

DOI: 10.20103/j.stxb.202310082158

黄婉萱, 罗璇, 成仙利, 杨萌萌, 孟泽, 李跃林. 鼎湖山过渡性针阔混交林主要树种树干液流与水分利用特征. 生态学报, 2025, 45(7): 3341-3352.
Huang W X, Luo X, Cheng X L, Yang M M, Meng Z, Li Y L. Sap flow and water use characteristics of dominant tree species in the transitional conifer-broadleaf mixed forest of Dinghushan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3341-3352.

鼎湖山过渡性针阔混交林主要树种树干液流与水分利用特征

黄婉萱^{1,2}, 罗璇^{1,3}, 成仙利^{1,4}, 杨萌萌^{1,2}, 孟泽¹, 李跃林^{1,2,*}

1 中国科学院华南植物园, 广州 510650

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中南林业科技大学, 长沙 410004

4 湖北大学, 武汉 430062

摘要:采用 Granier 热扩散探针法(Thermal Dissipation Probes, TDP),对中国南亚热带地区鼎湖山的过渡性针阔混交林中的主要树种——木荷(*Schima superba*)、马尾松(*Pinus massoniana*)和锥(*Castanopsis chinensis*)的树干液流变化进行了监测,并结合相对湿度、大气温度、光合有效辐射、太阳总辐射、降水量等环境因子进行了综合分析。研究发现,树干液流日变化特征表现为昼高夜低的单峰或双峰曲线,中午时液流密度达到峰值。具体而言,木荷液流密度的最高峰值为 $42.08 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,马尾松为 $39.10 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,锥为 $43.98 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。不同树种的液流密度存在差异,平均液流密度的大小关系为:锥>木荷>马尾松。此外,同一树种的不同个体之间也存在液流密度的差异。不同树种对各环境因子的响应程度不同,但整体而言,太阳辐射对液流速度的影响最大。揭示了鼎湖山过渡性针阔混交林中不同树种的水分利用特征及其与环境因素的关系,为过渡性针阔叶混交林的研究提供了新的见解。

关键词:树干液流;水分利用特征;过渡性针阔混交林

Sap flow and water use characteristics of dominant tree species in the transitional conifer-broadleaf mixed forest of Dinghushan Mountain

HUANG Wanxuan^{1,2}, LUO Xuan^{1,3}, CHENG Xianli^{1,4}, YANG Mengmeng^{1,2}, MENG Ze¹, LI Yuelin^{1,2,*}

1 South China Botanical Garden, Chinese Academic of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

4 Hubei University, Wuhan 430062, China

Abstract: Evergreen broad-leaved forest is a typical vegetation type in subtropical China, with a complex ecosystem structure and important ecological functions and economic value. Coniferous and broad-leaved mixed forests play a significant role in subtropical evergreen broad-leaved forest ecosystems, contributing crucially to water and soil conservation and providing essential economic resources such as timber, medicinal herbs, and edible fungi. Conducting in-depth research on the water use characteristics of different tree species within these mixed forests is essential for enriching and advancing the understanding of subtropical evergreen broad-leaved forests. And vegetation transpiration is a key process in the water cycle of forest ecosystems, reflecting the water use characteristics of vegetation. Therefore, the determination of sap flow rate

基金项目:国家自然科学基金项目(31961143023)

收稿日期:2023-10-08; **网络出版日期:**2025-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuelin@scib.ac.cn

in tree stems is of great significance for the study of hydrological characteristics in a certain area. This study employed the Granier thermal dissipation probe method (Thermal Dissipation Probes, TDP) to monitor the variations in stem sap flow of dominant tree species—*Schima superba*, *Pinus massoniana*, and *Castanopsis chinensis*—within the transitional conifer-broadleaf mixed forest of Dinghushan Mountain in the southern subtropical region of China. The investigation included a comprehensive analysis of environmental factors such as relative humidity, atmospheric temperature, photosynthetically active radiation, total solar radiation, and precipitation. The main scientific questions explored are: 1. Are there any differences in stem sap flow rate, daily variation, and seasonal variation among different dominant tree species? 2. How do these differences vary with altitude? 3. What climatic factors have a critical impact on the sap flow rate of tree stems? Lastly, the results indicated that the diurnal patterns of stem sap flow showed either unimodal or bimodal curves, with higher flow rates during the day and lower rates at night, peaking around noon. Specifically, the peak sap flow density values were $42.08 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for *S. superba*, $39.10 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for *P. massoniana*, and $43.98 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for *C. chinensis*. Significant differences in sap flow density were observed among the different tree species, with the average sap flow density ranking as *C. chinensis* > *S. superba* > *P. massoniana*. Additionally, there were variations in sap flow density among individuals of the same species, and different tree species exhibited varying degrees of responsiveness to different environmental factors. According to result, the sensitivity of different tree species to environmental factors varies and shows a trend of changing with the environment. In plot 1, atmospheric temperature is the primary environmental factor controlling the sap flow rate of *S. superba*, while total solar radiation is the critical factor controlling the sap flow rate of *P. massoniana* and *C. chinensis*. In plot 2 and 3, photosynthetically active radiation became the main environmental factor controlling the sap flow rate of various tree species. In summary, this study revealed the water use characteristics of different tree species in the transitional conifer-broadleaf mixed forest of Dinghushan Mountain and their relationship with environmental factors, providing a deeper understanding of water transport mechanisms in this ecosystem. These findings offer important references for the management and protection of forest ecosystems and lay a beneficial foundation for further research on the relationship between the water cycle and ecological balance in ecosystems. This study also provides new insights into the study of subtropical evergreen broad-leaved forests.

