7 \pm 2.4$ ) min;在较低土壤含水量时段的 8 月 28 日—9 月 10 日(9.0%~11.8%),两树种液流通量密度提前于空气水汽压亏缺的时间分别为 ( $108.8 \pm 1.1$ ) 和 ( $18.5 \pm 0.2$ ) min,两树种在土壤含水量较高时段的时滞长度分别大于土壤含水量较低时段 32.2 和 68.2 min.以上结果表明,在土壤水较高时,蒸腾作用对空气水汽压亏缺的响应更为敏感,辽东栎的敏感度总体上高于刺槐.

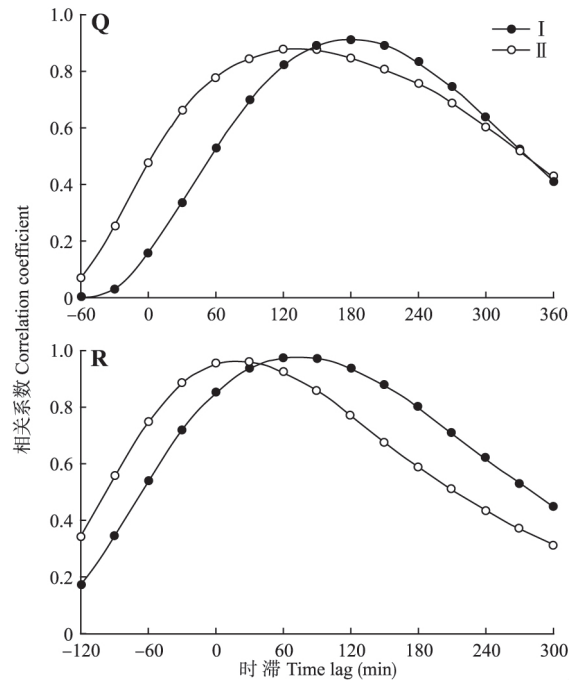


图2 不同土壤含水量下空气水汽压亏缺与两树种液流日变化的时滞效应

Fig.2 Time lag between the diurnal courses of VPD and sap flow of the two tree species under different soil water contents.

I: 较高土壤含水量 High soil water content; II: 较低土壤含水量 Low soil water content. 下同 The same below.

表 2 两树种树干液流时滞受树种、径级、土壤含水量以及交互作用影响的多因素方差分析

Table 2 Multivariate analysis of variance for the effects of species, diameter class, soil water content, and their interactions on sap flow time lag of the two tree species

变量 Variable	df	P
树种 Species	1	0
土壤含水量 Soil water content	1	0.005
径级 Diameter class	1	0.799
树种×土壤含水量 Species×soil water content	1	0.815
树种×径级 Species×diameter class	1	0.380
径级×土壤含水量 Diameter class×soil water content	1	0.990

### 2.3 影响树干液流与环境因子间时滞效应的显著性分析

由表 2 可以看出,辽东栎全部样木液流通量密度提前于 VPD ( $118.2\pm 0.5$ ) min,刺槐全部样木液流通量密度提前于 VPD ( $39.5\pm 0.6$ ) min,树种之间存在显著差异。另外,在较高土壤含水量时段,辽东栎和刺槐液流通量密度较 VPD 分别提前 ( $141\pm 3.5$ ) 和 ( $86.7\pm 2.4$ ) min; 在较低土壤含水量时段,两树种液流通量密度较 VPD 分别提前 ( $108.8\pm 1.1$ ) 和 ( $18.5\pm 0.2$ ) min,不同土壤含水量之间的差异也达到了显著水平。径级间的差异以及各因子间交互作用的影响均未达到显著水平。这表明蒸腾作用对空气水汽压亏缺的响应在树种间差异较大,同时也受土壤水分变化的影响。

### 2.4 土壤含水量和样树直径对树干液流时滞的影响

由图 3 可以看出,同一径级的样树在不同土壤含水量条件下,两树种液流通量密度与空气水汽压亏缺的时滞均表现出显著差异,较高土壤含水量时段的时滞均大于较低土壤含水量时段。刺槐在不同土壤含水量条件下表现出更大的差异,相对于辽东栎在较低土壤含水量时段时滞缩短 22.9%,刺槐在较低土壤含水量时段时滞缩短可达 78.6%,表明刺槐的树干液流通量密度随土壤含水量的变化十分剧烈。辽东栎在相同土壤含水量下的时滞在径级之间无显著差异;而刺槐的时滞呈现出较小径级的样木大于大径级样木 21.4 min,在较低土壤含水量时段径级间差异达到了显著水平,表明小径级个体对气象因子敏感度较大,这可能与其水分调节能力和传输效率有关。

