

# 无患子液流时滞特性及对遮蔽花序枝叶修剪的响应

蔡婉婷<sup>1</sup>, 贾黎明<sup>1\*</sup>, 王冕之<sup>1</sup>, 郑玉琳<sup>1</sup>, 李露<sup>1</sup>, 罗水晶<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学林学院, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 国家能源非粮生物质原料研发中心, 北京 100083; 2. 福建源华林业生物科技有限公司, 福建 建宁 354500)

**摘要:**【目的】探究无患子(*Sapindus saponaria*)生殖物候期树干液流的时滞特性以及遮蔽花序枝叶修剪对时滞的影响, 为无患子的科学培育提供指导。【方法】在福建省建宁县无患子国家林木种质资源库, 以5年生“媛华”品种示范林为试验对象, 在其生殖生长季(5—11月)运用热扩散液流探针技术对修剪和不修剪(对照)处理无患子的树干液流速率(Fd)进行实时监测, 并同步监测光合有效辐射(PAR)、空气温度(Ta)、空气相对湿度(RHa)等环境因子, 运用错位相关法分析液流速率对主导环境因子间的时滞响应。【结果】无论是否进行修剪处理, PAR和饱和水汽压亏缺(VPD)均是影响该地区无患子树干液流的主导环境因子。典型晴天时, 无患子树干液流与主导环境因子均呈现“迟滞回环”的关系, 其中与PAR的响应过程呈逆时针方向, 与VPD的响应过程呈顺时针方向。对照组和修剪组树干液流在花芽膨大期、开花期、初果期、果实膨大期、果实转色期、果实成熟期等6个生殖物候期分别比PAR滞后10、10、0、10、20、50 min和0、20、10、10、20、50 min; 比VPD提前160、120、90、90、130、100 min和190、110、70、90、130、100 min。【结论】不同生殖物候期无患子树干液流与主导环境因子间的时滞存在差异, 修剪减小了花芽膨大期Fd-PAR的时滞, 增大了开花期和初果期Fd-PAR的时滞, 但修剪在各生殖期对Fd-VPD的时滞影响相反。该研究为准确评价环境因子对林木耗水产生的影响提供了科学依据, 也有助于构建更准确模拟白天蒸腾过程的模型。

**关键词:** 无患子; 树干液流; 时滞; 修剪; 生殖物候期; 环境因子

中图分类号: S718; Q89

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2024)06-0005-08



## Time lag of sap flow characteristics and their response to inflorescence shading and pruning of leaves and branch for *Sapindus saponaria*

CAI Wanting<sup>1</sup>, JIA Liming<sup>1\*</sup>, WANG Mianzhi<sup>1</sup>, ZHENG Yulin<sup>1</sup>, LI Lu<sup>1</sup>, LUO Shuijing<sup>2</sup>

(1. National Energy R & D Center for Non-Food Biomass, Key Laboratory for Silviculture and Conservation of the Ministry of Education, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;  
2. Fujian Yuanhua Forestry Biotechnology Co., Ltd., Jianning 354500, China)

**Abstract:** 【Objective】This study aims to investigate the time lag characteristics of sap flow during reproductive phenological periods in *Sapindus saponaria* and the effect of shading inflorescence branching and leaf pruning on the time lag of sap flow. 【Method】In the experimental area of the *Sapindus saponaria* National Forest Germplasm Repository in Jianning County, Fujian Province, five-year-old *S. saponaria* ‘Yuanhua’ asexual lines were employed as experimental materials. Sap flow was measured using a thermal diffusion probe, and environmental factors including photosynthetically active radiation (PAR), air temperature (Ta), and relative air humidity (RHa) were simultaneously measured during the reproductive growing season. Time lags between sap flow velocity and the dominant environmental factors were analyzed using the mismatch correlation method. 【Result】PAR and VPD were the dominant environmental factors affecting sap flow, independent of pruning treatments. On typical sunny days, the relationship between sap flow and these environmental factors showed a “hysteresis loop”, with PAR responded in a counterclockwise direction and VPD

收稿日期 Received: 2024-03-18

修回日期 Accepted: 2024-09-25

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2019FY100803)。

第一作者: 蔡婉婷(cwt200101@163.com)。\* 通信作者: 贾黎明(jlm@bjfu.edu.cn), 教授。

引文格式: 蔡婉婷, 贾黎明, 王冕之, 等. 无患子液流时滞特性及对遮蔽花序枝叶修剪的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(6): 5-12. CAI W T, JIA L M, WANG M Z, et al. Time lag of sap flow characteristics and their response to inflorescence shading and pruning of leaves and branch for *Sapindus saponaria*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(6): 5-12. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202403022.

responded in a clockwise direction. Across six reproductive phenological periods (bud swelling, flowering, early ovary growing, fruit development, fruit colour change, fruit ripening), the control (CK) and pruning group sap flow lagged PAR by 10, 10, 0, 10, 20, 50 min and 0, 20, 10, 10, 20, 50 min, respectively; and advanced VPD by 160, 120, 90, 90, 130, 100 min and 190, 110, 70, 90, 130, 100 min at six key reproductive phenological periods. 【Conclusion】 The time lag between sap flow and dominant environmental factors varied across different reproductive phenological periods. Pruning impacted these time lags differently: it reduced the time lag of Fd-PAR during bud swelling and increased it during the flowering and early ovary growing periods, while it had the opposite effect on Fd-VPD. This study provides a scientific foundation for accurately evaluating the influence of environmental factors on the water consumption of forest trees and contributes to the development of more precise models to simulate daytime transpiration processes.