Key Words: sap flow; water use characteristics; transitional conifer-broadleaf mixed forest

乔木在植被蒸腾这一森林生态系统水循环的关键过程中起主要驱动作用^[1-2]。而树干液流速率的测定对于研究植被蒸腾具有重要意义。热扩散探针法是一种精确测量树干液流速率的技术,它提供了树木瞬时蒸腾的信息^[3-4]。然而,树干液流速率不仅受到树种、树干胸径、冠幅、边材水力结构等植被特征的影响^[5-7],还受到环境因素的复杂调控^[8]。其中,太阳辐射和水汽压亏缺被认为是影响树干液流速率的主要环境因素^[9-11]。尽管这些关系已被广泛观察,但环境因素如何具体影响树干液流速率的机制仍不清楚,这是当前树干液流研究中的一个重要未解难题。此外,不同树种及森林演替阶段的群落在树干液流速率上表现出显著差异^[12-16]。现有研究多集中于单一树种或个体的树干液流特征及其影响因素,针对同一研究区内不同树种的树干液流特征差异及成因的系统研究相对有限。

常绿阔叶林是中国亚热带地区的典型植被类型,其生态系统结构复杂,具有重要的生态功能和经济价值^[17-20]。针阔叶混交林在这一生态系统中占据重要地位,对水源涵养、土壤保持等方面有着关键作用^[18]。因此,研究针阔叶混交林中不同树种的水分利用特征,有助于深入了解亚热带常绿阔叶林的生态水文特征,并为其科学保护与管理提供依据。

鼎湖山自然保护区包含了从针叶林向季风常绿阔叶林演替的不同阶段^[21]。作为研究森林生态系统的理想场所,鼎湖山的过渡性针阔叶混交林中各树种的树干液流特征尚缺乏系统研究。本研究针对这一空白,提出以下科学问题:①不同优势树种之间树干液流速率、日变化和季节变化是否存在差异?②这些差异如何随

海拔变化? ③哪些气候因素对树干液流速率起关键影响? 为解答这些问题,我们监测了鼎湖山过渡性针阔叶混交林中不同树种的树干液流和环境因子,旨在揭示其水分利用特征和生态响应机制,为树干液流领域研究提供新的见解。

1 研究区概况

研究区位于广东省中西部的鼎湖山国家级自然保护区内,即中国科学院鼎湖山森林生态系统定位研究站(以下简称鼎湖山站)的针阔混交林样地。地理坐标为 112°30'39"—112°33'41" E, 23°09'21"—23°11'30" N, 总面积为 1133 hm²。该地区属于典型的南亚热带季风湿润气候,年均温为 20.9 °C,最冷月(1 月)和最热月(7 月)的气温分别为 12.0 °C 和 28.0 °C,年均降雨量为 1900 mm,降水主要集中在 4—9 月,年均相对湿度为 80.8%,年均蒸发量为 1115 mm,干湿季分明^[22—24]。

本研究在海拔 50 m 和海拔 330 m 的针阔混交林中设置三个研究样地,海拔 50 m 处设一个样地(以下简称一号样地),海拔 330 m 处设两个样地(以下简称为二号样地、三号样地)。这些样地位于地带性植被季风常绿阔叶林的边缘,代表了演替系列中间阶段的典型森林类型^[21],其中包括马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schima superba*)和锥(*Castanopsis chinensis*)等代表性树种^[25—26]。

2 研究方法

2.1 植被调查及样树选择

在上述三个森林样地中,选择了坡度和坡向相近的区域用于树干液流的监测。每个样地被划分成若干个 10 m×10 m 的样方以进行植被调查,获取样地基本情况(表 1)。调查结束后,选取生长状况良好、树干通直且未受病虫害影响的个体作为样本树进行长期树干液流监测。其中,一号样地选择了 14 棵,二号样地选择了 9 棵,三号样地选择了 10 棵。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic characteristics of the plots

样地编号 Plot number	样地面积 The area of the sample plot/m ²	海拔 Elevation /m	马尾松密度 Density of <i>P.massoniana</i> / (株/hm ²)	木荷密度 Density of <i>S. superba</i> / (株/hm ²)	锥密度 Density of <i>C. chinensis</i> / (株/hm ²)
一号样地 Plot 1	1200	50	75	1092	58
二号样地 Plot 2	600	330	133	117	33
三号样地 Plot 3	800	330	117	166	233

样树的具体基本特征详见表 2。其中,二号样地木荷的平均胸径>三号样地>一号样地,三号样地的马尾松平均胸径>二号样地>一号样地,二号样地锥的平均胸径>三号样地>一号样地。