## 3 讨 论

### 3.1 辽东栎和刺槐树干液流时滞效应

大量研究显示,树干液流与蒸腾驱动因子(光

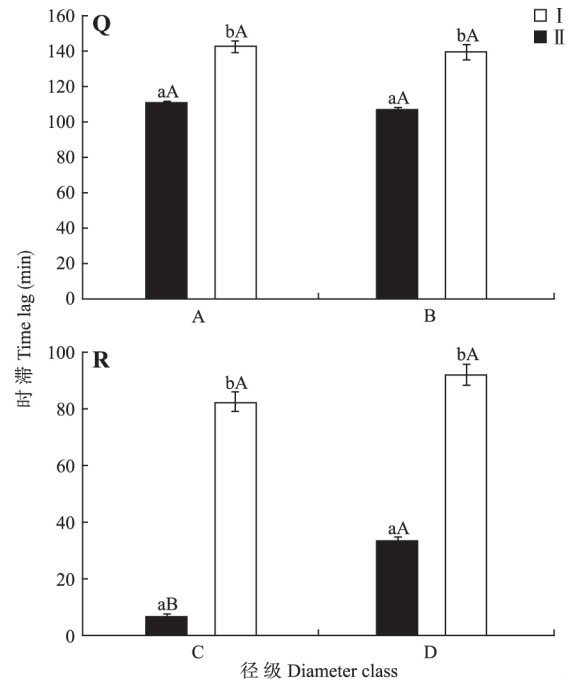


图 3 不同土壤含水量下 2 个径级的辽东栎和刺槐树干液流时滞效应

Fig.3 Sap flow time lag of *Quercus liaotungensis* and *Robinia pseudoacacia* trees with two diameter classes under different soil water contents.

不同小写字母表示同一径级不同土壤含水量之间差异显著,不同大写字母表示同一土壤含水量下 2 种径级之间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters in the same diameter class meant significant difference between different soil water contents, and different capital letters meant significant difference between different diameter classes in the same soil water content at 0.05 level.

合有效辐射和空气水汽压亏缺)的时滞效应普遍存在,但时滞长度存在很大差异。树干液流滞后于光合有效辐射,提前于空气水汽压亏缺的情形较为常见。Ewers 等<sup>[22]</sup>对火炬松(*Pinus taeda*)的研究发现,树干液流与空气水汽压亏缺的时滞范围是 0~30 min。王华等<sup>[11]</sup>报道了 5 个城市树种的树干液流与总辐射之间存在 10~70 min 的时滞,与空气水汽压亏缺之间的时滞范围是 47~130 min。但是黄德卫等<sup>[23]</sup>对马尾松(*Pinus massoniana*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、木荷(*Schima superba*)和广东润楠(*Machilus kwangtungensis*)在干季的研究发现,这 4 个树种的树干液流与空气水汽压亏缺之间无明显的时滞。辽东栎和刺槐树干液流的时滞效应特征与其他树种大致相同,但辽东栎液流通量密度峰值提前于光合有效辐射峰值的情形也很普遍<sup>[16]</sup>,刺槐液流峰值则介于光合有效辐射和空气水汽压亏缺之间<sup>[19]</sup>。本研究中,空气水汽压亏缺与辽东栎树干液流的时滞为 ( $118.2\pm 0.5$ ) min,而与刺槐时滞为 ( $39.5\pm 0.6$ ) min。这表明辽东栎蒸腾作用的气孔调节反应迅速,液流

日变化峰值出现早,刺槐的气孔调节较为迟缓。

### 3.2 树干液流时滞效应的影响因素

研究显示,多种因素可能影响树干液流与蒸腾驱动因子之间时滞效应的特征和长短。关于影响时滞效应的因素可能包括树种、树干储水、气孔导度、生物学结构因素以及环境因子等,但不同研究的结果有所不同。本研究表明,树种间时滞的差异明显,即树种是影响时滞效应特征的重要因素之一。Gonzalez-Benecke 等<sup>[24]</sup>对长叶松(*Pinus palustris*)和湿地松(*Pinus elliottii*)的研究表明,树干储水对时滞的影响有限。而王华等<sup>[11]</sup>把树干液流时滞差异的原因归结为夜间水分补充量、边材面积和胸径的不同,由于大树储水量较小树大,所以时滞会随树木的增大而增加。目前,关于土壤水分对时滞的影响研究较少。对马占相思(*Acacia mangium*)的研究表明,无论是干季还是湿季,树干液流普遍滞后于光合有效辐射 60~140 min,提前于水汽压亏缺 50~80 min,并未受到土壤水分差异的影响<sup>[13]</sup>。本研究结果与上述报道不同,树种和土壤含水量的差异对时滞的影响都达到显著水平;径级的影响相对较小,但是在土壤含水量较低时段刺槐的时滞表现出明显的径级间差异。由此可以推测,根系及树干对水分的吸收和传输效率会对液流与蒸腾驱动因子的时滞产生直接影响,较好的土壤水分状况因有利于水分吸收和传输从而导致液流日变化峰值提早出现。在土壤水分较低情况下,小径级树木因其整体耗水量小,液流日变化峰值会提早于大径级个体,相对增大了时滞长度。由于直径大小与树冠大小及蒸腾耗水量存在必然关系,个体大小对于其应对土壤水分变化也具有一定影响,不同树种及不同土壤水分状况下径级对时滞的影响机制仍需要进一步研究。