**Keywords:** *Sapindus saponaria*; sap flow; time lag; pruning; reproductive phenological period; environmental factor

树干液流<sup>[1]</sup>的变化不仅受到树木生物学结构、土壤水分状况的影响,还受到周围气象因子的制约。不同环境因子对树干液流的影响程度不同,主导环境因子也因地区、时间和树种不同而存在差异<sup>[2-4]</sup>。一般而言,太阳辐射、饱和水汽压差、空气温度和空气湿度被认为是驱动树木蒸腾的主要气象因子,其中,树干液流与太阳辐射、饱和水汽压差和空气温度呈正相关,与空气湿度呈负相关<sup>[5-8]</sup>。受树木体内调节机制的影响<sup>[9]</sup>,树干液流与环境因子之间存在时滞效应<sup>[10]</sup>,该现象在不同气候区及树种间时滞长短存在差异。我国从南到北树干液流与环境因子的时滞依次增强,是气候等环境因子和树种特性综合作用的结果<sup>[9]</sup>。但目前多数时滞研究都集中在不同月份<sup>[11]</sup>或季节尺度上,针对植物不同生长阶段的研究较少,了解植物在不同生殖物候期树干液流的时滞特性,有利于准确预测和模拟植物的水分动态变化,可为其水分管理提供科学理论参考<sup>[12]</sup>。

无患子(*Sapindus saponaria*)属落叶乔木,种植范围广,栽培历史悠久<sup>[13]</sup>,在日用化工、生物质能源、生物医药、生态修复、绿化美化等多个领域具有广泛的应用前景<sup>[14-17]</sup>,但无患子为喜光树种,在生长过程中下层花序(果序)容易受到枝叶的遮挡,导致光照不足,降低果实的产量和品质。合理的修剪措施可以改善无患子树冠光环境,增加下层花(果)序光照度,提高果实的产量和品质<sup>[18-19]</sup>;同时,修剪能显著降低林木蒸腾耗水量和深层土壤水分消耗<sup>[20-21]</sup>,但目前关于无患子树干液流与主导环境因子之间是否存在时滞效应及其在不同生殖物候期是否具有差异的研究尚无报道,遮蔽花序枝叶修剪措施对时滞效应的影响仍需进一步分析。为此,以5年生无患子品种‘媛华’植株为试验材料,于2021年4月26日—11月9日对无患子树干液流数据及其环境因子数据进行监测,分析各生殖物候期影响无患子树干液流的主导环境因子,不同

生殖物候期无患子树干液流的时滞效应,以及修剪对无患子树干液流时滞特性的影响,从而为无患子的科学培育提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况及试验材料

试验地位于福建省建宁县(116°35′~117°04′E, 26°30′~27°06′N),属中亚热带海洋性季风气候,又兼有大陆性山地气候特点,年均气温17.64℃,年均降水量1950mm,多集中于5—6月。土壤为山地黄红壤,pH约5.02,土壤肥力中等偏下<sup>[15]</sup>。以5年生无患子品种‘媛华’示范林为试验对象,为嫁接2年生实生苗砧木而成,株行距4m×4m,栽植密度635株/hm<sup>2</sup>。试验地全年除草、杀虫各5次(5—9月各除草1次;4、6、9月各喷施杀虫剂1次,7月喷施杀虫剂两次);全年施肥3次(4、7、11月各1次)。随机选取8株生长良好、无病虫害的样树(表1),其中,3株样树在长出花序后(2021年4月26日)进行修剪,即去掉遮蔽花序阳光的枝组和复叶,修剪量约占总枝叶量的1/5,保证花序无光线遮挡,另外5株树作为对照。

表1 无患子样树处理

Table 1 The sample trees of *Sapindus saponaria*

| 编号<br>No.      | 树高/m<br>tree<br>heigh | 探针处<br>树径/cm<br>diameter<br>at probe | 冠幅/m<br>crown<br>width | 处理<br>treatment |
|----------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------|
| T <sub>1</sub> | 2.55                  | 10.03                                | 2.65×2.10              | 修剪 pruning      |
| T <sub>2</sub> | 2.80                  | 8.00                                 | 2.30×2.30              | 修剪 pruning      |
| T <sub>3</sub> | 3.36                  | 10.15                                | 2.60×1.95              | 修剪 pruning      |
| T <sub>4</sub> | 3.10                  | 8.30                                 | 2.20×2.30              | 对照 CK           |
| T <sub>5</sub> | 2.60                  | 6.89                                 | 1.25×1.15              | 对照 CK           |
| T <sub>6</sub> | 2.75                  | 8.50                                 | 1.70×1.62              | 对照 CK           |
| T <sub>7</sub> | 2.55                  | 7.61                                 | 2.80×2.90              | 对照 CK           |
| T <sub>8</sub> | 3.22                  | 6.90                                 | 2.20×2.35              | 对照 CK           |

## 1.2 指标测定

### 1.2.1 物候观测

将无患子生殖生长的关键物候期划分为6个阶段,即:花芽膨大期(5月19日—5月28日)、开花期(5月29日—6月12日)、初果期(6月13日—7月10日)、果实膨大期(7月11日—9月16日)、果实转色期(9月17日—10月25日)和果实成熟期(10月26日—11月9日)<sup>[22-23]</sup>。对8株样树生殖物候进行连续观察,每次随机观测20个1年生枝(东、南、西、北各5枝),当有15个1年生枝出现某一物候特征时则视为达到该物候期<sup>[22]</sup>。

### 1.2.2 树干液流监测与计算

采用热扩散液流探针(TDP-10,北京时域通科技有限公司)对8株样树进行树干液流的长期连续监测,所有探针均安装于第1分枝之下,距地面约30 cm,且方位一致。采用G12数据采集器(北京时域通科技有限公司)每10 s间隔采集1次,每10 min计算1次平均值并保存。由一天内上下探针的最大温差和某时刻温差并参见文献[24]换算得液流速率(Fd,式中表示为 $F_d$ )。为消除样树大小对树干液流速率产生的影响,利用探针处树径大小对液流速率进行校正<sup>[25-26]</sup>。校正后液流速率( $F'_d$ )计算公式如下:

$$F'_d = F_d \overline{D_p} / D_p$$

式中: $\overline{D_p}$ 为所有样树探针处平均树径,cm; $D_p$ 为样树探针处树径,cm。

### 1.2.3 环境因子监测

通过安装在空地距试验地表20 m的自动气象站(北京时域通科技有限公司),连续监测光合有效辐射[PAR,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、风速(AWS, m/s)、空气温度( $T_a$ ,式中表示为 $T_a$ , $^{\circ}\text{C}$ )、空气相对湿度(RHa,式中表示为 $R_{Ha}$ ,%)、土壤温度( $T_s$ , $^{\circ}\text{C}$ )、土壤相对湿度(RHs,%)等,环境因子与液流监测同步。其中,土壤温度和土壤湿度为地面以下20、40、60和80 cm处的平均值。参见文献[27]的方法计算饱和水汽压亏缺(VPD,式中表示为 $V_{PD}$ , kPa):

$$V_{PD} = 0.611 \times e^{\left(\frac{17.502 T_a}{T_a + 240.97}\right)} \times (1 - R_{Ha}) \quad (1)$$