2.2 环境因子的监测

在海拔 50 m 和 330 m 样地内的开阔区域,各安装一台小型气象站,安装高度约距地面 10 m,用于监测相对湿度(*RH*)、温度(*T*)、光合有效辐射(*PAR*)和太阳总辐射等气象数据。所有传感器连接到数据采集器(*CR1000*, Campbell Scientific, Utah, USA),每 30 min 记录一次平均值。水汽压亏缺(*VPD*, Vapor pressure deficit)作为反映相对湿度和气温共同作用的指标,计算公式如下^[27]:

$$e_s(T) = a \times e \left[\frac{bT}{T+c} \right]$$

$$VPD = e_s(T) - e_a = e_s(T) \times (1 - RH)$$

式中, $e_s(T)$ 代表 T 温度下的饱和水汽压(kPa), a 、 b 、 c 为参数,取值分别为:0.611 kPa、17.502、240.97 °C, T 为温度(°C), e_a 为实际水汽压(kPa), RH 为相对湿度, VPD 为水汽压亏缺(kPa)。

2.3 树干液流的监测与计算

从 2022 年 9 月到 2023 年 2 月,用长度为 20 mm 的 Granier 热扩散探针对样树进行了连续的树干液流监

测。为避免太阳直射造成测量误差,探针安装在树干北面,胸径(距地面高 1.3 m)处。上下探针电势差的数据每 10 s 读取一次,每 30 min 取平均值并自动记录在数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, Utah, USA)中。根据 Granier 经验公式,使用记录的电势差数据计算液流密度^[28-29]:

$$J_s = 119 \times \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231}$$

式中, J_s 为瞬时液流密度($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ΔT_m ($^{\circ}\text{C}$)为上下探针之间的最大昼夜温差, ΔT ($^{\circ}\text{C}$)为瞬时温差。

表 2 样树的基本特征

Table 2 Basic characteristics of the sampling trees

树种 Species	编号 Number	一号样地 Plot 1			二号样地 Plot 2			三号样地 Plot 3		
		胸径 DBH/cm	树高 Height/m	冠幅 Crown /(m×m)	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	冠幅 Crown /(m×m)	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	冠幅 Crown /(m×m)
马尾松 Pm	Pm1	19.67	13	4×3	26.75	17	7×5	29.95	16	6×4
<i>P.massoniana</i>	Pm2	31.45	17	6×4	26.80	18	7×5	35.82	12	4×3
	Pm3	31.99	14	7×5	43.10	23	8×6			
木荷 Ss	Ss1	16.70	10	3×2	23.20	10	3×2	18.50	13	3×3
<i>S. superba</i>	Ss2	38.56	18	10×8	36.35	18	6×4	15.52	12	4×3
	Ss3	11.59	7	2×2				16.52	13	4×3
	Ss4	15.44	11	3×2				31.12	11	4×3
	Ss5	14.80	10	4×3						
	Ss6	20.43	8	3×3						
	Ss7	18.37	9	4×3						
	Ss8	11.49	8	2×2						
	Ss9	14.01	11	3×3						
锥 Ch	Ch1	23.49	12	6×5				33.75	17	4×6
<i>C. chinensis</i>	Ch2	18.21	9	6×5	24.90	15	6×4	17.60	9	3×2
	Ch3				13.25	8	2×2	20.38	11	5×3
	Ch4				36.20	16	8×6	34.10	16	7×6
	Ch5				50.90	23	9×7			

2.4 数据的采集与处理

使用 Baseline 4.22 软件对树干液流的原始数据进行校正与质量控制^[30],使用 Excel 2013 对气象数据进行初步计算与处理,使用 R 4.2.3 软件和 SPSS 24.0 软件进行统计分析,分析各树种液流速率和环境因子的日变化与月变化,并进行偏相关分析与绘图。

3 结果与分析

3.1 环境因子的时空变化

根据气象数据分析,观测期间(2022 年 9 月至 2023 年 2 月)样地的环境因子显示出明显的季节性变化(图 1—2)。在整个观测期内,一号样地的总降水量为 225.1 mm,平均气温为 19.29 $^{\circ}\text{C}$,平均相对湿度为 74.02%,平均太阳总辐射为 10.28 W/m^2 ,平均水汽压亏缺为 0.64 kPa(图 1)。二、三样地的总降水量为 484.62 mm,平均气温为 17.48 $^{\circ}\text{C}$,平均相对湿度为 76.63%,平均光合有效辐射为 222.63 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,平均水汽压亏缺为 0.52 kPa(图 2)。总体来看,三个样地的环境因子变化趋势相似,表现为 9—11 月的温度、水汽压亏缺和太阳辐射均值高于 12 月—次年 2 月,而相对湿度则表现出一定的周期性变化。这种季节性趋势表明,秋季温暖干燥,冬季凉爽湿润,这将直接影响植物的蒸腾作用和水分利用效率。

在单日时间尺度上,从图 3 和图 4 可见,各样地的温度、水汽压亏缺和太阳辐射每天从早上 5:00 开始逐渐上升,整体呈现出单峰型变化趋势。在正午 12:00—13:00,太阳辐射达到峰值,随后水汽压亏缺和温度在

