

引用格式: 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分析[J]. 山地学报, 2022, 40(2): 220-234.

TANG Zishu, WANG Genxu, HU Zhaoyong. Characteristics of stem sap flow and influencing factors of *Abies fabri* in varied diameters on Mount Gongga, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 220-234.

## 贡嘎山不同径级峨眉冷杉树干液流特征及其影响因素

唐子舒, 王根绪, 胡兆永\*

(四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

**摘要:** 树木蒸腾是森林生态系统水循环的重要组成部分。准确了解植物蒸腾的变化规律及其影响因子, 有助于科学掌握和理解植被生理生态过程对气候变化的响应。我国西南山地森林生态系统植被类型丰富, 环境条件复杂多变, 是气候敏感区和典型生态环境脆弱地带, 但已有研究更多关注区域蒸散发计算及光合作用对水分利用的响应规律, 缺乏对植物蒸腾变异规律及其影响因子的深入探讨。本研究利用热扩散探针技术, 获得贡嘎山峨眉冷杉 2017—2018 年小(20~40 cm)、中(40~60 cm)、大(60~80 cm) 3 个径级的树干液流速率, 采用相关分析和逐步回归分析量化环境因子对液流速率的影响。结果发现: (1) 半小时尺度, 液流速率呈单峰曲线变化, 且增长快于回落, 夜间液流活跃; (2) 日尺度, 液流速率变化大致呈先增后减的趋势, 整体波动幅度与径级大小呈反比; (3) 不同时间尺度下, 各径级液流速率按大小排列均为: 中径级 > 小径级 > 大径级; (4) 液流主要与气象因子有关, 液流速率与水汽压亏缺、空气温度、风速和光合有效辐射呈极显著正相关( $p < 0.01$ ), 与相对湿度呈极显著负相关( $p < 0.01$ )。同时, 液流受水分条件的影响, 干季缺水时, 土壤湿度和降雨促进液流蒸腾, 湿季水分过多则起抑制作用; (5) 日尺度, 中、小径级树木比大径级树木更易受环境因素的影响, 且分别在干、湿季受影响最大; (6) 逐步回归方程中的环境因子数量随时间尺度的增大而减少, 且气象因子占主导。研究结果可为预测我国西南高山森林生态系统植被水分利用及循环的变化趋势提供数据支撑和理论参考。

**关键词:** 亚高山森林; 树木蒸腾; 径级; 树干液流

**中图分类号:** S791.149

**文献标志码:** A

蒸腾作用是植物生长的重要过程, 其变化将影响区域乃至全球的水循环过程及气候<sup>[1-4]</sup>。准确了解植物蒸腾的变化规律及其影响因子, 有助于科学掌握和理解植被生理生态过程对气候变化的响应。当前常通过测定树干液流反映植株的蒸腾耗水状况及其对环境因子的响应特征<sup>[5-6]</sup>。不同研究中的液流速率日变化曲线存在不同峰型、启动时间、峰值等, 同时液流速率还受到月份、天气的影响, 甚至出

现相反的结果。日尺度上, 大多数植物的液流速率变化曲线表现出“昼高夜低”特征<sup>[7-8]</sup>, 即夜间液流变化速率稳定, 且主要集中在日落后到次日零点<sup>[9]</sup>, 零点到日出的时间段内液流速率变化平缓且接近于 0<sup>[10]</sup>。日变化曲线的峰型在不同季节呈现出明显差异, 即夏秋季液流主要呈双峰型曲线, 春季呈单峰型曲线, 但有研究发现一些树种在各生长期均呈单峰型变化, 或夏季偶有双峰型出现<sup>[11-13]</sup>; 此

**收稿日期** (Received date): 2021-10-05; **改回日期** (Accepted date): 2022-04-19

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金(41901053); 四川省科技计划项目(2021YJ0507); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(YJ202079)。[National Natural Science Foundation of China(41901053); Science and Technology Project of Sichuan Province(2021YJ0507); The Fundamental Research Funds for The Central Universities(YJ202079)]

**作者简介** (Biography): 唐子舒(1998-), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 生态水文。[TANG Zishu(1998-), female, born in Hengyang, Hunan province, M. Sc. candidate, research on eco-hydrology] E-mail: 2020223060046@stu.scu.edu.cn

\* **通讯作者** (Corresponding author): 胡兆永(1987-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 生态水文。[HU Zhaoyong(1987-), male, Ph. D., associate professor, research on eco-hydrology] E-mail: huzy@scu.edu.cn

外,液流的启动时间也存在差异,夏季启动早,停止晚,液流速率更大<sup>[9,14]</sup>。月尺度上,液流速率变化趋势整体先升后降<sup>[15]</sup>,晴天液流启动时间随月份增加依次递减<sup>[16]</sup>。可见,目前对于蒸腾活动的变化规律尚存在争议。

树木蒸腾活动的变化规律常受到树木本身生理结构和环境因子两方面的影响。一方面,蒸腾耗水常与植物木质部直径有关,如不同直径梭梭液流通量季节波动性较大,并且直径越大波动越高<sup>[16]</sup>;杨树单株耗水量随着胸径的增加而增加<sup>[13]</sup>;美国佐治亚州成熟的河岸森林,日液流速率与胸径呈指数关系<sup>[17]</sup>。另一方面,气象因子也会对蒸腾耗水产生影响,其中液流速率常与光合有效辐射(PAR)、水汽压亏缺(VPD)及空气温度( $T_a$ )等因子呈极显著正相关,与相对湿度(RH)呈极显著负相关<sup>[8,18-21]</sup>。液流速率具有即时性,不同时间尺度下与各环境因子相关性程度不同:随着时间尺度的扩大,液流速率变化的影响因子由多变少<sup>[22-23]</sup>并存在着季节差异。如日尺度下,黄土高原半干旱区辽东栎液流主导因子为 $R_s$ 和平均VPD<sup>[21]</sup>;库姆塔格沙漠东南部怪柳液流则受太阳总辐射、风速( $W_s$ )、RH、 $T_a$ 影响最大,而月尺度下,怪柳主要影响因子是VPD<sup>[24]</sup>;中国漳江口红树植物秋茄液流在夏季受PAR、VPD影响程度高于冬季<sup>[18]</sup>。因此,环境因子对植物蒸腾的影响随时间尺度、地区环境条件的不同呈现复杂多样性。

我国西南地区多高山,海拔高差悬殊,林木分布广泛,受季风气候和地形影响,山地森林生态系统多为低温高湿环境,与西北干旱缺水、东北低温干冷环境均存在差异,可能对植物蒸腾影响作用不同。目前虽有针对森林的研究<sup>[25-29]</sup>,但对我国西南地区的研究主要集中于区域蒸散发计算<sup>[30]</sup>及光合作用对水分利用的响应规律等方面<sup>[31-32]</sup>。西南山地地形和环境条件的复杂多变性,增大了该地区研究的不稳定性和难度,目前有关西南区域植物蒸腾变化模式的机理及环境响应的研究仍缺乏相对完整成熟的研究方案,针对不同尺度的植物液流变化也缺乏统一的结论。川西亚高山林区作为长江上游重要的水源涵养地与生态屏障<sup>[33]</sup>,是中国的气候敏感区和典型生态环境脆弱地带<sup>[34]</sup>,植被直接承受气候变暖影响<sup>[35]</sup>,故有必要探究川西亚高山低温高湿环境条件下冷杉树种的蒸腾活动及其影响因子。本研究拟以

西南地区的贡嘎山为研究区,选取其典型树种——峨眉冷杉为研究对象,利用2017年11月至2018年11月不同径级树干液流及气象数据,揭示峨眉冷杉在不同时间尺度及径级下的蒸腾规律及其主要影响因子,进一步了解西南高山针叶树种的蒸腾模式,以期为深入认识西南山地森林生态水循环过程提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于横断山系东部大渡河与雅砻江之间的大雪山中南段的贡嘎山东坡,地理位置为 $29^{\circ}20' \sim 30^{\circ}20' \text{N}$ 、 $101^{\circ}30' \sim 102^{\circ}15' \text{E}$ ,面积约1万 $\text{km}^2$ (图1)。研究区处于亚热带,属亚热带季风气候,由于地处青藏高原边缘,海拔较高,因此,也有人将贡嘎山地区划为青藏高原或川西高原气候,属于大陆性季风高原型气候。该区干、湿季分明,根据多年降水分布特征,将5—10月划分为湿季,11月至次年4月划分为干季。湿季一般雨水较多,空气湿热;而干季寒冷干燥、昼夜温差大、天气晴朗且日照强烈。

贡嘎山地区拥有从热带到冰雪带完整的植被垂直带谱:常绿阔叶林带—山地针叶阔叶混交林带—亚高山针叶林带—高山灌丛草甸带—高山流石滩稀疏植被带及永久冰雪带。本研究样地位于针叶林带(海拔3262 m),优势树种为峨眉冷杉(*Abies fabri*)。2014年8月在样地附近建立了42 m的气象观测塔(3262 m asl,  $29^{\circ}34'17.760'' \text{N}$ ,  $101^{\circ}59'06.002'' \text{E}$ )。根据2017年的观测数据,该点年气温在2 m高处为 $3.42^{\circ}\text{C}$ ,40 m高处为 $3.44^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为2002.34 mm,全年干旱指数为0.51。