## 1.3 数据处理

选取2021年5—11月期间典型晴天的液流数据监测值,使用Baseliner 4.21软件将探针所测得的电压差值计算树干液流速率,使用SPSS 23.0中的逐步线性回归法分析液流速率与环境因子的相

关性,显著性水平设置为0.05;使用Origin 2023提供的Peak形式函数中的Guass方程拟合各生殖物候期典型晴天液流速率与主导环境因子的日变化过程;按时间观测顺序,建立无患子树干液流速率与对应的光合有效辐射、饱和水汽压亏缺之间的数据序列,将液流速率逐次按10 min进行提前或滞后的错位移动,分析错位后数据列之间的相关性,当相关系数最大时,所对应的时间即为液流与环境因子的时滞时间(正值表示该环境因子滞后于液流速率,负值则提前)<sup>[28]</sup>。使用Origin 2023作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 修剪处理无患子树干液流与环境因子的回归模型及响应分析

对修剪及未修剪(对照)的无患子液流速率(Fd)与环境因子的相关关系进行分析(逐步回归法),以光合有效辐射(PAR,  $X_1$ )、饱和水汽压亏缺(VPD,  $X_2$ )、土壤温度( $T_s$ ,  $X_3$ )、土壤相对湿度(RHs,  $X_4$ )、风速(AWS,  $X_5$ )为自变量,以无患子液流速率(Fd,  $Y$ )为因变量,进行多元线性逐步回归[VPD是空气温度( $T_a$ )和空气相对湿度(RHa)的函数,代表二者的综合影响,所以 $T_a$ 和RHa不参与模型建立]。环境因子进入顺序表示对树干液流速率的影响大小,后续进入的因子解释液流速率变化较小。不同生殖物候期, $X_1$ 、 $X_2$ 均是前2位进入模型的因子,且无论是否进行修剪处理,环境因子进入模型的顺序均相同。所以,在日尺度上,PAR和VPD对无患子树干液流速率的影响最大,修剪没有改变影响液流速率的主导环境因子。各生殖物候期的回归方程见表2,相关性均达到极显著水平( $P < 0.01$ ),能够较好地解释日尺度下无患子树干液流变化与环境因子的关系。

研究分析发现,典型晴天下Fd与主导环境因子PAR、VPD的关系均呈现“迟滞回环”现象(图1),无论是否进行修剪处理,Fd对主导环境因子的响应过程均一致。Fd随着环境因子的增强而逐渐增大,当达到饱和时,将不再继续增大,并在午后随着环境因子的减弱而逐渐减小,但上升和下降路径不一致,说明其对主导环境因子的响应存在时滞。Fd对PAR的响应呈逆时针方向,表明相同PAR下,上午的Fd低于下午(图1a、1b);而对VPD的响应呈顺时针方向,表明相同VPD下,上午的Fd高于下午的(图1c、1d),另外,Fd与VPD形成的环状图面积较大,说明两者时滞效应更强。

表2 在日时间尺度下各生殖物候期无患子液流速率与环境因子的逐步回归结果

Table 2 Stepwise regression between sap flow velocity with environmental factors at daily scale for each reproductive phenology period

| 生殖物候期<br>reproductive<br>phenological periods | 处理<br>treatment | 因子<br>factor              | $R^2$ | 回归方程<br>regression equation                                 | $P$   |
|-----------------------------------------------|-----------------|---------------------------|-------|-------------------------------------------------------------|-------|
| 花芽膨大期<br>bud swelling period                  | 修剪              | $X_1, X_2, X_3, X_4$      | 0.874 | $Y=0.734+0.003 X_1+0.928 X_2-0.212 X_3+0.105 X_4$           | <0.01 |
|                                               | 对照              | $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ | 0.837 | $Y=13.54+0.004 X_1+0.852 X_2-0.484 X_3+1.070 X_4-0.080 X_5$ | <0.01 |
| 开花期<br>flowering period                       | 修剪              | $X_1, X_2, X_3, X_4$      | 0.834 | $Y=-22.956+0.004 X_1+0.548 X_2+0.527 X_3+0.309 X_4$         | <0.01 |
|                                               | 对照              | $X_1, X_2, X_3, X_4$      | 0.840 | $Y=-20.389+0.004 X_1+0.423 X_2+0.495 X_3+0.259 X_4$         | <0.01 |
| 初果期<br>early ovary growing period             | 修剪              | $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ | 0.865 | $Y=6.183+0.003 X_1+0.781 X_2-0.165 X_3-0.059 X_4+0.871 X_5$ | <0.01 |
|                                               | 对照              | $X_1, X_2, X_3, X_4$      | 0.879 | $Y=6.938+0.004 X_1+0.655 X_2-0.268 X_3+1.274 X_4$           | <0.01 |
| 果实膨大期<br>fruit development period             | 修剪              | $X_1, X_2, X_3, X_5$      | 0.869 | $Y=4.012+0.002 X_1+0.978 X_2-0.153 X_3+1.339 X_5$           | <0.01 |
|                                               | 对照              | $X_1, X_2, X_3, X_5, X_4$ | 0.906 | $Y=9.655+0.003 X_1+0.777 X_2-0.277 X_3+0.941 X_5-0.075 X_4$ | <0.01 |
| 果实转色期<br>fruit colour change period           | 修剪              | $X_1, X_2, X_3, X_5$      | 0.789 | $Y=1.416+0.002 X_1+0.574 X_2-0.059 X_3-0.402 X_5$           | <0.01 |
|                                               | 对照              | $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ | 0.906 | $Y=9.655+0.003 X_1+0.777 X_2-0.277 X_3-0.075 X_4+0.941 X_5$ | <0.01 |
| 果实成熟期<br>fruit ripening period                | 修剪              | $X_1, X_2, X_3, X_4$      | 0.395 | $Y=-1.887+0.001 X_1+0.609 X_2+0.088 X_3+0.010 X_4$          | <0.01 |
|                                               | 对照              | $X_1, X_2, X_3$           | 0.614 | $Y=-1.158+0.001 X_1+1.145 X_2+0.056 X_3$                    | <0.01 |