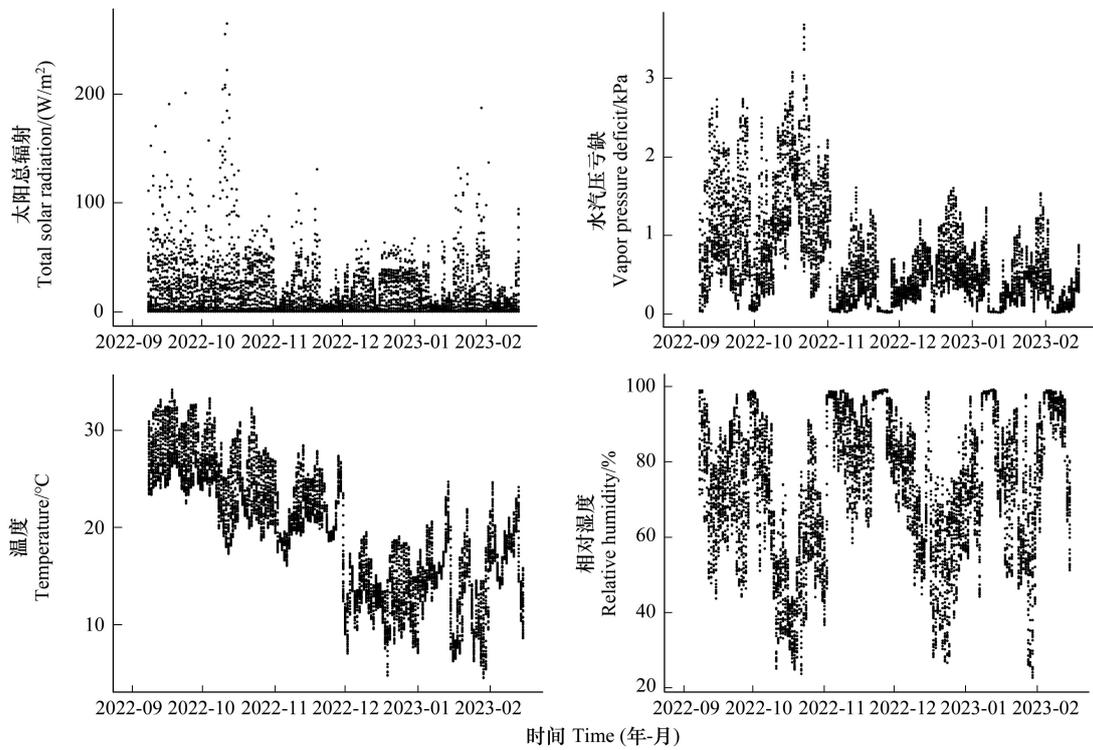


图 1 观测期间 50 m 样地环境因子变化(2022 年 9 月至 2023 年 2 月)

Fig.1 Changes in environmental factors of 50 m plot during observation period (September 2022-February 2023)

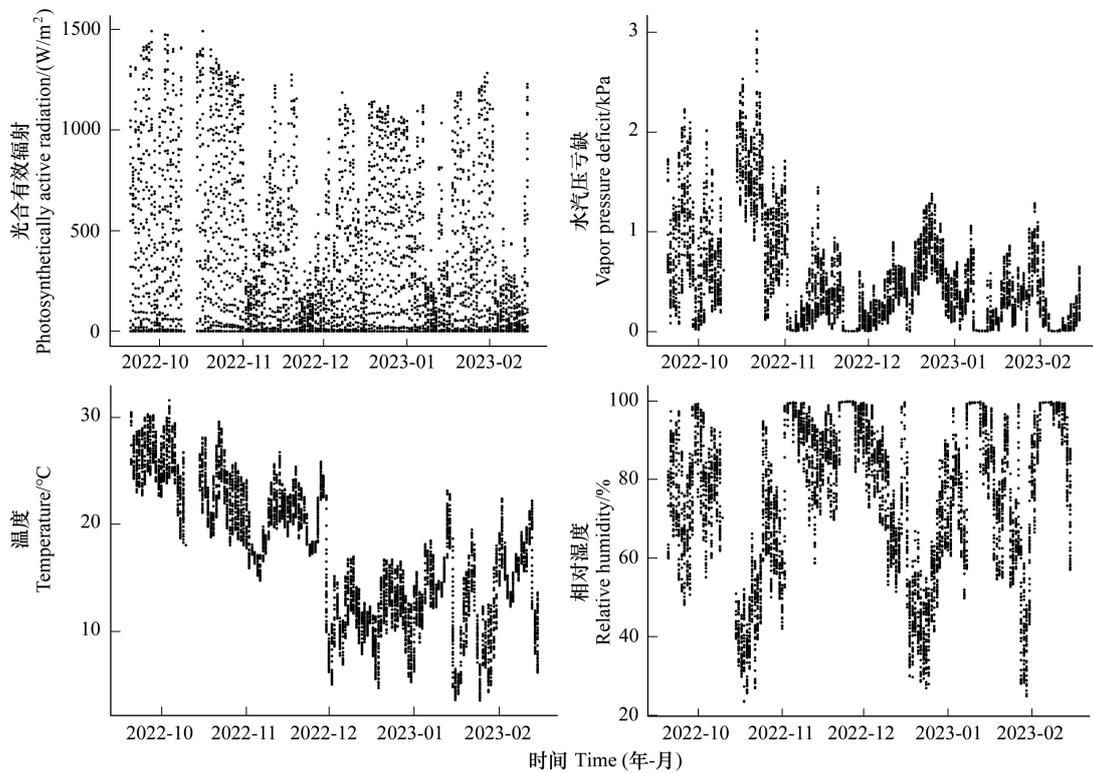


图 2 观测期间 330 m 样地环境因子变化(2022 年 9 月至 2023 年 2 月)