### 1.2 样地特征

根据样地调查数据的胸径分布情况<sup>[36]</sup>,选取小、中、大三个不同径级的样树进行树干液流监测,选取样树的基本特征见表1。

边材总面积( $S_k$ )可由样树胸径、树皮厚度和边材厚度计算得到<sup>[37]</sup>:

$$S_k = \pi SWT(D - 2B - SWT) \quad (1)$$

式中, $SWT$ 为边材厚度(cm); $B$ 为树皮厚度(cm); $D$ 为胸径(cm)。

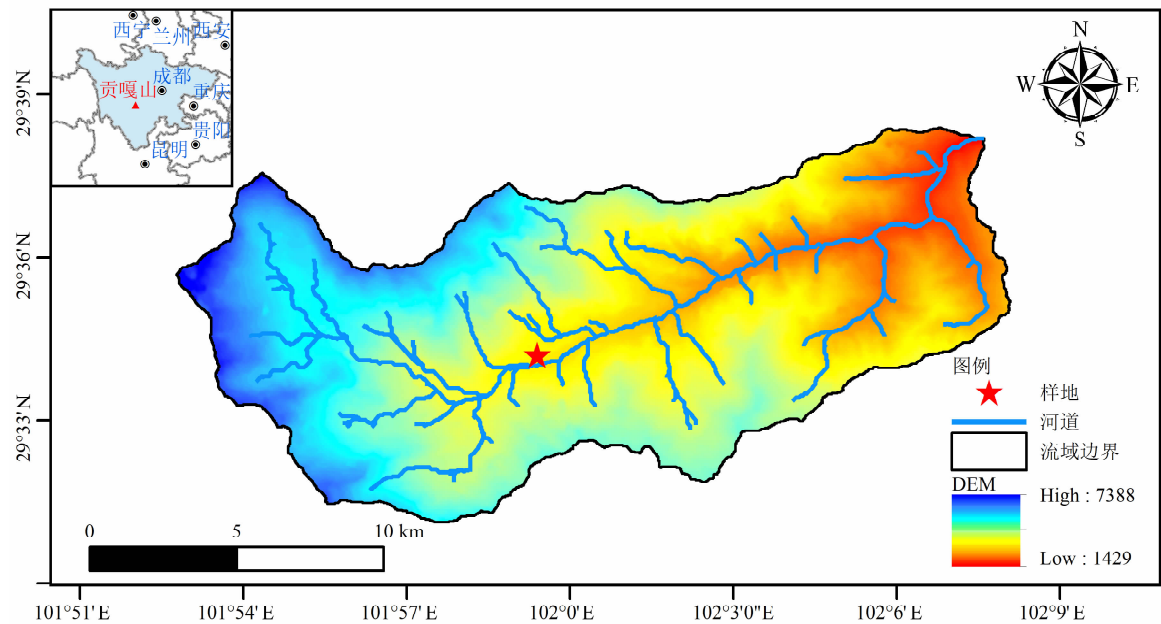


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of study area

表 1 样树基本特征

Tab. 1 Characteristics of the sample trees

径级/cm	株数	平均胸径/cm	平均树高/cm	边材厚度/cm	边材总面积/cm <sup>2</sup>
小径级 (20 ~ 40)	4	27.89 ± 2.75	14.25 ± 0.49	3.36 ± 1.10	235.78 ± 48.81
中径级 (40 ~ 60)	5	52.15 ± 4.72	18.91 ± 1.29	5.10 ± 0.65	747.41 ± 113.01
大径级 (60 ~ 80)	3	71.85 ± 6.10	23.23 ± 0.73	6.20 ± 0.46	1429.61 ± 169.07

注: ± 后数值表示最大、最小胸径距中位数的差值绝对值。如 27.89 ± 2.75 表示 20 ~ 40 cm 径级样树的最大胸径为 30.64 cm,最小胸径为 25.14 cm。

1.3 研究方法

1.3.1 液流速率测定

利用热扩散插针式植物液流计 (TDP - 30, Dynamax, 美国) 测定树干液流速率。数据采集器型号为 CR1000, 液流数据每 10 s 采集一次, 输出间隔为 30 min。液流速率计算公式如下<sup>[38-39]</sup>:

$$V_s = 0.0119 \times \left( \frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (2)$$

式中,  $V_s$  为树干边材的液流速率 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\Delta T_m$  为 24 h 内最大探针温差值 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta T$  为两探针间的瞬时温差值 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\Delta T$  由 TDP 两探针所输出的电压差除以经验常数 0.04 所得。

1.3.2 环境因子观测

在气象观测塔 40 m 处分别安装了气象传感器 (表 2)。实验监测了降雨 ( $P, \text{mm}$ )、太阳辐射 ( $R_s, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )、光合有效辐射 ( $\text{PAR}, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、

空气温度 ( $T_a, ^{\circ}\text{C}$ )、空气相对湿度 ( $\text{RH}, \%$ )、风速 ( $W_s, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、风向 ( $W_d, ^{\circ}$ ) 等气象要素, 同时在地面下 5 cm、10 cm、20 cm 和 40 cm 处布设了土壤温度 ( $T_{\text{soil}}, ^{\circ}\text{C}$ ) 和土壤湿度 ( $M_{\text{soil}}, \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) 探头。气象站距离样地 10 m, 数据输出间隔为 30 min。

表 2 主要仪器型号

Tab. 2 Specifics of the instruments

观测要素	探头型号	厂商/国家
辐射	NR01	Hukseflux, Netherlands
空气温度/湿度	HMP 155A	Vaisala, Finland
风速/风向	03002	RM Young, USA
土壤热通量	HFP01SC	Hukseflux, Netherlands

饱和水汽压差 (VPD, kPa) 由  $T_a$  和 RH 计算得到, 公式如下<sup>[40]</sup>:

$$\text{VPD} = (1 - \text{RH}) \left( 0.611 \times \frac{17.502 T_a}{e^{T_a + 240.97}} \right) \quad (3)$$

式中, RH 为相对湿度(%);  $T_a$  为空气温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

#### 1.4 数据分析处理

采用 EXCEL 软件对环境因子和峨眉冷杉树干边材液流速率进行预处理(日数据分类汇总、均值、求和计算);采用 Origin 软件作环境因子及液流速率变化图并用 R 语言绘制相关性矩阵热图;采用 SPSS 软件进行树干液流与环境因子的相关分析及逐步线性回归方程的拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子变化

各环境因子的变化趋势如图 2 所示。VPD 全年大致呈先升高后降低的趋势,且干季变动程度较湿季更大,最高值出现在 5 月中旬,为 0.91 kPa;  $T_a$  年均值为 3.33  $^{\circ}\text{C}$ ,湿季空气温度均值(8.09  $^{\circ}\text{C}$ )高于干季(-1.52  $^{\circ}\text{C}$ ),于 2 月初达到最小值 -11.98  $^{\circ}\text{C}$ ,7 月初达到最大值 13.65  $^{\circ}\text{C}$ 。RH 年均值 89.4%,于 2 月底达最小值 23.0%,湿季 6 月后进入长期高湿状态,日均值在 76%~100% 内变动。 $W_s$  年均值 0.69  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,日均最大值为 2.55  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出现在 2 月中旬。PAR 最大值、最小值分别出现在 5 月中旬和 2 月上旬,分别为 663.17 和 3.63  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

研究期间年降雨日均值呈先增后减趋势变化,干季的降水均处于较低水平,而湿季降水变动较大;3—10 月降雨总量占总降雨量 92.6%,全年累计降雨 2091.34 mm,其中最大的三日降雨分别出现在 5 月下旬、6 月底和 8 月中旬。土壤湿度中,三个更浅层深度的土壤湿度变化曲线形状相差不大。干季,由于 3 月前降雨少,土壤湿度均总体开始下降,于 2 月中旬跌至最低值,后于 3 月初以不同的速度迅速回升并在稳定范围内波动。湿季,土壤湿度波动至 7 月初时,土壤湿度先后有持续约两月的突增波动。跌入低谷期的土壤湿度大小顺序为:40 cm > 20 cm > 5 cm > 10 cm,其余时间段土壤湿度大小则均为 5 cm > 20 cm > 10 cm > 40 cm,且三个更浅层的波动程度远低于 40 cm 土壤深度。

### 2.2 液流速率变化

#### 2.2.1 液流速率日变化

液流速率均呈明显的单峰曲线,7:30—9:30 液

流迅速增大,并相继于 12:30—1:30 达到峰值,湿季液流上升速度较干季更快,启动时间也更早,湿季集中于 7:00—8:30,干季启动时间相对延迟 30~60 min;此外,大部分液流下降速度缓于其上升速度,干季约在 19:00 后进入“低谷”,而湿季更迟,且两个时期的夜间液流均较活跃,前半夜液流速率略高于后半夜(图 3)。