### 3.3 树干液流时滞效应与蒸腾特征的关联性

本研究显示,树种是影响时滞效应的首要因素,其次是土壤水分状况。通过对时滞的比较分析发现,树干液流与空气水汽压亏缺之间的时滞,可能源于植物气孔导度及其对环境驱动因子的响应,以及对液流日变化进程的调节<sup>[16]</sup>。叶部蒸腾作用及强度不可能与蒸腾驱动因子呈现完全的正相关关系,大多数温带树种在中午之前即实施气孔调节。在较为干燥的夏季,多数植物会通过迅速关闭气孔来维持水势<sup>[25]</sup>,但是空气水汽压亏缺在一定时间之后才能到达最高点,通常都在午后。辽东栎和刺槐的时滞差异应该与树种间不同的蒸腾策略有关,说明乡土树种辽东栎比外来树种刺槐更早实施气孔调节功能<sup>[16]</sup>。

Fernández 等<sup>[26]</sup>在南美洲对天然林和人工林的研究也有相似结果,发现本地树种的液流日变化峰值比外来树种早很多,本地树种在较低的空气水汽压亏缺值下表现出液流速率的饱和响应。在欧洲对本地树种和外来树种的比较研究也得到类似的结果<sup>[27]</sup>。

本研究揭示了本地树种辽东栎和外来树种刺槐受土壤水分变化影响的差异,说明不同树种应对土壤水分变化的策略不同。这与 Du 等<sup>[16]</sup>对于辽东栎、刺槐对环境因子响应策略的研究结论一致,在树干液流时滞效应方面外来物种刺槐也表现出对土壤水分的较高敏感性。Granier 等<sup>[28]</sup>研究指出,土壤水分状况能决定树木蒸腾的总体水平,但是土壤水分状况对树干液流的影响通常需要较长时间尺度。何秋月等<sup>[19]</sup>通过人工截留降雨试验研究发现,截留降雨导致土壤供水不足不仅使刺槐的蒸腾耗水量下降,也导致其不能迅速响应空气水汽压亏缺的变化。本研究从液流时滞的角度说明 2 个树种存在蒸腾特征的差异,液流时滞的差异在一定程度上反映了 2 个树种叶部气孔蒸腾对环境因子的响应特征。

### 参考文献

- [1] Zhang J-G (张建国), Kume T, Otsuki K, et al. Sap flow dynamics of dominant trees of *Quercus liaotungensis* forest in the semiarid Loess Plateau region. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2011, 47(4): 63-69 (in Chinese)
- [2] Zhao P (赵平), Rao X-Q (饶兴权), Ma L (马玲), et al. Responses of canopy stomatal conductance of *Acacia mangium* forest to environmental driving factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, 17(7): 1149-1156 (in Chinese)
- [3] Sun D (孙迪), Guan D-X (关德新), Yuan F-H (袁凤辉), et al. Time lag effect between poplar's sap flow velocity and microclimate factors in agroforestry system in west Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, 21(11): 2742-2748 (in Chinese)
- [4] Schulze ED, Cermák J, Matyssek R, et al. Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of *Larix* and *Picea* trees: A comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements. *Oecologia*, 1985, 66: 475-483
- [5] Loustau D, Berbigier P, Roumagnac P, et al. Transpiration of a 64-year old maritime pine stand in Portugal. *Oecologia*, 1996, 107: 33-42
- [6] Phillips N, Oren R, Zimmermann R, et al. Temporal patterns of water flux in trees and lianas in a Panamanian moist forest. *Trees*, 1999, 14: 116-123
- [7] Dang H-Z (党宏忠), Yang W-B (杨文斌), Li W (李卫), et al. Radial pattern and time lag of sap flow in *Populus alba* var. *pyramidalis*. *Acta Ecologica Sinica* (生