Fig.2 Changes in environmental factors of 330 m plot during observation period (September 2022-February 2023)

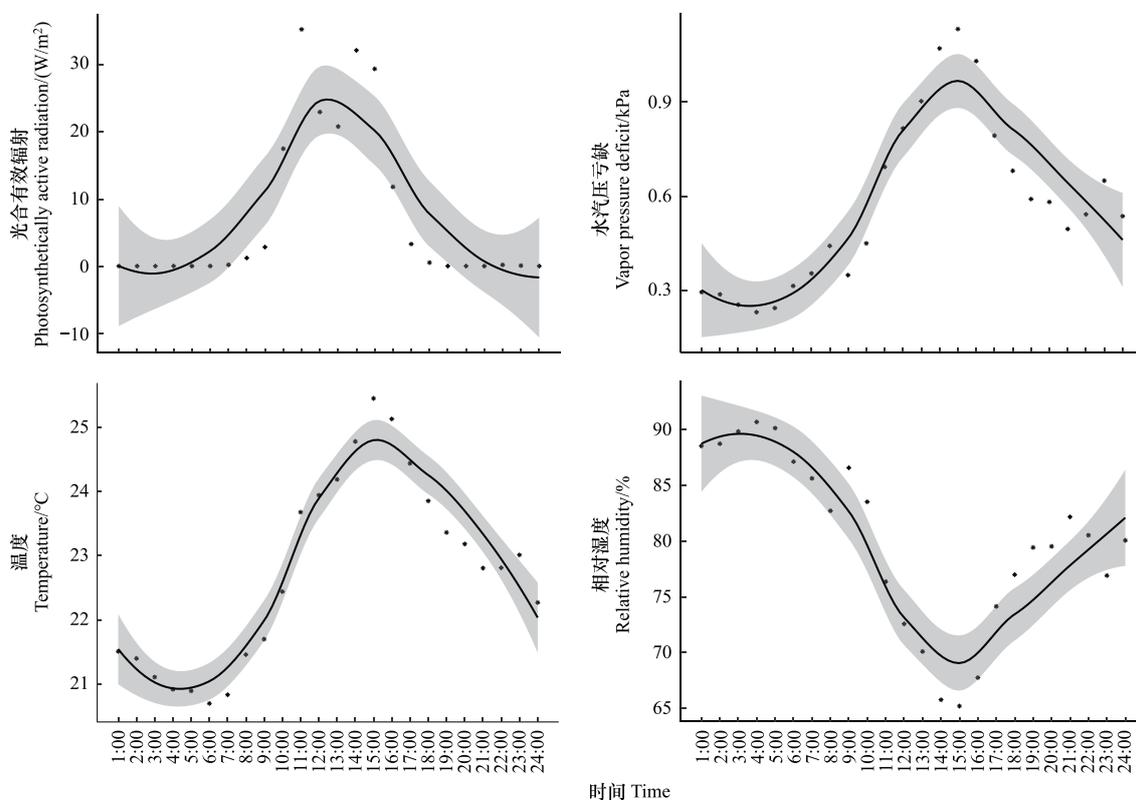


图 3 观测期间 50 m 样地环境因子日变化

Fig.3 Daily variation of environmental factors in the 50 m plot during the observation period