不同径级液流日变化存在差异。其中,中径级液流速率于 8:00 启动,于 12:30 达到峰值,而小、大径级的液流启动时间与到达峰值时间均比中径级晚。每日的液流速率半小时均值按大小排列:中径级 > 小径级 > 大径级,分别为 0.00028、0.0002、0.00013  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。虽然同一径级的峨眉冷杉在两个生长阶段液流变化趋势大致相同,但各月之间的液流变化有差别:干季,大径级的液流水平在 1 月最大,其余两径级最大液流水平均在 4 月;湿季,各径级最高液流水平则均出现在 5 月,并于 13:00 达到峰值,其中中径级样树液流峰值最大,达到 8.48  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

#### 2.2.2 液流速率逐日变化

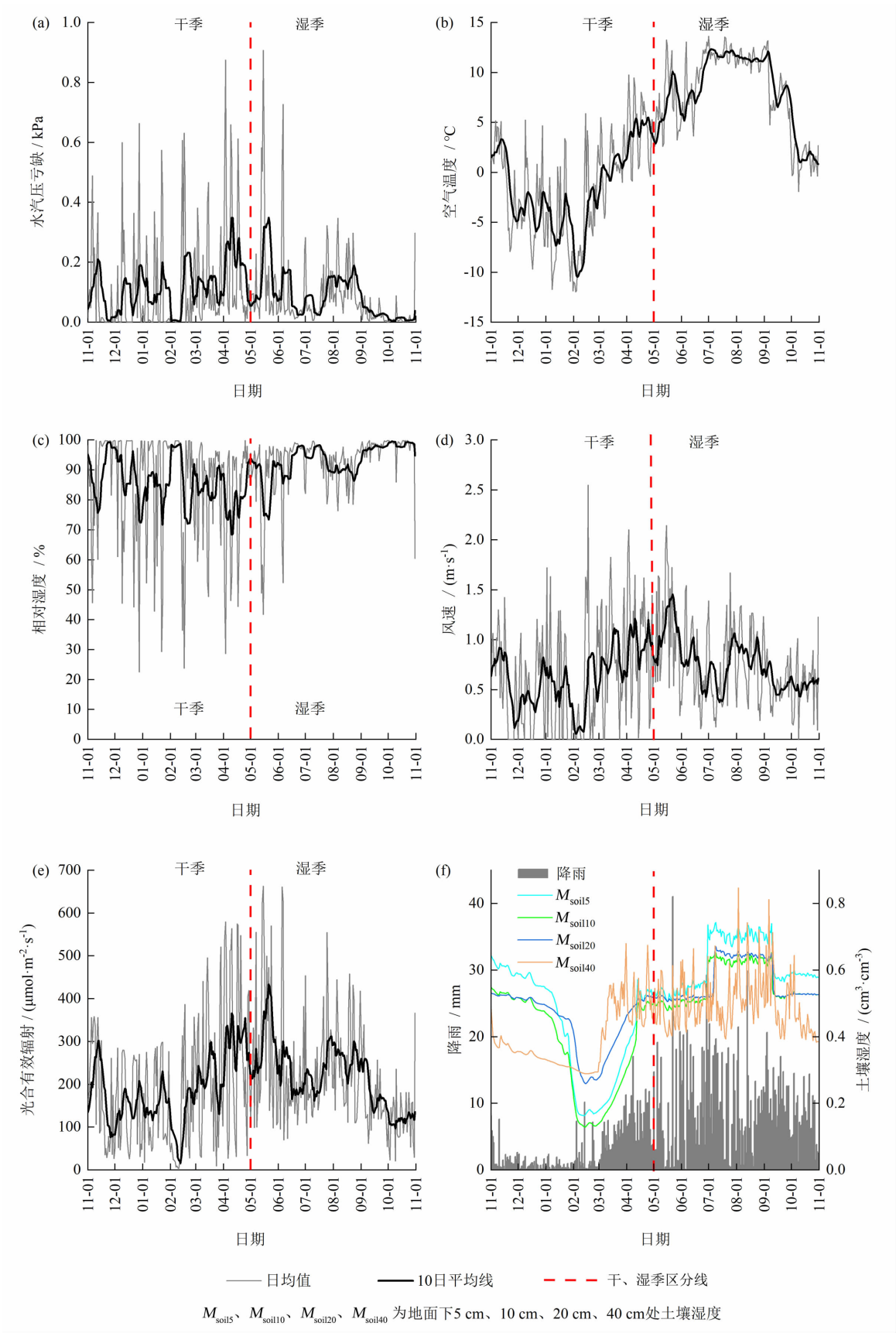
三个径级的液流大致呈先增后减的趋势,整体波动幅度与径级大小呈反比(图 4)。小、中径级液流在 12 月上旬和月底有两次突增,小径级接着在 1 月中旬有更大突增;小、中两径级样树均在 4—6 月期间波动幅度迅速增大,6 月骤减小幅波动后又在 7 月中下旬突增,峰值相继出现在 4 月下旬、5 月中旬和 7 月下旬,而大径级样树峰值出现在 1 月底,之后一直到 10 月液流速率均小幅波动且逐渐稳定;各径级液流速率日均值大小顺序为:中径级 > 小径级 > 大径级,分别达到 9.91、7.13、4.66  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

除了中径级,其他径级的样树在湿季的液流速率日均值均略低于干季,但从平均液流水平看,湿季日液流速率略高于干季,蒸腾活动总体水平干湿季相差不大(表 3)。

表 3 干湿季不同径级样树日液流速率均值

Tab. 3 Mean daily sap flow velocity in different diameters during dry and wet seasons

季节	日液流速率/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )			
	小径级	中径级	大径级	平均
干季	7.48	8.91	4.74	7.04
湿季	6.79	10.89	4.60	7.43



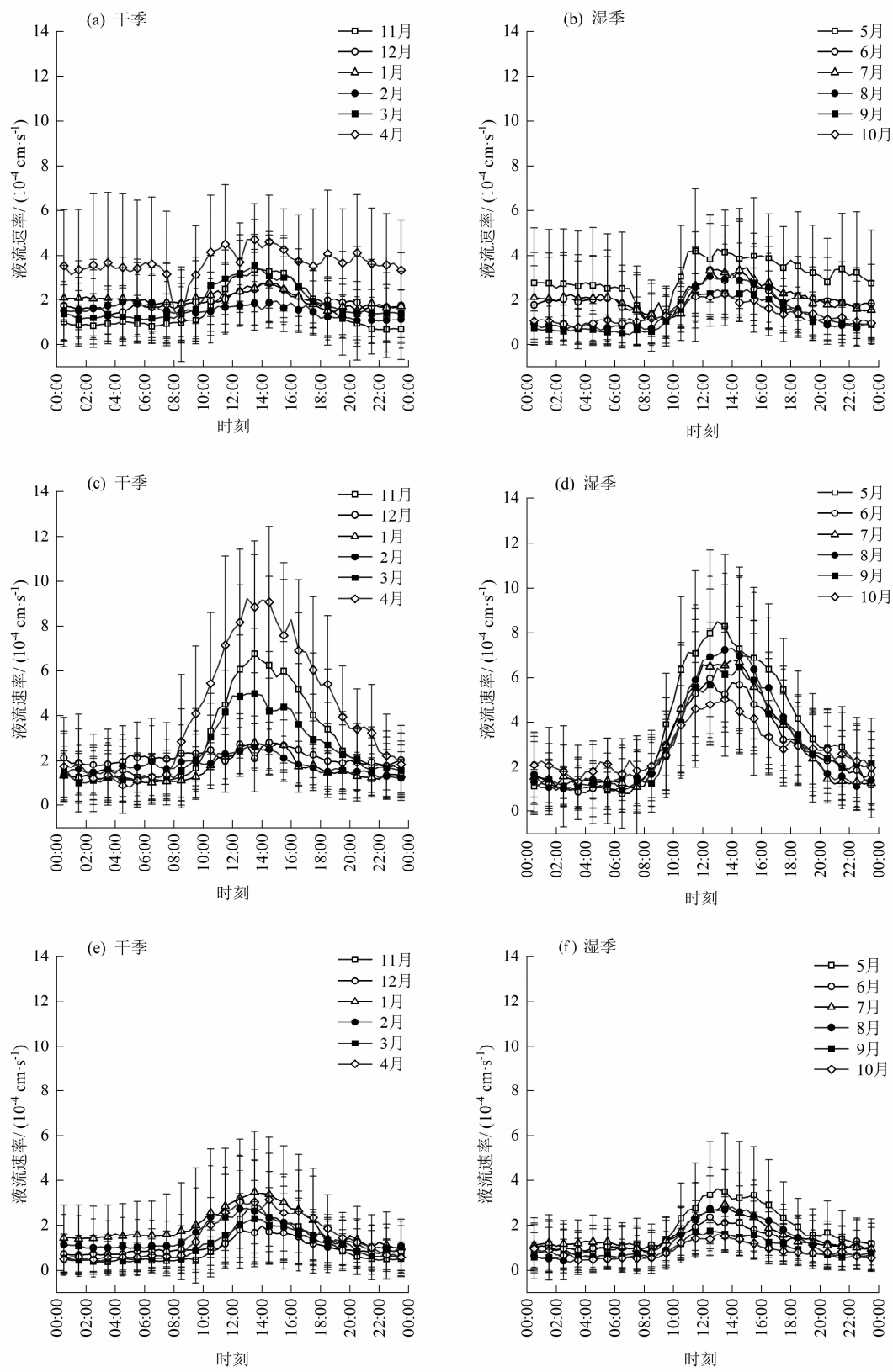


图3 干湿季各径级样树液流速率日变化:

(a)(b) 20~40 cm 径级液流; (c)(d) 40~60 cm 径级液流; (e)(f) 60~80 cm 径级液流

Fig. 3 Diurnal changes of sap flow velocity in different diameters during dry and wet seasons: (a)(b) Sap flow velocity of 20~40 cm diameters; (c)(d) Sap flow velocity of 40~60 cm diameters; (e)(f) Sap flow velocity of 60~80 cm diameters

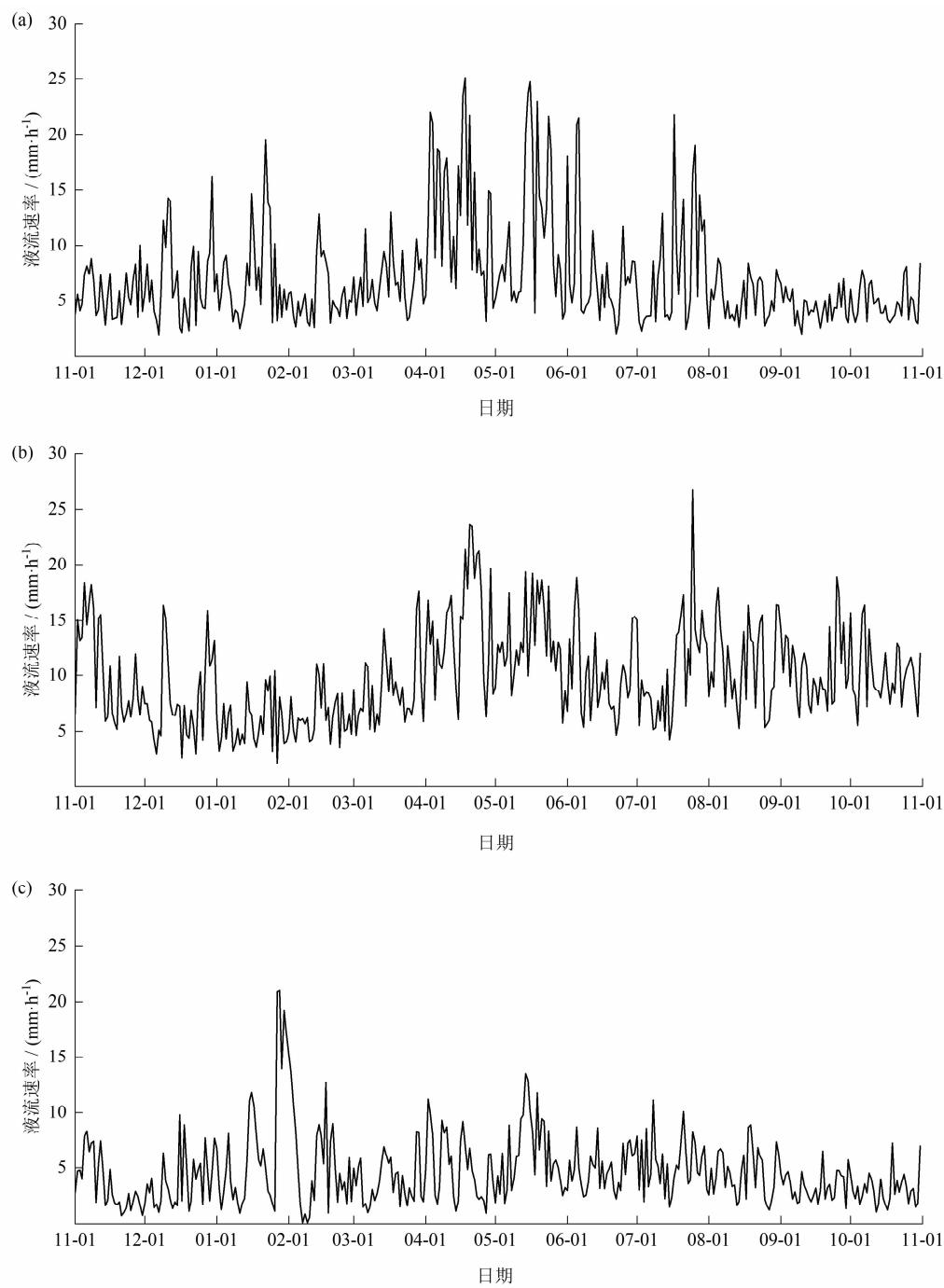


图 4 不同径级液流速率日均值变化:

(a)20~40 cm 径级液流;(b)40~60 cm 径级液流;(c)60~80 cm 径级液流

Fig.4 Variations of daily mean sap flow velocity during the study period: (a) sap flow velocity of 20~40 cm diameters; (b) sap flow velocity of 40~60 cm diameters; (c) sap flow velocity of 60~80 cm diameters

2.3 液流速率对环境因子的响应特征

2.3.1 半小时尺度液流速率与环境因子的相关性

液流速率与各环境因子均显著相关(表 4)。VPD、 $T_a$ 、 $W_s$  和 PAR 均与液流速率呈极显著正相关,而 RH 则为极显著负相关,其中 20~40 cm 径级

液流速率主要受  $W_s$ 、VPD、PAR、RH 影响, $T_a$  影响相对较小,而更大的两个径级主要影响因子为 PAR 和  $W_s$ ;平均直径影响因子顺序与大径级相同,为  $PAR > W_s > VPD > RH > T_a$ 。

不同胸径水平样树对应各环境因子的同期相关

表 4 半小时尺度树干液流与环境因子的相关分析

Tab. 4 Correlation analysis between sap flow velocity and environmental factors in half-hour scale

径级/cm	生长阶段	饱和水汽压差/kPa	空气温度/℃	相对湿度/%	风速/(m · s <sup>-1</sup> )	有效光合辐射/(μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )
20 ~ 40	湿季	0.45 * *	0.23 * *	-0.43 * *	0.46 * *	0.38 * *
	干季	0.33 * *	0.36 * *	-0.27 * *	0.32 * *	0.31 * *
	全年	0.38 * *	0.18 * *	-0.32 * *	0.39 * *	0.34 * *
40 ~ 60	湿季	0.29 * *	0.20 * *	-0.26 * *	0.59 * *	0.68 * *
	干季	0.29 * *	0.44 * *	-0.22 * *	0.47 * *	0.53 * *
	全年	0.28 * *	0.30 * *	-0.19 * *	0.54 * *	0.61 * *
60 ~ 80	湿季	0.41 * *	0.29 * *	-0.37 * *	0.55 * *	0.60 * *
	干季	0.34 * *	0.17 * *	-0.30 * *	0.34 * *	0.48 * *
	全年	0.37 * *	0.14 * *	-0.31 * *	0.43 * *	0.53 * *
平均	湿季	0.43 * *	0.27 * *	-0.39 * *	0.63 * *	0.66 * *
	干季	0.40 * *	0.44 * *	-0.33 * *	0.49 * *	0.57 * *
	全年	0.40 * *	0.28 * *	-0.31 * *	0.57 * *	0.62 * *

注: \* \* 为极显著相关( $p < 0.01$ ), \* 为显著相关( $p < 0.05$ )。

性程度有所不同,但总体上,较大的两个胸径样树受各项环境因子的影响程度均大于 20 ~ 40 cm 水平样树,且大部分情况下湿季相关性高于干季。

2.3.2 日尺度液流速率与环境因子的相关性

由图 5 可知,整个生长周期,液流速率整体均与 VPD、 $T_a$ 、 $W_s$  和 PAR 呈正相关,与 RH 呈负相关。干季液流速率受  $T_a$ 、VPD、PAR 影响最大,各径级水平样树受环境因子影响程度顺序为:中径级 > 小径级 > 大径级;湿季液流速率主要受 PAR、 $W_s$ 、VPD 共同影响,各径级样树受环境因子影响程度顺序为:小径级 > 中径级 > 大径级。

生长地区的降水和土壤水分状况对各径级样树的蒸腾活动也很重要<sup>[41]</sup>。干季时,除了大径级样树液流速率与土壤湿度和降雨呈负相关,其他径级均与各深度土壤湿度呈正相关;湿季时,仅小径级液流速率表现出与土壤湿度存在极显著负相关性(20 cm 处土壤湿度除外),降雨则与各径级液流速率均呈显著或极显著负相关性。

液流速率与各深度土壤湿度和降雨的相关性程度也有明显差异。干季,平均液流速率仅与 20、40 cm 两个最深处土壤湿度呈极显著正相关,三个径级水平中,中小径级液流均受 20、40 cm 深处土壤湿度影响最大,而大径级样树则受 5、10 cm 更浅层土壤湿度影响最大,三个径级水平样树液流速率整

体受土壤湿度影响程度顺序为:中径级 > 小径级 > 大径级;湿季,各径级样树液流速率均与 5、10、40 cm 深处土壤湿度相关性程度最大,但总体相关性不高,虽平均液流水平呈显著负相关,但仅小径级样树达到了极显著负相关。