- 态学报), 2015, **35**(15): 5110–5120 (in Chinese)
- [8] Wang H-M (王慧梅), Sun W (孙伟), Zu Y-G (朱元刚), et al. Complexity and its integrative effects of the time lags of environment factors affecting *Larix gmelinii* stem sap flow. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(12): 3109–3116 (in Chinese)
- [9] Wang YL, Liu GB, Kume T, et al. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China. *Journal of Forest Research*, 2010, **15**: 241–251
- [10] Zhang JG, Guan JH, Shi WY, et al. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China. *Ecohydrology*, 2015, **8**: 137–147
- [11] Wang H (王华), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Zheng H (郑华), et al. Time lag characteristics of stem sap flow of common tree species during their growth season in Beijing downtown. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(9): 2111–2117 (in Chinese)
- [12] Mei T-T (梅婷婷), Zhao P (赵平), Ni G-Y (倪广艳), et al. Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(22): 7018–7026 (in Chinese)
- [13] Wang H (王华), Zhao P (赵平), Cai X-A (蔡锡安), et al. Time lag effect between stem sap flow and photosynthetically active radiation, vapor pressure deficit of *Acacia mangium*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(2): 225–230 (in Chinese)
- [14] Du S (杜盛), Liu G-B (刘国彬). Ecological Function of Vegetation Restoration in Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese)
- [15] Lyu J-L (吕金林), He Q-Y (何秋月), Yan M-J (闫美杰), et al. Sap flow characteristics of *Quercus liaotungensis* in response to sapwood area and soil moisture in the loess hilly region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2018, **29**(3): 725–731 (in Chinese)
- [16] Du S, Wang YL, Kume T, et al. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semi-arid Loess Plateau region of China. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2011, **151**: 1–10
- [17] Zhang JG, He QY, Shi WY, et al. Radial variations in xylem sap flow and their effect on whole-tree water use estimates. *Hydrological Processes*, 2015, **29**: 4993–5002
- [18] Yan MJ, Zhang JG, He QY, et al. Sapflow-based stand transpiration in a semiarid natural oak forest on China's Loess Plateau. *Forests*, 2016, **7**: 227–240
- [19] He Q-Y (何秋月), Yan M-J (闫美杰), Zhang J-G (张建国), et al. Sap flow of *Robinia pseudoacacia* in response to rainfall exclusion treatment and environment factors in a sub-humid area in Loess Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2018, **42**(4): 466–474 (in Chinese)
- [20] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, **3**: 309–320
- [21] James SA, Clearwater MJ, Meinzer FC, et al. Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in trees with deep sapwood. *Tree Physiology*, 2002, **22**: 277–283
- [22] Ewers BE, Oren R. Analyses of assumptions and errors in the calculation of stomatal conductance from sap flux measurements. *Tree Physiology*, 2000, **20**: 579–589
- [23] Huang D-W (黄德卫), Zhang D-Q (张德强), Zhou G-Y (周国逸), et al. Characteristics of dominant tree species stem sap flow and their relationships with environmental factors in a mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan, Guangdong Province of South China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(5): 1159–1166 (in Chinese)
- [24] Gonzalez-Benecke CA, Timothy AM, Cropper WP Jr. Whole-tree water relations of co-occurring mature *Pinus palustris* and *Pinus elliottii* var. *elliottii*. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, **41**: 509–523
- [25] Luo D-D (罗丹丹), Wang C-K (王传宽), Jin Y (金鹰). Plant water-regulation strategies: Isohydic versus anisohydic behavior. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2017, **41**(9): 1020–1032 (in Chinese)
- [26] Fernández ME, Gyenge J, Schlichter T. Water flux and canopy conductance of natural versus planted forests in Patagonia, South America. *Trees*, 2009, **23**: 415–427
- [27] Gartner K, Leitgeb E, Nadezhdina N, et al. Sap flow of birch and Norway spruce during the European heat and drought in summer 2003. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**: 590–599
- [28] Granier A, Reichstein M, Bréda N, et al. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, **143**: 123–145

作者简介 杨洁,女,1995年生,硕士研究生.主要从事森林蒸腾耗水研究. E-mail: jieyang0216@163.com

责任编辑 孙菊

杨洁,吕金林,何秋月,等.黄土丘陵区辽东栎和刺槐树干液流时滞效应与蒸腾特征的关联性.应用生态学报,2019,30(8): 2607–2613

Yang J, Lyu J-L, He Q-Y, et al. Time lag of stem sap flow and its relationships with transpiration characteristics in *Quercus liaotungensis* and *Robinia pseudoacacia* in the loess hilly region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(8): 2607–2613 (in Chinese)