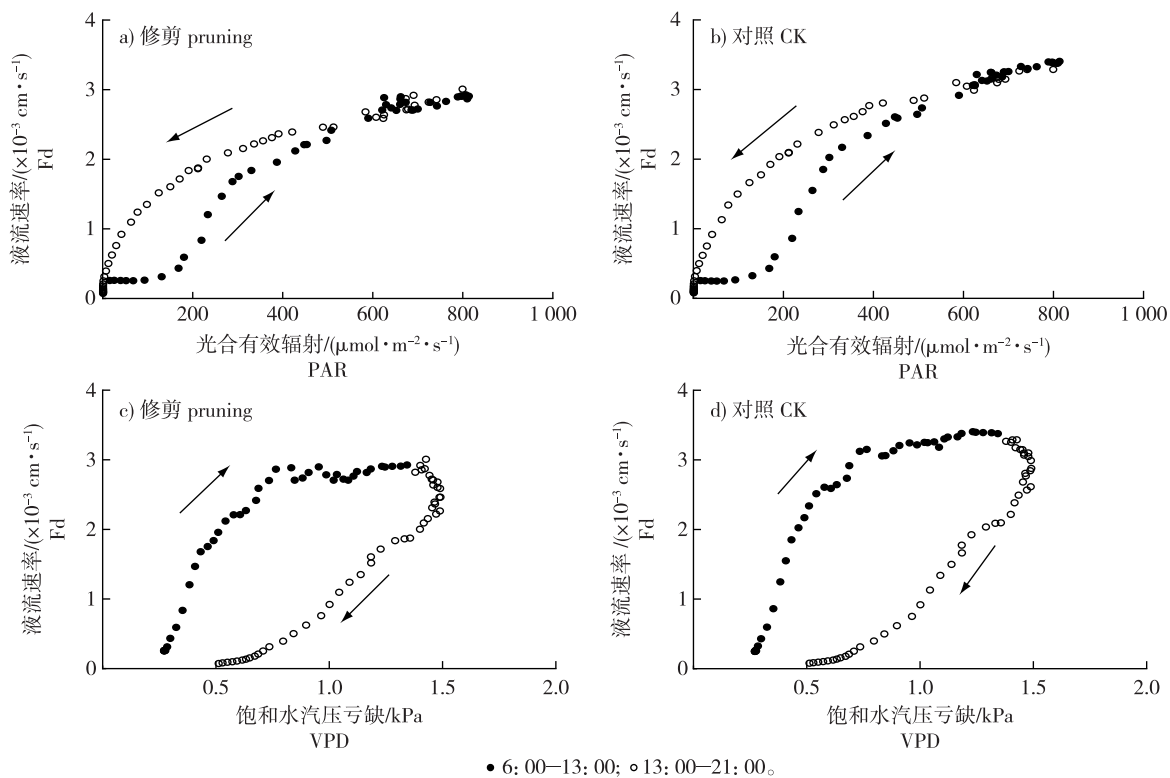


图1 典型晴天树干液流对光合有效辐射和饱和水汽压亏缺的响应过程

Fig. 1 Hysteresis loops between sap flow (Fd) and dominant environmental factors (PAR and VPD) during typical sunny days