图中灰色区域代表 95% 置信区间

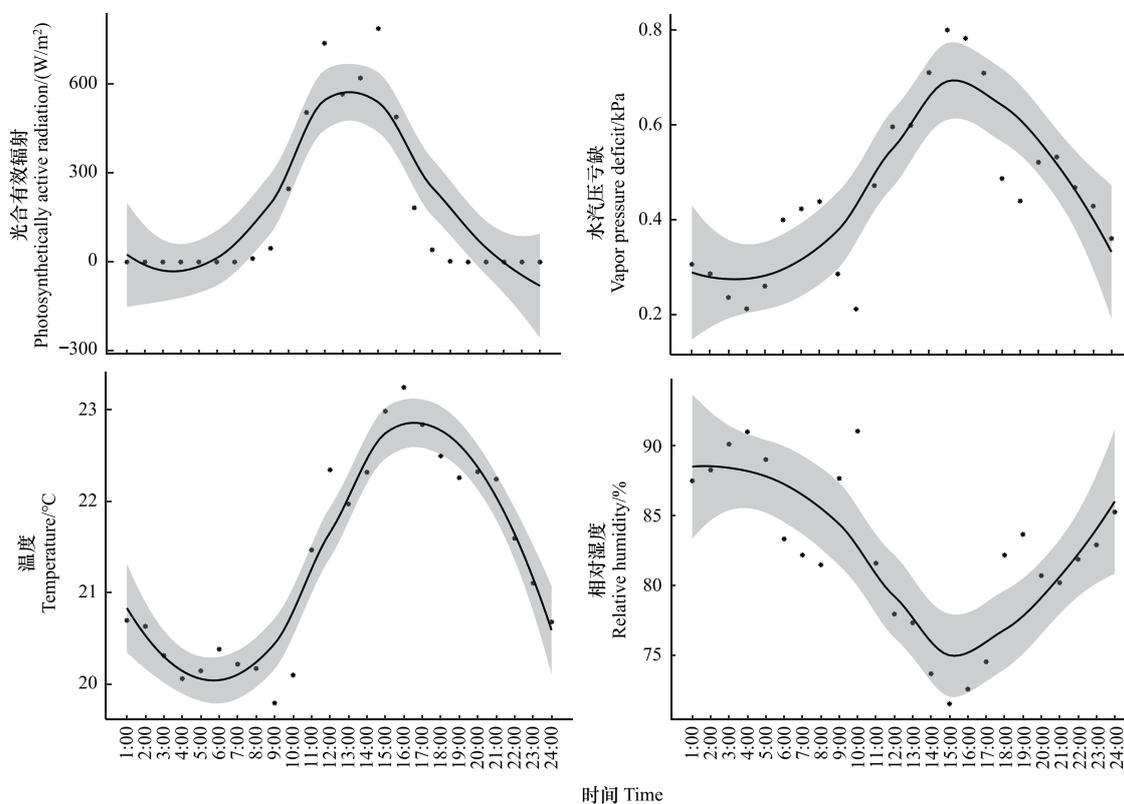


图 4 观测期间样地环境因子日变化

Fig.4 Daily variation of environmental factors in the 330 m plot during the observation period

图中灰色区域代表 95% 置信区间

下午 15:00 左右达到峰值。而相对湿度的变化趋势与上述环境因子呈现明显的反向关系,即湿度在早晚较高,中午较低。这种日变化模式说明样地内的环境因子受日照影响显著,且湿度与温度、水汽压亏缺和太阳辐射呈反向变化趋势,这种反向变化可能是由于植物蒸腾作用的日变化规律所致。

3.2 样树水分利用特征

分析 11 月 11 日至 11 月 15 日的树干液流数据(图 5—图 7),发现各树种的树干液流速率日变化呈现出“昼高夜低”的单峰或双峰曲线。这种变化趋势显示了各树种在白天和夜间对水分需求的显著差异。