2.3.3 液流速率的环境因子影响模型

以不同季节半小时液流速率为因变量,以环境因子对应的半小时值为自变量,进行逐步回归,得到半小时尺度树干液流速率和环境因子的回归方程;以不同季节液流速率日均值为因变量,对应各环境因子为自变量,得到日尺度液流速率和环境因子的回归方程,结果见表 5。

3 讨论

3.1 不同时间尺度树干液流速率特性

峨眉冷杉液流日变化存在明显的昼高夜低规律,这与大部分研究结果相似<sup>[42-45]</sup>。这种液流昼夜差异的原因在于白天太阳辐射强度更大,空气温度更高,叶片气孔导度随之增大,使叶片和空气之间的水汽压梯度变大,水分汽化速度加快,引发更强的蒸腾活动,从而白天液流速率比夜间更大。此外,本研究中液流速率日变化均呈单峰曲线,这与大部分研究相同<sup>[46-48]</sup>,但与丁访军等<sup>[49]</sup>在江西大岗山毛竹



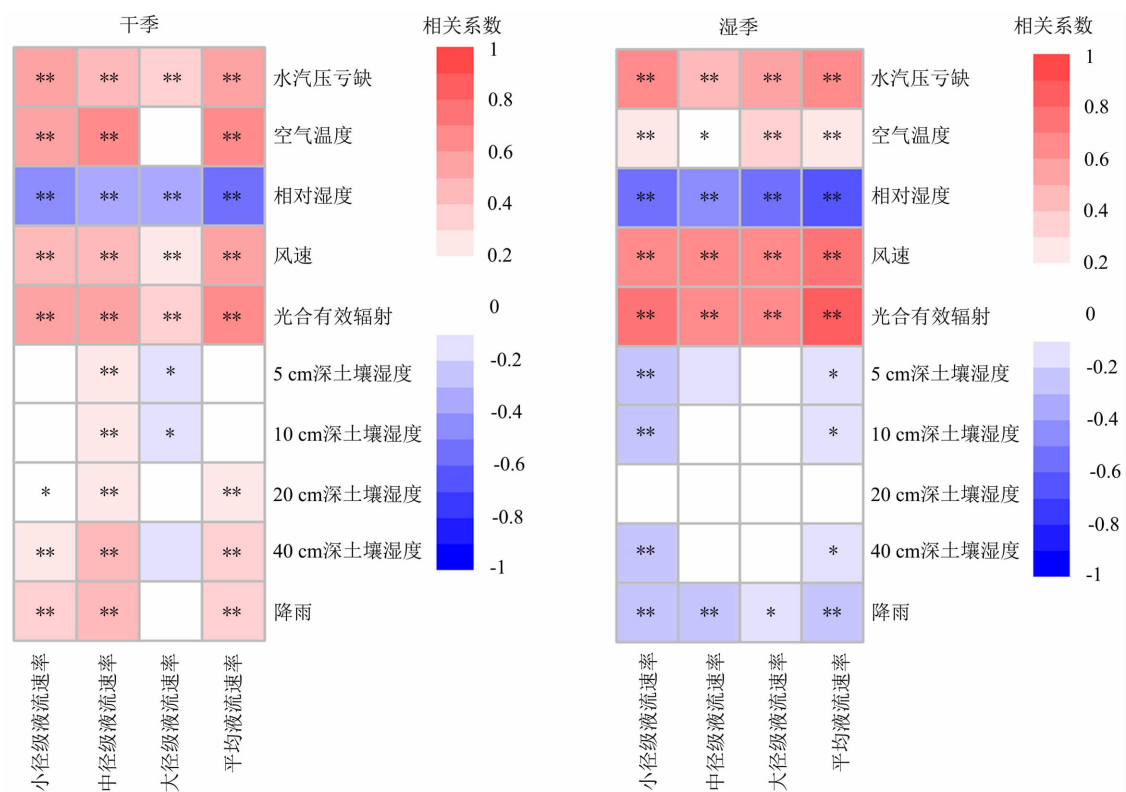


图 5 干、湿季日尺度液流速率与环境因子的相关分析

Fig. 5 Correlation analysis between sap flow velocity and environmental factors in daily scale during the dry season and wet season  
注: \*\* 为极显著相关( $p < 0.01$ ), \* 为显著相关( $p < 0.05$ ), 平均液流速率为三种胸径液流速率均值。

表 5 树干液流速率与环境因子的逐步回归方程

Tab. 5 Stepwise regression equation of stem sap flow velocity and environmental factors

时间尺度	生长阶段	回归方程
半小时尺度	干季	$V = 0.381 \text{ PAR} + 0.214 \text{ W}_s + 0.084 \text{ T}_a + 0.089 \text{ VPD} + 0.042 \text{ M}_{\text{soil}5} + 0.031 \text{ M}_{\text{soil}40}$ ( $R^2 = 0.401$ )
	湿季	$V = 0.413 \text{ PAR} + 0.369 \text{ W}_s + 0.097 \text{ VPD} - 0.109 \text{ M}_{\text{soil}5} + 0.087 \text{ T}_a$ ( $R^2 = 0.582$ )
	全年	$V = 0.410 \text{ PAR} + 0.310 \text{ W}_s + 0.107 \text{ VPD} + 0.028 \text{ T}_a$ ( $R^2 = 0.479$ )
日尺度	干季	$V = 5.053 + 0.428 \text{ PAR} + 0.169 \text{ T}_a + 0.164 \text{ VPD}$ ( $R^2 = 0.482$ )
	湿季	$V = 5.572 + 0.573 \text{ PAR} + 0.319 \text{ W}_s - 0.116 \text{ M}_{\text{soil}5}$ ( $R^2 = 0.729$ )
	全年	$V = 3.940 + 0.653 \text{ PAR} + 0.123 \text{ VPD}$ ( $R^2 = 0.557$ )

的研究以及孙鹏飞等<sup>[50]</sup>在古尔班通古特沙漠南缘梭梭树的研究不同,即液流变化曲线可能呈双峰型或多峰型。本研究样地位于高湿地区,与干旱沙漠等地区相比,水分条件对树木生长限制效果更小,因此不排除液流日变化的差异与环境水分供应差异有关的可能性。

峨眉冷杉日均液流速率大致呈先增后减的趋势,但液流启动时间、进入“低谷”时间、峰值出现时间及大小等随生长时段和径级不同而存在差异。湿季液流上升速度较干季更快,启动时间更早,进入

“低谷”时间更晚,这与广东省巨尾桉<sup>[51]</sup>及云南省干热河谷中大叶相思树<sup>[52]</sup>的研究结果相符,原因可能是湿季日出时间更早,太阳辐射和温度上升速度更快,持续更久,从而蒸腾活动增强也就越快<sup>[53-54]</sup>。

各月液流速率日均值变化也有较明显差异。干季时,中小径级液流在 12 月上旬和月底有两次突增,可能是由 12 月 9 日和 12 月 28 日时 VPD、 $T_a$ 、RH 有突然大幅波动引起:VPD 增大,温度升高,树木水分蒸腾拉力增大;RH 降低,气孔导度变大,蒸腾活动水分更快排出。20 ~ 40 cm 径级样树液流突

增延后于 40~60 cm 径级,可能在于导管直径较小,冬季液流运输速度更低,存在更严重的滞后<sup>[55]</sup>。在湿季,中小径级液流波动幅度明显大于干季,液流速率在 4—7 月间整体水平更高,可能与该阶段期间各环境因子大幅变化有关。4 月初、5 月中旬风速突增,气温波动上升,相对湿度骤减,降雨较集中,同时水汽压亏缺达到了两个最大值,峨眉冷杉叶片内外的水蒸汽压力梯度增大,树体水分蒸腾拉力变强,使得液流速率在两个月的中旬分别出现较大程度升高。7 月下旬,液流速率再次出现大幅增加,原因可能在于夏季高温达到稳定,相对湿度因此降低,增大了蒸腾拉力,加上降雨较多,浅层土壤湿度水平达到稳定高度,为浅根系的峨眉冷杉蒸腾活动提供了充足的水分来源,使液流速率加快。60~80 cm 径级液流在湿季波动比干季小,于 1 月底达到峰值,不同于 20~40、40~60 cm 径级样树液流分别在湿季的 4 月下旬、7 月下旬达到峰值,这种差异可能是由于大径级样树导管直径更大,相同时间内传输的液流也越多,虽然导管直径越大越容易受冻融栓塞影响而减少导水率<sup>[56]</sup>,但在该径级水平冻融的影响有限。

### 3.2 蒸腾对环境因子的响应

峨眉冷杉液流速率与环境因子、树木直径有关,且不同生长阶段树干液流速率对环境因子的响应有一定的差异。半小时尺度与日尺度下,液流速率均整体与 VPD、 $T_a$ 、 $W_s$  和 PAR 呈极显著正相关,与 RH 呈极显著负相关,这与很多研究结果一致<sup>[57-58]</sup>。