2.2 修剪处理无患子树干液流与主导环境因子的日变化格局

为直观表达液流速率与主导环境因子间的时滞现象,各选取花芽膨大期、开花期、初果期、果实

膨大期、果实转色期和果实成熟期的3个典型晴天,采用Guass方程拟合PAR、VPD与液流速率的日变化过程(图2)。

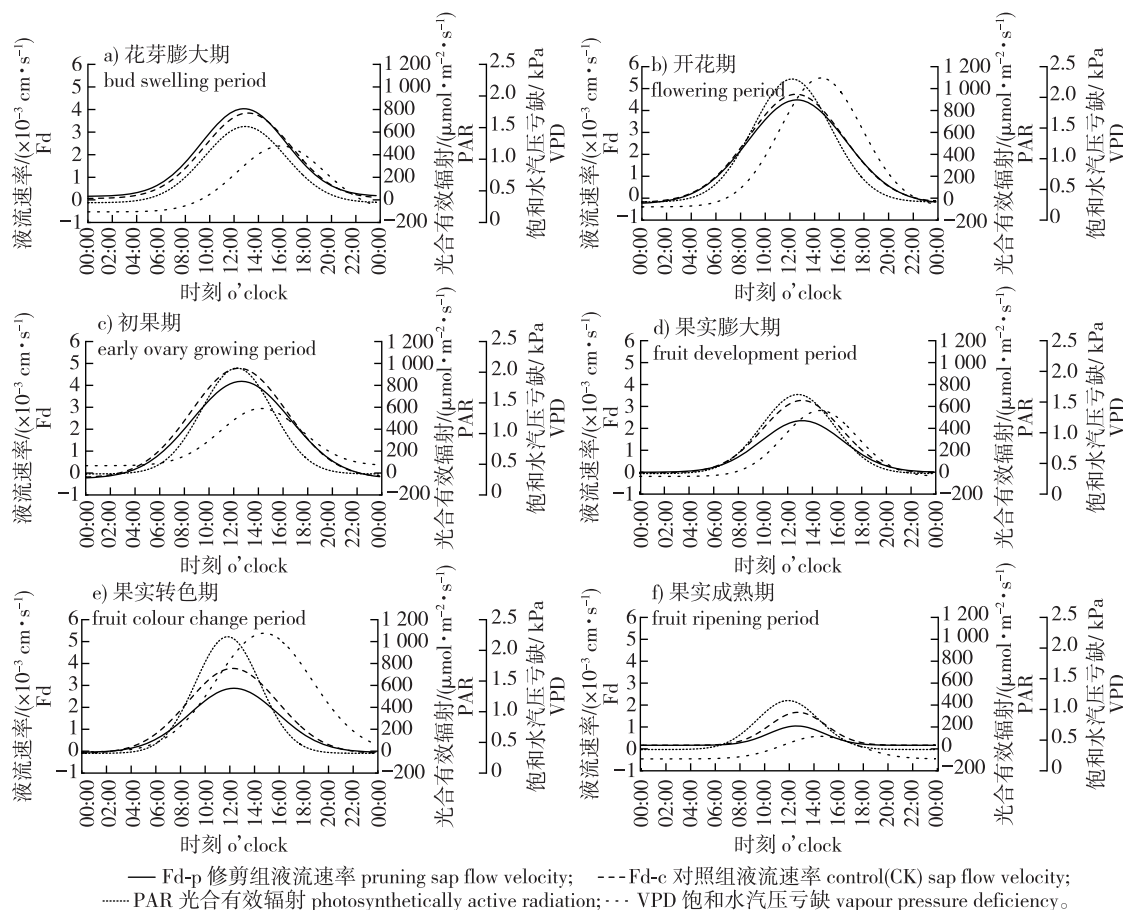


图2 典型晴天液流速率与主导气象因子间峰值到达时刻的相对关系

Fig. 2 Relative relationships of peak time lag between sap flow velocity and dominant environmental factors (PAR and VPD) during typical sunny days

由图2可知,各生殖物候期 Fd 与 PAR、VPD 的日均变化均以单峰曲线形式呈现,白天较高,夜间急剧降低并趋于0,但是各曲线峰值出现时间并不一致。Fd 一般在 12:30—13:00 达到峰值,总体上略滞后于 PAR 的峰值时刻(11:40—12:40),而提前于 VPD 的峰值时刻(14:20—16:00)。

### 2.3 修剪与未修剪无患子树干液流与主导环境因子的时滞效应

依据时间观测顺序将 Fd 与 PAR、VPD 数据列逐次按 10 min 进行错位移动,分析错位后的数据相关关系,相关值最大时对应的时间即为液流对主导环境因子的实际时滞,结果见图3(正值为提前,负值为落后)。总体而言,Fd 滞后于 PAR,提前于 VPD,且 Fd 与 VPD 之间的时滞大于 PAR。花芽膨大期,修剪组 Fd 与 PAR 之间不存在时滞(0 min),对照组 Fd 与 PAR 之间的时滞为 10 min,修剪组和对照组 Fd 与 VPD 之间的时滞分别为 190、160 min。开花期,修剪组和对照组 Fd 与 PAR 之间的时滞分别为 20、10 min,与 VPD 之间的时滞分别为 110、120 min。初果期,修剪组和对照组 Fd 与

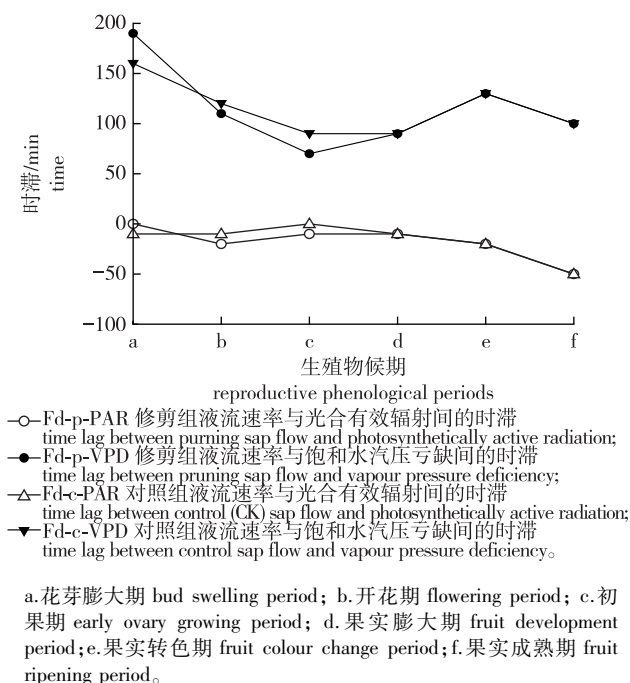


图3 树干液流与光合有效辐射、饱和水汽压亏缺之间的时滞

Fig. 3 Time lag of sap flow with photosynthetically active radiation and vapour pressure deficiency

PAR 之间的时滞分别为 10、0 min, 与 VPD 之间的时滞分别为 70、90 min。果实膨大期, 修剪组 and 对照组 Fd 与 PAR 之间的时滞均为 10 min, 与 VPD 之间的时滞均为 90 min。果实转色期, 修剪组 and 对照组 Fd 与 PAR 之间的时滞均为 20 min, 与 VPD 之间的时滞均为 130 min。果实成熟期, 修剪组 and 对照组 Fd 与 PAR 之间的时滞均为 50 min, 与 VPD 之间的时滞均为 100 min。花芽膨大期, 修剪降低了液流与 PAR 之间的时滞, 但却增大了液流与 VPD 之间的时滞, 而开花期和初果期这种趋势却相反, 果实发育后期, 修剪对液流与环境因子间的时滞没有影响。