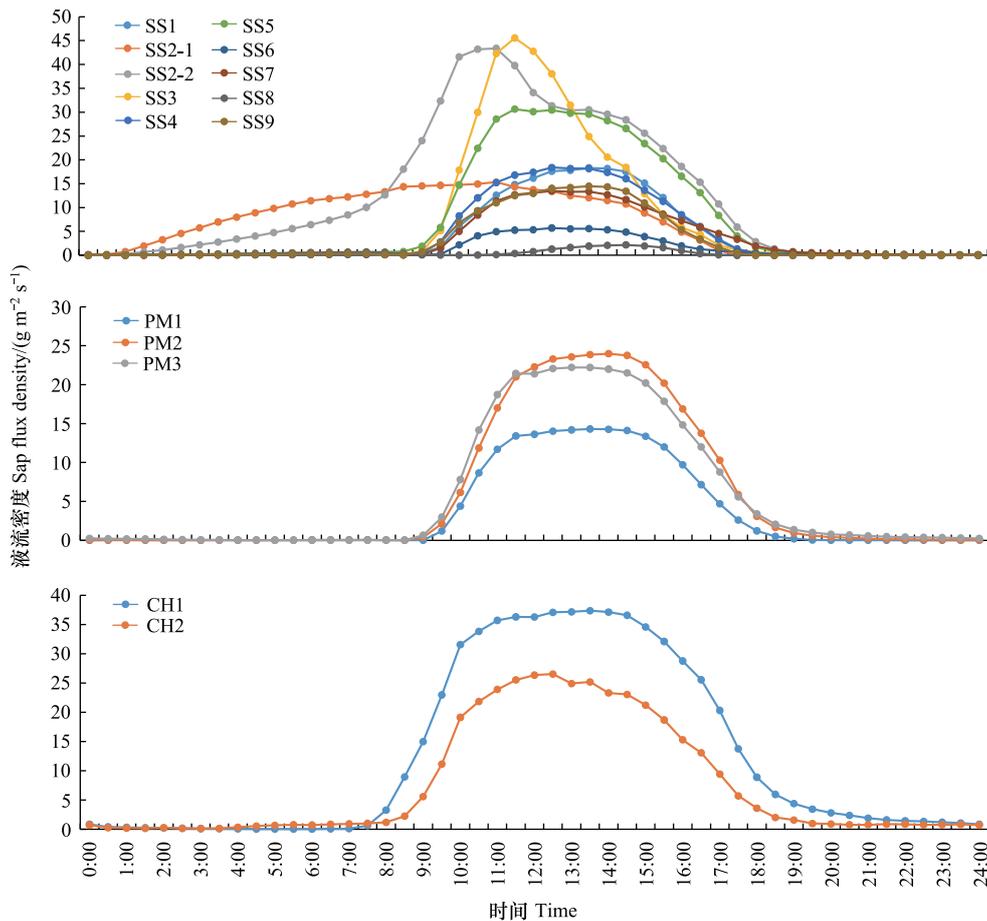


图 5 一号样地树干液流密度日变化

Fig.5 Daily Variation in sap flow density of plot 1

PM: 马尾松; SS: 木荷; CH: 锥

在一号样地,锥树的液流速率最早在早晨 7:30 开始上升,木荷和马尾松的液流速率分别在 8:30 和 9:00 左右上升,液流速率峰值分别在 13:00 和 15:00 出现。液流速率下降至最低点的时间也有所不同,锥在 21:30,木荷和马尾松相对较早。这表明锥在白天的液流持续时间更长,可能具有更高的水分运输能力和耐干旱性。在二号样地,锥同样是最先出现液流速率上升的,在早晨 7:30 左右,其次是木荷,最后是马尾松。中午 13:30 左右木荷和锥的液流速率达到峰值,马尾松稍晚。一日内锥监测到液流速率的时间最长,其次是马尾松,木荷最短。在三号样地,木荷、马尾松和锥出现液流速率上升的先后顺序与一、二号样地相同,马尾松液流出现峰值的时间略晚于木荷和锥。一日内锥可监测到液流速率的时间最长。与一、二号样地不同的是,在三号样地中,木荷可监测到液流速率的时间略长于马尾松。总体表现规律为,锥一天内可监测到的液流速率时间最长,木荷与马尾松的时间大致相近。单日尺度内,马尾松出现液流速率峰值时间略晚于木荷和锥。

在月尺度上,各树种的液流密度的平均值和最大值如表 3 所示,显示出不同树种和样地之间的显著差异。

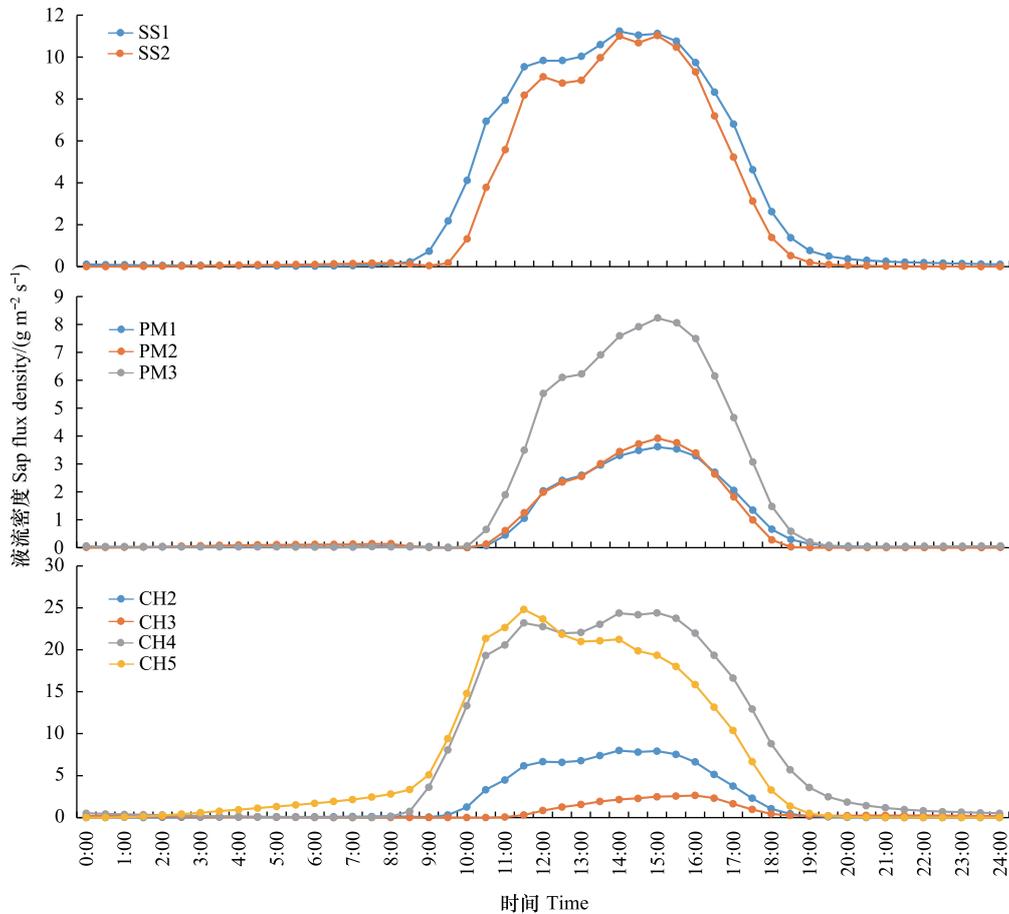


图6 二号样地树干液流密度日变化

Fig.6 Daily Variation in sap flow density of plot 2

总体上,锥的平均液流密度在所有样地中均高于木荷和马尾松,这种趋势表明锥的水分利用效率可能更高。在一号样地,锥的平均液流密度为 $8.40 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,木荷为 $5.39 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,马尾松为 $5.33 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。在二号样地,锥、木荷、马尾松的平均液流密度分别为 $4.03 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $3.55 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.10 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。而在三号样地,锥的平均液流密度为 $6.16 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,木荷为 $4.50 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,马尾松为 $2.82 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。对比各样地同一树种之间的液流密度,结果显示,一号样地的液流密度整体高于二、三号样地,即低海拔地区液流整体更高。

表3 观测期间各树种液流密度平均值与最大值

Table 3 Average and maximum sap flow density values for various tree species during the observation period