本研究中峨眉冷杉半小时尺度液流变化主要影响因子为 PAR、 $W_s$ ,湿季相关性高于干季。湿季正处于峨眉冷杉生长季,植物生长和更新代谢更快,且进入夏季太阳辐射增强,进一步促进了峨眉冷杉的生长,并对其蒸腾活动有更大的影响。有研究认为林木蒸腾最主要的气象因子是  $R_s$ 、RH 和  $T_a$ <sup>[59]</sup>,这说明主要影响因子具有差异性和变动性,需根据具体研究对象和研究地点的特征分析。

各径级样树日尺度液流速率的主要影响因子差异较大,现有研究中影响蒸腾的主要环境因子不同,表明树木蒸腾耗水影响因素具有复杂性和相对性<sup>[60]</sup>。总体上,干季液流速率与土壤湿度和降雨呈正相关,湿季则呈负相关,原因可能在于研究地区常年处于高湿状态,植物的生长受水分条件的制约相对较小;当干季降雨减少、土壤湿度下降时,相对于干

燥的生长环境反而有利于植物生长,而湿季高湿多雨,过多的水分超过阈值时,抑制了冷杉的蒸腾活动<sup>[61]</sup>。

干季,峨眉冷杉平均液流速率仅与 20、40 cm 两个最深处土壤湿度呈极显著正相关,可能是由于干季降雨少,浅层土壤由于地被物覆盖,土壤水分蒸发慢,含水量较高,而更深处由于土壤持水能力差,水分下渗快,使得含水量较小且波动较大。同时峨眉冷杉树种为浅根性物种,距地表 30 cm 范围内分布着绝大多数根系<sup>[62-63]</sup>,平均总根长为 44 cm<sup>[64]</sup>,从而相对缺水的更深层土壤水分状况对峨眉冷杉液流的影响更大。其中中小径级样树出于根系向下生长的需要,液流速率均受 20、40 cm 处土壤湿度影响最大,而大径级样树根系生长更完全,对水分的需求则更多来源于 5、10 cm 处湿度更大的土壤,故受更浅层土壤湿度影响更大。湿季,液流速率与土壤湿度呈负相关且相关性程度与土壤深度呈反比,原因可能在于湿季降雨多,各深度土壤含水量均很大,过多的降水对峨眉冷杉的生长呈抑制作用,且峨眉冷杉为浅根系树种,受浅层土壤水分影响更大。

各径级液流速率大小顺序与干季环境因子的径级影响程度顺序相同,均为中径级 > 小径级 > 大径级,总体上干季液流速率受环境因子影响程度更大。原因可能在于干季气温多处于零度以下,导管发生栓塞的阈值大概在 44 cm<sup>[65-66]</sup>,中径级样树导管直径正好处于稍大于或等于该值的范围,最易发生冻融栓塞,从而影响液流传输,降低蒸腾作用强度。而小径级样树由于导管直径小,液流传输速率较更大径级的样树也相对更小,当干季环境条件变化,虽不至于发生栓塞,但本就小的液流传输速率也容易受影响而波动。大径级样树因导管直径远大于栓塞直径阈值,受冻融影响小,且液流传输速率最大,因而综合情况下液流受环境影响最小。

## 4 结论

峨眉冷杉液流速率变化及对环境因素的响应规律在不同时间尺度和胸径水平均存在差异。液流日变化呈单峰曲线,且下降速度缓于其上升速度。液流逐日变化大致呈先增后减的趋势,整体波动幅度与径级大小呈反比,各径级液流速率半小时均值、日均值大小顺序均为:中径级 > 小径级 > 大径级。液

流速率与 VPD、 $T_a$ 、 $W_s$ 、PAR 及 RH 等气象因子均存在不同程度相关性,同时受水分条件的影响,干季缺水时土壤湿度和降雨促进蒸腾活动,湿季水分过多时则起抑制作用,不同土壤深度水分状况的差异也对蒸腾强度有不同影响。总体上,大直径峨眉冷杉液流受环境因素的影响程度更小,且逐步回归方程中的环境因子数量随时间尺度的增大而减少。在全球气候变化的大背景下,本研究结果可为预测我国西南亚高山森林区域植被水分利用及循环的变化趋势提供数据支撑和理论参考。

### 参考文献 (References)

- [1] GOPALAKRISHNAN R, BALA G, JAYARAMAN M, et al. Sensitivity of terrestrial water and energy budgets to CO<sub>2</sub>-physiological forcing: An investigation using an offline land model [J]. *Environmental Research Letters*, 2011, **6**: 044013. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/044013
- [2] BERNACCHI C J, VANLOOKE A. Terrestrial ecosystems in a changing environment: A dominant role for water [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2015, **66**: 599-622. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-114834
- [3] ZHANG Y Q, CHIEW F H S, PENA-ARANCIBIA J, et al. Global variation of transpiration and soil evaporation and the role of their major climate drivers [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**: 6868-6881. DOI: 10.1002/2017JD027025
- [4] HONG Tao, DONG Wenjie, JI Dong, et al. The response of vegetation to rising CO<sub>2</sub> concentrations plays an important role in future changes in the hydrological cycle [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, **136**: 135-144. DOI: 10.1007/s00704-018-2476-7
- [5] 王媛,魏江生,刘兵兵,等. 环境因子对大兴安岭南段白桦树干液流变化特征的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2021, **49**(2): 11-17. [WANG Yuan, WEI Jiangsheng, LIU Bingbing, et al. Effect of environmental factors on characteristics of sap flow of *Betula platyphylla* in southern Daxing'an Mountains [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, **49**(2): 11-17] DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2021.02.003
- [6] BAUMGARTEN M, WEIS W, KUHN A, et al. Forest transpiration-targeted through xylem sap flux assessment versus hydrological modeling [J]. *European Journal of Forest Research*, 2014, **33**(4): 677-690. DOI: 10.1007/s10342-014-0796-4
- [7] 王志超,许宇星,竹万宽,等. 雷州半岛尾叶桉和湿加松人工林的蒸腾耗水规律[J]. *生态学报*, 2019, **39**(6): 2147-2155. [WANG Zhichao, XU Yuxing, ZHU Wankuan, et al. The transpiration water consumption of two common fast-growing forests in Leizhou Peninsula [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(6): 2147-2155] DOI: 10.5846/stxb201711292145
- [8] 程静,欧阳旭,黄德卫,等. 鼎湖山针阔叶混交林 4 种优势树种树干液流特征[J]. *生态学报*, 2015, **35**(12): 4097-4104. [CHENG Jing, OUYANG Xu, HUANG Dewei, et al. Sap flow characteristics of four dominant tree species in a mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(12): 4097-4104] DOI: 10.5846/stxb201310202533
- [9] 李浩,胡顺军,朱海,等. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J]. *生态学报*, 2017, **37**(21): 7187-7196. [LI Hao, HU Shunjun, ZHU Hai, et al. Characterization of stem sapflow *Haloxylon ammodendron* by using thermal dissipation technology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(21): 7187-7196] DOI: 10.5846/stxb201608301764
- [10] 夏桂敏,孙媛媛,王玮志,等. “寒富”苹果树茎流特征及其对环境因子的响应. *中国农业科学*, 2019, **52**(4): 701-714. [XIA Guimin, SUN Yuanyuan, WANG Weizhi, et al. The characteristics of sap flow of Hanfu apple trees and its response to environmental factors [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, **52**(4): 701-714] DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.04.011
- [11] 吴旭,陈云明,唐亚坤,等. 黄土丘陵区刺槐和侧柏人工林树干液流特征及其对降水的响应[J]. *植物生态学报*, 2015, **39**(12): 1176-1187. [WU Xu, CHEN Yunming, TANG Yakun, et al. Sap flow characteristics and its responses to precipitation in *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* plantations [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(12): 1176-1187] DOI: 10.17521/cjpe.2015.0114
- [12] 温杰,陈云明,唐亚坤,等. 黄土丘陵区油松、沙棘生长旺盛期树干液流密度特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(3): 763-771. [WEN Jie, CHEN Yunming, TANG Yakun, et al. Characteristics and affecting factors of sap flow density of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* in growing season in the hilly region of the Loess Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(3): 763-771] DOI: 10.13287/j.1001-9332.201703.034
- [13] 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. [MO Kangle, CHEN Lixin, ZHOU Jie, et al. Transpiration responses of a poplar plantation to the environmental conditions on a floodplain in northern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(20): 5812-5822] DOI: 10.5846/stxb201301280172
- [14] 马文涛,程平,李宏,等. 干旱绿洲区富士苹果树干边材液流动态及其对环境因子的响应[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2020, **46**(4): 428-440. [MA Wentao, CHENG Ping, LI Hong, et al. Stemflow dynamics of Fuji apple trunk sap in arid oasis area and its response to environmental factors [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science)*, 2020, **46**(4): 428-440] DOI: 10.3785/j.issn.1008-9209.