### 3 讨论

#### 3.1 驱动树干液流变化的主导环境因子

树干液流(Fd)是一种复杂的生理过程, 受多种因素共同控制, 不仅与树木遗传特性、个体差异(树龄、树形等)有关, 还易受太阳辐射、空气温度、空气相对湿度等外部气候环境因子的影响<sup>[29-30]</sup>。本研究得出, 光合有效辐射和饱和水汽压亏缺是影响无患子液流速率的主导因子。太阳辐射的强弱决定了气孔的开张程度, 从而影响蒸腾作用, 是影响瞬时液流最主要因子, 空气温度、空气相对湿度随着辐射强度的变化而变化, 而水汽压亏缺是温度和空气相对湿度的函数, 也随着辐射增高而增加, 对树干液流产生影响<sup>[31]</sup>。

#### 3.2 树干液流的时滞效应

由于水分传输路径、组织阻力<sup>[32]</sup>等因素的综合作用, 树干液流速率往往会滞后于树冠的实际蒸腾速率。本研究发现无患子树干 Fd 与 PAR、VPD 的关系曲线呈现“迟滞回环”现象, 在黄果树(*Citrus sinensis*)<sup>[33]</sup>、青杨(*Populus cathayana*)<sup>[34-35]</sup>和侧柏(*Platycladus orientalis*)<sup>[12]</sup>的研究中也发现了相似的规律。PAR 在中午达到峰值, 而 VPD 在下午达到峰值, 气孔导度在低光水平下达到光饱和, 所以在相同 PAR 下, 上午的 VPD 小于下午, 导致下午的 Fd 较大, 与 PAR 之间形成逆时针循环<sup>[36]</sup>。相同 VPD 下, 上午的液流速率比下午大, 是因为经过中午的持续高温, 气孔对 VPD 的敏感性增加, 同时较低的叶片水势也导致气孔导度降低, 造成液流速率与 VPD 之间的响应呈顺时针方向<sup>[37]</sup>。与大多数树干液流速率的变化曲线一致<sup>[36-40]</sup>, 无患子液流速率呈单峰-昼高夜低的变化格局, 且液流峰值滞后于 PAR 峰值, 提前于 VPD 峰值, 这种差异反映了时滞效应是植物应对外部环

境变化, 与水有关的一种生态生理反应。树木蒸腾驱动因子与液流速率之间的时滞现象存在季节尺度差异<sup>[8]</sup>, 花芽膨大期树冠发育初步完成, 且降水量较大, 树木蒸腾受饱和水汽压差的驱动不紧密<sup>[41]</sup>, 从而导致 Fd 与 VPD 间的时滞更长<sup>[42]</sup>。果实成熟期叶片因为老化而逐渐失去功能, 无法进行有效的光合作用, 减少了植物整体的光合能力<sup>[42]</sup>, 导致树体在应对光照变化时液流调整的速度慢, 增大了 Fd 与 PAR 间的时滞。在相同生殖物候期, 无患子 Fd 与 PAR 之间的时滞较 VPD 短, 可能是 PAR 为树木蒸腾提供能量, 对树木蒸腾起更直接的作用<sup>[12]</sup>。

#### 3.3 修剪对时滞效应的影响

研究表明, 一定程度的修剪会抑制树体内液体流动, 降低树干液流速率。修剪改变了树木的生理状态和环境响应能力, 从而影响液流与不同环境因子之间的时滞关系<sup>[43]</sup>。在花芽膨大期, 修剪处理导致了树体结构的改变, 减少了部分遮挡, 使得更多的辐射能够直接到达叶片<sup>[44]</sup>, 从而减小了 Fd 与 PAR 之间的时滞。同时, 修剪也可能改变叶片与周围环境的相互作用, 使得叶片表面温度和湿度条件发生变化<sup>[44]</sup>, 进而增加 Fd 与 VPD 之间的时滞。在开花期和初果期, 由于花和果实的出现, 树体对水分和养分的需求增加, 导致液流与 PAR 之间的时滞增大, 与 VPD 之间的时滞降低。在果实发育后期, 修剪对液流时滞没有影响, 可能是遮蔽花序枝叶修剪的程度较轻, 对树体的整体结构影响较小, 并且随着季节的变化, 树体会依次萌发夏梢和秋梢, 使得春季修剪带来的变化不再明显。

#### 参考文献(reference):

- [1] DALEY M J, PHILLIPS N G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest[J]. *Tree Physiol*, 2006, 26(4): 411-419. DOI: 10.1093/treephys/26.4.411.
- [2] 张瑞婷, 杨金艳, 阮宏华. 树干液流对环境变化响应研究的整合分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(5): 113-120. ZHANG R T, YANG J Y, RUAN H H. Meta-analyses of responses of sap flow to changes in environmental factors[J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, 46(5): 113-120. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202101029.
- [3] 唐子舒, 王根绪, 胡兆永. 贡嘎山不同径级峨眉冷杉树干液流特征及其影响因素[J]. *山地学报*, 2022, 40(2): 220-234. TANG Z S, WANG G X, HU Z Y. Characteristics of stem sap flow and influencing factors of *Abies fabri* in varied diameters on mount Gongga, China[J]. *Mt Res*, 2022, 40(2): 220-234. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000667.
- [4] 王慧梅, 孙伟, 祖元刚, 等. 不同环境因子对兴安落叶松树干液流的时滞效应复杂性及其综合影响[J]. *应用生态学报*, 2011,