- 2019.10.281
- [15] 凡超, 邱燕萍, 李志强, 等. 荔枝树干液流速率与气象因子的关系[J]. 生态学报, 2014, **34**(9): 2401–2410. [FAN Chao, QIU Yanping, LI Zhiqiang, et al. Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(9): 2401–2410] DOI: 10.5846/stxb201307041839
- [16] 张晓艳, 褚建民, 孟平, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey) Bunge)树干液流特征及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2017, **37**(5): 1525–1536. [ZHANG Xiaoyan, CHU Jianmin, MENG Ping, et al. The effect of environmental factors on stem sap flow characteristics of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(5): 1525–1536] DOI: 10.5846/stxb201509241961
- [17] BOSCH D D, MARSHALL L K, TESKEY R, et al. Forest transpiration from sap flux density measurements in a southeastern coastal plain riparian buffer system [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, **187**: 72–82. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.12.002
- [18] 阎光宇, 冯建祥, 杨盛昌, 等. 中国漳江口红树植物秋茄液流特征及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(7): 2048–2058. [YAN Guangyu, FENG Jianxiang, YANG Shengchang, et al. Sapflow characteristics of *Kandelia obovata* and their controlling factors in Zhangjiang estuary, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(7): 2048–2058] DOI: 10.13287/j.1001–9332.201607.024
- [19] DU Hu, ZENG Fuping, SONG Tongqing, et al. Water depletion of climax forests over humid karst terrain: Patterns, controlling factors and implications [J]. Agricultural Water Management, 2021, **244**: 106541. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106541
- [20] FANG Shumin, ZHAO Chuanyan, JIAN Shengqi, et al. Canopy transpiration of *Pinus tabulaeformis* plantation forest in the Loess Plateau region of China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(5): 376. DOI: 10.1007/s12665–016–5291–4
- [21] YAN Meijie, ZHANG Jianguo, HE Qiuyue, et al. Sapflow-based stand transpiration in a semiarid natural oak forest on China's Loess Plateau [J]. Forests, 2016, **7**(10): 227. DOI: 10.3390/f7100227
- [22] 郝少荣, 裴志永, 段广东, 等. 不同时间尺度下环境因子与沙柳茎流关系的差异研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(3): 152–158. [HAO Shaorong, PEI Zhiyong, DUAN Guangdong, et al. Relationships between environmental factors and *Salix psammophila*'s sap flow at different time scales [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, **34**(3): 152–158] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2020.79
- [23] 李自豪, 卢志朋, 马澜桐, 等. 辽西北半干旱区沙地樟子松树干液流变化特征及影响因素[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, **51**(3): 271–278. [LI Zihao, LU Zhipeng, MA Lantong, et al. Variation characteristics and its influencing factors of sap flow for the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in sandy land in northwest Liaoning province [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, **51**(3): 271–278] DOI: 10.3969/j.issn.1000–1700.2020.03.003
- [24] 黄雅茹, 李永华, 辛智鸣, 等. 不同时间尺度气象因子与柽柳树干液流关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(11): 149–154. [HUANG Yaru, LI Yonghua, XIN Zhiming, et al. Relationships between meteorological factors and *Tamarix chinensis*'s sap flow at different time scales [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, **34**(11): 149–154] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2020.312
- [25] 赵平, 邹绿柳, 饶兴权, 等. 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化[J]. 生态学报, 2011, **31**(20): 6038–6048. [ZHAO Ping, ZOU Liliu, RAO Xingquan, et al. Water consumption and annual variation of transpiration in mature *Acacia mangium* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(20): 6038–6048]
- [26] 黄德卫, 张德强, 周国逸, 等. 鼎湖山针阔叶混交林优势种树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(5): 1159–1166. [HUANG Dewei, ZHANG Deqiang, ZHOU Guoyi, 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 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(5): 1159–1166] DOI: 10.13287/j.1001–9332.2012.0191
- [27] DU S, WANG Y L, KUME T, et al. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, **151**(1): 1–10. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.08.011
- [28] WULLSCHLEGER S D, HANSON P J, TODD D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques [J]. Forest Ecology and Management, 2001, **143**: 205–213. DOI: 10.1016/S0378–1127(00)00518–1
- [29] FORD C R, HUBBARD R M, KLOEPEL B D, et al. A comparison of sap flux-based evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, **145**: 176–185. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.04.010
- [30] 张继. 中国西南喀斯特地区遥感蒸散发变化研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学. 2020: 1–116. [ZHANG Ji. Study on the changes of remote sensing evapotranspiration in karst regions of southwest China [D]. Guiyang: Guizhou Normal University. 2020: 1–116] DOI: 10.27048/d.cnki.ggzsu.2020.000185
- [31] 谭长强, 欧芷阳, 申文辉, 等. 桂西南不同种源木光合和生长特征的研究[J]. 热带亚热带植物学报. 2018, **26**(2): 164–170. [TAN Changqiang, OU Zhiyang, SHEN Wenhui, et al. Photosynthetic and growth characteristics of different *Excentrodendron hsienmu* provenances from karst district of

- southwestern Guangxi, China [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2018, **26**(2):164 – 170] DOI: 10.11926/jtsb.3799
- [32] 欧芷阳, 庞世龙, 谭长强, 等. 干旱胁迫对桂西南石漠化地区主要造林树种光合与耗水特性的影响[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(10): 3237 – 3246. [OU Zhiyang, PANG Shilong, TAN Zhangqiang, et al. Effects of drought stress on photosynthesis and water consumption of main afforestation tree species in the rocky desert area in southwest Guangxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(10): 3237 – 3246] DOI: 10.13292/j.1000 – 4890.202010.016
- [33] 赵广东, 陈健, 史作民, 等. 川西亚高山暗针叶林土壤温度和水文动态及其与气象因子的关系[J]. 山地学报, 2021, **39**(2): 183 – 193. [ZHAO Guangdong, CHEN Jian, SHI Zuomin, et al. Soil temperature and moisture dynamics and their relationship with meteorological factors of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(2): 183 – 193] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000586
- [34] 靳翔, 徐庆, 刘世荣, 等. 川西亚高山岷江冷杉和铁杉年轮对气候因子的响应[J]. 林业科学, 2013, **49**(1): 21 – 26. [JIN Xiang, XU Qing, LIU Shirong, et al. Responses of the tree-ring of *Abies faxoniana* and *Tsuga chinensis* to climate factors in sub-alpine in western Sichuan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, **49**(1): 21 – 26] DOI: 10.11707/j.1001 – 7488.20130104
- [35] 汤懋苍, 程国栋, 林振耀. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998: 147 – 150. [TANG Maocang, CHENG Guodong, LIN Zhenyao. Climate change and its impact on the environment in the Qinghai – Tibet Plateau in modern times [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998: 147 – 150]
- [36] WANG Wenzhi, JIA Min, WANG Genxu, et al. Rapid warming forces contrasting growth trends of subalpine fir (*Abies fabri*) at higher – and lower – elevations in the eastern Tibetan Plateau [J]. Forest Ecology and Management, 2017, **402**: 135 – 144. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.07.043
- [37] 邓勇. 川西亚高山冷杉林树干液流变化与蒸腾量估测研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2006: 1 – 62. (DENG Yong. Study on changes of sap flow density and the evapotranspiration of the fir stands in the upper reaches of Minjiang River, Sichuan province [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2006: 1 – 62.)
- [38] GRANIER A, HUC R, BARIGAH S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, **78**(1 – 2): 19 – 29. DOI: 10.1016/0168 – 1923(95)02252 – X
- [39] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度[J]. 植物生态学报, 2006, **30**(4): 655 – 665. [ZHAO Ping, RAO Xingquan, MA Ling, et al. Sap flow-scaled stand transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia mangium* forest [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, **30**(4): 655 – 665] DOI: 10.17521/cjpe.2006.0086
- [40] 张静, 王力, 韩雪, 等. 不同时间尺度下黄土塬区 19 年生苹果树干液流速率与环境因子的关系[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(13): 2583 – 2592. [ZHANG Jing, WANG Li, HAN Xue, et al. The relationship between sap flow velocity and environmental factors of the 19a apple trees on the Loess Plateau at different time scales [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(13): 2583 – 2592] DOI: 10.3864/j.issn.0578 – 1752.2016.13.014
- [41] DRAGONI D, CAYLOR K K, SCHMID H P. Decoupling structural and environmental determinants of sap velocity [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, **846**: 69 – 75. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.10.010
- [42] 常学向, 赵文智. 荒漠绿洲农田防护树种二白杨湿季节树干液流的变化[J]. 生态学报, 2004, **24**(7): 1436 – 1441. [CHANG Xuexiang, ZHAO Wenzhi. Sap flow of Gansu poplar in farmland shelter forest during the growing season in desert oasis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, **24**(7): 1436 – 1441]
- [43] 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 Zhonghui, KANG Wenxing, TIAN Dalun, et al. Sap flow rate and its relationship with environmental factors of Chinese fir plantation in Huitong, Hunan province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, **45**(7): 127 – 132]
- [44] 桑玉强, 张劲松. 华北山区核桃液流变化特征及对不同时间尺度参考作物蒸散量的响应[J]. 生态学报, 2014, **34**(23): 6828 – 6836. [SANG Yuqiang, ZHANG Jingsong. Characteristics of *Juglans regia* L. sap flow and its response to reference evapotranspiration on different time scales in the rocky mountain of north China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(23): 6828 – 6836] DOI: 10.5846/stxb201302280324
- [45] 蒋文伟, 杨广远, 赵明水, 等. 天目山柳杉树干液流的昼夜及季节变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, **36**(5): 77 – 80. [JIANG Wenwei, YANG Guangyuan, ZHAO Mingshui, et al. Diurnal and seasonal variation of stem sap flow for *Cryptomeria fortunei* in Mount Tianmu [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2012, **36**(5): 77 – 80] DOI: 10.3969/j.jssn.1000 – 2006.2012.05.014
- [46] 刘延惠, 舒德远, 崔迎春, 等. 茂兰喀斯特森林亚优势种短萼海桐树干液流特征及其环境因子响应[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(5): 205 – 211 – 217. [LIU Yanhui, SHU Deyuan, CUI Yingchun, et al. The characteristics of sap flow of *pittosporum brevicalyx* as subdominant tree species in Maolan karst forests and its to environmental factors [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(5): 205 – 211 – 217] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.05.034
- [47] 梅婷婷, 王传宽, 赵平, 等. 木荷树干液流的密度特征[J]. 林业科学, 2010, **46**(1): 40 – 47. [MEI Tingting, WANG Chuankuan, ZHAO Ping, et al. Dynamics of trunk sap flux

- density schima superba [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, **46** (1): 40–47]
- [48] 吴芳, 陈云明, 于占辉. 黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(4): 469–476. [WU Fang, CHEN Yunming, YU Zhanhui. Growing season sap-flow dynamics of *Robinia pseudoacacia* plantation in the semi-arid region of Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, **34**(4): 469–476] DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.04.013
- [49] 丁访军, 王兵, 赵广东. 毛竹树干液流变化及其与气象因子的关系[J]. 林业科学, 2011, **47**(7): 73–81. [DING Fangjun, WANG Bing, ZHAO Guangdong. Sap flow changes of *Phyllostachys edulis* and their relationships with meteorological factors [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, **47**(7): 73–81] DOI: 10.11707/j.1001-7488.20110711
- [50] 孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量[J]. 生态学报, 2010, **30**(24): 6901–6909. [SUN Pengfei, ZHOU Hongfei, LI Yan, et al. Trunks sap flow and water consumption of *Haloxylon ammodendron* growing in the Gurbantunggut Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(24): 6901–6909]
- [51] 王志超, 竹万宽, 杜阿朋. 尾巨桉旱雨两季树干液流特征分析[J]. 浙江农林大学学报, 2017, **34**(2): 319–325. [WANG Zhichao, ZHU Wankuan, DU Apeng. Variation in stem sap flow of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* during rainy and dry seasons [J]. Journal of Zhejiang Agriculture and Forest University, 2017, **34**(2): 319–325] DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2017.02.016
- [52] 王小菲, 孙永玉, 李昆, 等. 干热河谷大叶相思树干液流季节动态及其与气象因子的关系[J]. 林业科学研究, 2013, **26**(2): 145–150. [WANG Xiaofei, SUN Yongyu, LI Kun, et al. Stem sap flow characteristics of *Acacia auriculaeformis* in dry-hot valley and their relations to meteorological factors [J]. Forest Research, 2013, **26**(2): 145–150] DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2013.02.009
- [53] DU T S, KANG S Z, ZHANG B Z, et al. Stem sap flow of grape under different drip irrigation patterns and its relationships with environmental factors in arid oasis region of Shiyang River basin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(2): 299–305.
- [54] CHEN Dianyu, WANG Youke, LIU Shouyang, et al. Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in semiarid northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2014, **136**: 23–33. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.01.001
- [55] MUNITZ S, NETZER Y, SHTEIN I, et al. Water availability dynamics have long-term effects on mature stem structure in *Vitis vinifera* [J]. American Journal of Botany, 2018, **105**(9): 1443–1452. DOI: 10.1002/ajb2.1148
- [56] SPERRY J S, SULLIVAN J E M. Xylem embolism in response to freeze-thaw cycles and water stress in ring-porous, diffuse-porous, and conifer species [J]. Plant Physiology, 1992, **100**(2): 605–613. DOI: 10.1104/pp.100.2.605
- [57] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2005, **25**(9): 2145–2161. [MA Ling, ZHAO Ping, RAO Xingquan, et al. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **25**(9): 2145–2161]
- [58] 于占辉, 陈云明, 杜盛. 黄土高原半干旱区侧柏 (*Platycladus orientalis*) 树干液流动态[J]. 生态学报, 2009, **29**(7): 3970–3976. [YU Zhanhui, CHEN Yunming, DU Sheng. The sapflow dynamics of *Platycladus orientalis* in the semi-arid Loess Plateau region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **29**(7): 3970–3976]
- [59] 熊伟. 六盘山北侧主要造林树种耗水特性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003: 1–6. [XIONG Wei. Studies on water consumption characteristics of main plantation tree species in the north of Liupanshan Mountain [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2003: 1–6]
- [60] 李广德, 富丰珍, 席本野, 等. 基于热扩散技术的三倍体毛白杨单木及林分蒸腾耗水研究[J]. 生态学报, 2016, **36**(10): 2945–2953. [LI Guangde, FU Fengzhen, XI Benye, et al. Study of transpiration and water consumption of triploid *Populus tomentosa* at individual tree and stand scales by using thermal dissipation technology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(10): 2945–2953] DOI: 10.5846/stxb201409171846
- [61] HARRIS A H, PRICE D J. Evaporation from Scots pine (*Pinus sylvestris*) following natural re-colonisation of the Cairngorm mountains, Scotland [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2000, **4**(3): 451–461. DOI: 10.5194/hess-4-451-2000
- [62] 李承彪. 四川森林生态研究[M]. 成都: 四川科技出版社, 1990: 3–48, 211–145. [LI Chengbiao. Study on forest ecology in Sichuan [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1990: 3–48, 211–145]
- [63] 管中天. 四川植物志[M]. 成都: 四川人民出版社, 1983: 37–39. [GUAN Zhongtian. Sichuan flora [M]. Chengdu: Sichuan People's Publishing House, 1983: 37–39]
- [64] 赵小祥, 王根绪, 杨凯, 等. 西南亚高山冬瓜杨和峨眉冷杉吸收根特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25**(5): 1068–1074. [ZHAO Xiaoxiang, WANG Genxu, YANG Kai, et al. Characteristics of absorptive roots of subalpine *Populus purdomii* and *Abies fabri* in southwest China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, **25**(5): 1068–1074] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2019.01015
- [65] DAVIS S D, SPERRY J S, HACKE U G. The relationship between xylem conduit diameter and cavitation caused by freezing [J]. American Journal of Botany, 1999, **86**(10): 1367–1372. DOI: 10.2307/2656919

[66] PITTERMANN J, SPERRY J S. Tracheid diameter is the key trait determining the extent of freezing-induced cavitation in conifers

[J]. Tree Physiology, 2003, 23: 907 – 914. DOI: 10.1093/treephys/23.13.907

## Characteristics of Stem Sap Flow and Influencing Factors of *Abies fabri* in Varied Diameters on Mount Gongga, China

TANG Zishu, WANG Genxu, HU Zhaoyong\*

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Transpiration plays an important role in adjusting water cycle in forest ecosystems. To analyze the changes in plant transpiration and its influencing factors contributes to a comprehensive understanding of the response of vegetation physiological and ecological processes to climate change. Mountainous forest ecosystem in southwest China has rich vegetation types, complex and changeable environmental conditions. It is sensitive to climate and its ecological environment is typically fragile. Past studies of plant transpiration in southwest China mostly addressed the calculation of regional evapotranspiration and the response of photosynthesis to water use, but less attention was paid to the exploration of the patterns of plant transpiration variation and its influencing factors. In this paper, sap flow velocities of three diameter classes, small (20 ~ 40 cm), medium (40 ~ 60 cm) and large (60 ~ 80 cm) of *Abies fabri* were obtained by thermal dissipation probe technique (TDP) from 2017 to 2018. Correlation analysis and stepwise linear analysis were used to quantify how environmental conditions affected stem sap flow velocities. Results conclude that: (1) Diurnal sap flow velocities showed a single peak curve with a higher increasing rate than decreasing rate, and the nocturnal sap flow was active; (2) Daily mean sap flow velocity increased and then decreased, and the overall amplitude of fluctuation was negative to the size of diameter class; (3) Sap flow velocities at both diurnal and daily scales were in the order of medium class > small class > large class; (4) Sap flow velocities were affected by meteorological factors. Specifically, sap flow velocities were significantly positive correlated to vapor pressure deficit, air temperature, wind speed and photosynthetic active radiation ( $p < 0.01$ ), whereas significantly negative correlated to humidity at both half-hour and daily scale ( $p < 0.01$ ). Besides, sap flow velocities were also affected by water availability, the reduction of soil moisture and precipitation enhanced transpiration in dry season, but the excessive moisture constrained transpiration in wet; (5) At daily scale, the small and medium diameter classes of *Abies fabri* were more affected by environmental factors than the large ones, and they were more affected in wet season and dry season, respectively; (6) The numbers of environmental factors in the stepwise regression equations decreased with the increasing of time scale, and meteorological conditions were the dominant factors. This study is helpful to understand water use and cycle response to climate changes in subalpine forest ecosystems in southwest of China.

**Key words:** subalpine forest; transpiration of trees; diameter class; stem sap flow