- 22(12):3109–3116. WANG H M, SUN W, ZU Y G, et al. Complexity and its integrative effects of the time lags of environment factors affecting *Larix gmelinii* stem sap flow [J]. Chin J Appl Ecol, 2011, 22(12):3109–3116. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2011.0465.
- [5] 赵仲辉, 康文星, 田大伦, 等. 湖南会同杉木液流变化及其与环境因子的关系[J]. 林业科学, 2009, 45(7):127–132. ZHAO Z H, KANG W X, TIAN D L, et al. Sap flow rate and its relationship with environmental factors of Chinese fir plantation in Huitong, Hunan Province [J]. Sci Silvae Sin, 2009, 45(7):127–132. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2009.07.021.
- [6] 李豆豆, 席本野, 王斐, 等. 毛白杨叶片膨压变化规律及其对环境因子的响应[J]. 植物生态学报, 2018, 42(7):741–751. LI D D, XI B Y, WANG F, et al. Patterns of variations in leaf turgor pressure and responses to environmental factors in *Populus tomentosa* [J]. Chin J Plant Ecol, 2018, 42(7):741–751. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0097.
- [7] HERK I G, GOWER S T, BRONSON D R, et al. Effects of climate warming on canopy water dynamics of a boreal black spruce plantation [J]. Can J For Res, 2011, 41(2):217–227. DOI: 10.1139/X10-196.
- [8] URBAN J, RUBTSOV A V, URBAN A V, et al. Canopy transpiration of a *Larix sibirica* and *Pinus sylvestris* forest in Central Siberia [J]. Agric For Meteorol, 2019, 271:64–72. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.02.038.
- [9] 王瑛, 刘美君, 杜盛. 树干液流时滞特征及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(2):507–514. WANG Y, LIU M J, DU S. Research progress in the characteristics and driving factors of time lags in stem sap flow [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2023, 29(2):507–514. DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687X.2021.11024.
- [10] SCHULZE D E, ČERMÁK 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 [J]. Oecologia, 1985, 66(4):475–483. DOI: 10.1007/BF00379337.
- [11] 孙迪, 关德新, 袁凤辉, 等. 辽西农林复合系统中杨树液流速率与气象因子的时滞效应[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11):2742–2748. SUN D, GUAN D X, YUAN F H, et al. Time lag effect between poplar's sap flow velocity and microclimate factors in agroforestry system in west Liaoning Province [J]. Chin J Appl Ecol, 2010, 21(11):2742–2748. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2010.0426.
- [12] 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. HAN L, ZHAN X L, WANG F, et al. Time lag effect between stem sap flow and driving factors of transpiration of *Platycladus orientalis* in east sandy land of Yellow River [J]. Ecol Environ Sci, 2018, 27(8):1417–1423. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.08.005.
- [13] 刘济铭, 孙操稳, 何秋阳, 等. 国内外无患子属种质资源研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(6):12–18. LIU J M, SUN C W, HE Q Y, et al. Research progress in *Sapindus* L. germplasm resources [J]. World For Res, 2017, 30(6):12–18. DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2017.0071.y.
- [14] UPADHYAY A, SINGH D K. Molluscicidal activity of *Sapindus mukorossi* and *Terminalia chebula* against the freshwater snail *Lymnaea acuminata* [J]. Chemosphere, 2011, 83(4):468–474. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.12.066.
- [15] 刘俊涛, 仲静, 刘济铭, 等. 无患子初果期人工林土壤和叶片C、N、P化学计量特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(4):67–75. LIU J T, ZHONG J, LIU J M, et al. Stoichiometric characteristics of soil and leaves in *Sapindus mukorossi* plantation at an early fruiting stage [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(4):67–75. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202104011.
- [16] CHAKRABORTY M, BARUAH D C. Production and characterization of biodiesel obtained from *Sapindus mukorossi* kernel oil [J]. Energy, 2013, 60:159–167. DOI: 10.1016/j.energy.2013.07.065.
- [17] 刘诗琦, 贾黎明, 苏淑钗, 等. 林业生物质能源“林油一体化”产业高效可持续发展路径研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12):96–107. LIU S Q, JIA L M, SU S C, et al. Efficient and sustainable development path of forest-based bioenergy “forestry-oil integration” industry [J]. J Beijing For Univ, 2019, 41(12):96–107.
- [18] 张赞齐, 刘晨, 刘阳, 等. 叶幕微域环境对无患子果实产量和品质的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(5):189–198. ZHANG Y Q, LIU C, LIU Y, et al. Effects of canopy micro-environment on fruit yield and quality characteristics of *Sapindus mukorossi* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(5):189–198. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.202001031.
- [19] 高媛, 贾黎明, 高世轮, 等. 无患子树体合理光环境及高光效调控[J]. 林业科学, 2016, 52(11):29–38. GAO Y, JIA L M, GAO S L, et al. Reasonable canopy light intensity and high light efficiency regulation of *Sapindus mukorossi* [J]. Sci Silvae Sin, 2016, 52(11):29–38. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20161104.
- [20] 叶苗泰, 霍高鹏, 杨博, 等. 修剪对山地苹果蒸腾的影响及模拟[J]. 中国农业科学, 2019, 52(17):3020–3033. YE M T, HUO G P, YANG B, et al. Measurements and modeling of the impacts of different pruning degrees on transpiration of apple orchard in hilly regions [J]. Sci Agric Sin, 2019, 52(17):3020–3033. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.17.010.
- [21] 冯健, 战金伟, 杨圆圆, 等. 施肥对落叶松种子园母树物候特征的影响[J]. 森林工程, 2023, 39(6):55–63. FENG J, ZHAN J W, YANG Y Y, et al. Effects of fertilization on phenological characteristics of mother trees in larch seed orchard [J]. For Eng, 2023, 39(6):55–63.
- [22] ZHAO G C, GAO Y H, GAO S L, et al. The phenological growth stages of *Sapindus mukorossi* according to BBCH scale [J]. Forests, 2019, 10(6):462. DOI: 10.3390/f10060462.
- [23] 高媛, 贾黎明, 苏淑钗, 等. 无患子物候及开花结果特性[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(6):34–40, 123. GAO Y, JIA L M, SU S C, et al. Phenology and blossom-fruiting characteristics of *Sapindus mukorossi* [J]. J Northeast For Univ, 2015, 43(6):34–40, 123. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.20150522.062.
- [24] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiol, 1987, 3(4):309–320. DOI: 10.1093/treephys/3.4.309.
- [25] 刘洋, 王焱, 王斐, 等. 宽窄行栽植下毛白杨不同方位树干液流的差异[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(10):95–105. LIU Y, WANG Y, WANG F, et al. Azimuthal variation in sap flux density of *Populus tomentosa* under wide and narrow row planting scheme [J]. J Cent South Univ For Technol, 2018, 38(10):95–105. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923X.2018.10.015.

- [26] 赵飞飞, 马煦, 邸楠, 等. 毛白杨茎干不同方位夜间液流变化规律及其主要影响因子[J]. 植物生态学报, 2020, 44(8): 864–874. ZHAO F F, MA X, DI N, et al. Azimuthal variation in nighttime sap flow and its mainly influence factors of *Populus tomentosa*[J]. Chin J Plant Ecol, 2020, 44(8): 864–874. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0089.
- [27] CAMPBELL G S, NORMAN J M. An introduction to environmental biophysics[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2000.
- [28] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 马占相思(*Acacia mangium*)树干液流密度和整树蒸腾的个体差异[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4050–4058. ZHAO P, RAO X Q, MA L, et al. The variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium*[J]. Acta Ecol Sin, 2006, 26(12): 4050–4058. DOI: 10.3321/j.issn.1000-0933.2006.12.018.
- [29] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳山辽东栎夏季树干液流通量研究[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 174–177. CAO W Q, HAN H R, MA Q Y, et al. Sap flow flux of *Quercus liaotungensis* in summer in deciduous broad-leaf forest of Taiyue Mountain in Shanxi Province[J]. Sci Silvae Sin, 2004, 40(2): 174–177. DOI: 10.3321/j.issn.1001-7488.2004.02.031.
- [30] GRANIER A, CLAUSTRES J P. Water relations of a Norway spruce (*Picea abies*) tree growing in natural condition: variation within the tree[J]. Acta Oecol, 1989, 10(3): 295–310.
- [31] 黄雅茹, 李永华, 辛智鸣, 等. 平茬措施对人工梭梭树干液流的影响及其与气象因子的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 129–139. HUANG Y R, LI Y H, XIN Z M, et al. Effects of stumping on sap flow of artificial *Haloxylon ammodendron* and its relationship with meteorological factors[J]. J Cent South Univ For Technol, 2021, 41(3): 129–139. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923X.2021.03.014.
- [32] CERMÁK J, KUCERA J, BAUERLE W L, et al. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees[J]. Tree Physiol, 2007, 27(2): 181–198. DOI: 10.1093/treephys/27.2.181.
- [33] DZIKITI S, STEPPE K, LEMEUR R, et al. Whole-tree level water balance and its implications on stomatal oscillations in orange trees (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) under natural climatic conditions[J]. J Exp Bot, 2007, 58(7): 1893–1901. DOI: 10.1093/jxb/erm023.
- [34] WANG H, HE K N, LI R J, et al. Impact of time lags on diurnal estimates of canopy transpiration and canopy conductance from sap-flow measurements of *Populus cathayana* in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. J For Res, 2017, 28(3): 481–490. DOI: 10.1007/s11676-016-0333-z.
- [35] 王浩宇, 刘建功, 袁泓昌, 等. 3种浸提液对樟子松种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 森林工程, 2023, 39(3): 30–39. WANG H Y, LIU J G, YUAN H C, et al. Effects of three extracts on seed germination and seedling growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* [J]. For Eng, 2023, 39(3): 30–39.
- [36] 党宏忠, 杨文斌, 李卫, 等. 民勤绿洲二白杨树树干液流的径向变化及时滞特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2501–2510. DANG H Z, YANG W B, LI W, et al. Radial variation and time lag of sap flow of *Populus gansuensis* in Minqin Oasis, northwest China[J]. Chin J Appl Ecol, 2014, 25(9): 2501–2510. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20140627.001.
- [37] SHEKOOFA A, ROSAS-ANDERSON P, CARLEY D S, et al. Limited transpiration under high vapor pressure deficits of creeping bentgrass by application of Daconil-Action[J]. Planta, 2016, 243(2): 421–427. DOI: 10.1007/s00425-015-2417-y.
- [38] 王城城, 叶文伟, 赵从举, 等. 热带桉树树干液流的时滞效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 25–32. WANG C C, YE W W, ZHAO C J, et al. Sap flow in the stem of *Eucalyptus* and changes in meteorological factors are not consistent[J]. J Irrig Drain, 2022, 41(1): 25–32. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2020706.
- [39] HAN C, CHEN N, ZHANG C K, et al. Sap flow and responses to meteorological about the *Larix principis-rupprechtii* plantation in Gansu Xinlong Mountain, northwestern China [J]. For Ecol Manag, 2019, 451: 117519. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117519.
- [40] WANG X F, LIU J F, SUN Y Y, et al. Sap flow characteristics of three afforestation species during the wet and dry seasons in a dry-hot valley in southwest China[J]. J For Res, 2017, 28(1): 51–62. DOI: 10.1007/s11676-016-0276-4.
- [41] HONG L, GUO J B, LIU Z B, et al. Time-lag effect between sap flow and environmental factors of *Larix principis-rupprechtii* Mayr [J]. Forests, 2019, 10(11): 971. DOI: 10.3390/f10110971.
- [42] 杨丽琳, 邢万秋, 王卫光, 等. 新安江源区杉木树干液流速率变化及其对环境因子的响应[J]. 植物生态学报, 2023, 47(4): 571–583. YANG L L, XING W Q, WANG W G, et al. Variation of sap flow rate of *Cunninghamia lanceolata* and its response to environmental factors in the source area of Xin'anjiang River[J]. Chin J Plant Ecol, 2023, 47(4): 571–583. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0177.
- [43] MOLINA A J, ARANDA X, LLORENS P, et al. Sap flow of a wild cherry tree plantation growing under Mediterranean conditions: assessing the role of environmental conditions on canopy conductance and the effect of branch pruning on water productivity[J]. Agric Water Manag, 2019, 218: 222–233. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.03.019.
- [44] 魏新光, 陈滇豫, LIU Shouyang, 等. 修剪对黄土丘陵区枣树蒸腾的调控作用[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 194–202, 315. WEI X G, CHEN D Y, LIU S Y, et al. Effect of trim on jujube transpiration in Loess Hilly Region [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2014, 45(12): 194–202, 315. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.029.

(责任编辑 王国栋)