树种 Species	一号样地 Plot 1		二号样地 Plot 2		三号样地 Plot 3	
	平均值 Mean/ ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	最大值 Max/ ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	平均值 Mean/ ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	最大值 Max/ ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	平均值 Mean/ ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	最大值 Max/ ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
木荷 Ss <i>S.superba</i>	5.39	42.08	3.55	33.71	4.50	34.76
马尾松 Pm <i>P.massoniana</i>	5.33	39.10	1.10	11.64	2.82	16.63
锥 Ch <i>C.chinensis</i>	8.40	43.98	4.03	26.92	6.16	34.48

3.3 影响树干液流变化的因素分析

树干液流主要通过树木的木质部运输。通过分析各树种的平均胸径与液流速率的皮尔逊相关性,可以看出树木的液流速率与胸径之间几乎不存在显著相关性($P>0.05$)。进一步的偏相关分析(表4)显示^[26]。环境因子如大气温度、相对湿度、水汽压亏缺和光照等与树种的液流速率均存在显著相关性。根据分析结果,一号

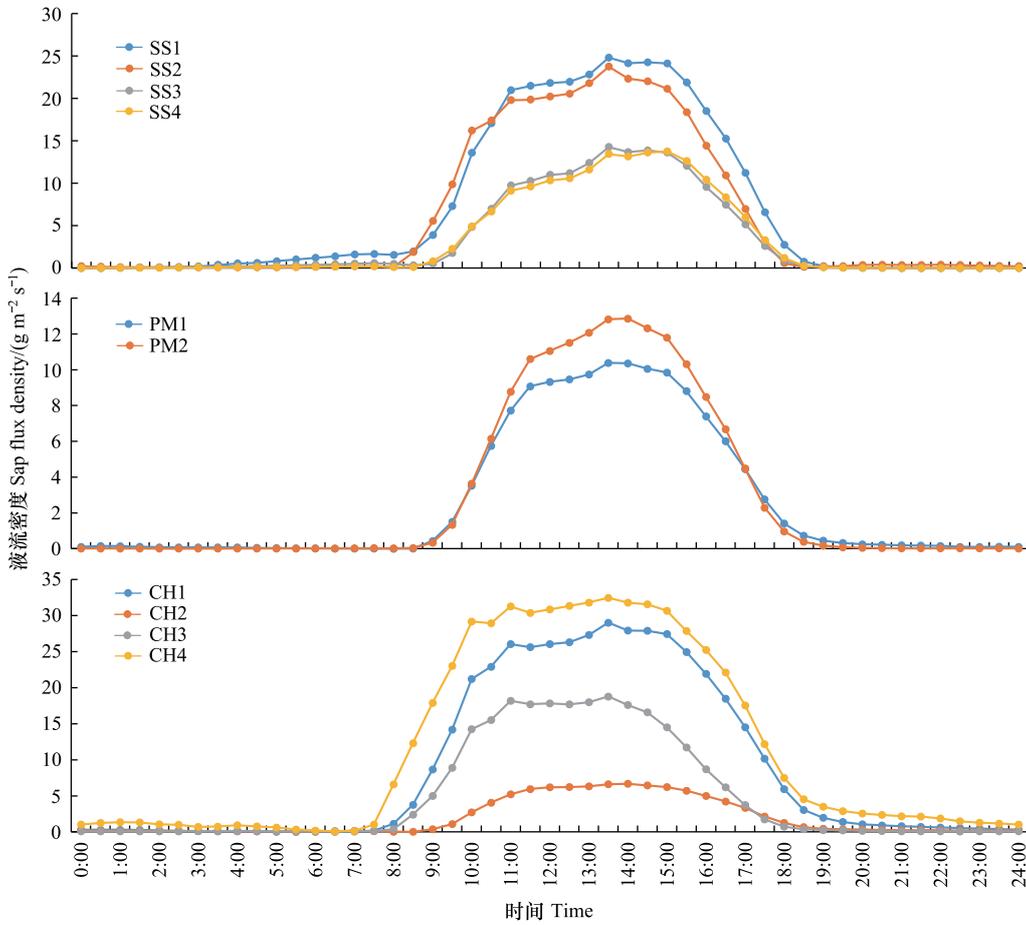


图7 三号样地树干液流密度日变化

Fig.7 Daily Variation in sap flow density of plot 3

样地中,大气温度是控制木荷液流速率的首要环境因子,而太阳总辐射则是控制马尾松和锥的树干液流速率的关键因素。在二、三号样地中,光合有效辐射成为控制各树种液流速率的主要环境因子。这表明不同样地和树种对环境因子的敏感性有所不同,并表现出随环境变化的趋势性。

各样地中不同环境因子对各树种树干液流速率的影响程度详见表 5。从树种角度分析,木荷的液流速率受环境因子影响的顺序在不同样地表现出显著差异:在一号样地,大气温度是主要控制因素;而在二、三号样地,大气温度对木荷液流速率的影响最小。对于马尾松,其液流速率在三个样地中对环境因子的敏感性顺序各不相同,但光照始终是首要影响因素。在一号样地,马尾松液流速率受大气温度的影响仅次于太阳总辐射,而在二、三号样地,大气温度的影响则最小。锥的液流速率在一号样地与二、三号样地受环境因子的影响顺序大致相似,主要受光照影响,但大气温度对其液流速率的影响在一号样地大于在二、三号样地。总体来看,太阳辐射对树干液流速率的影响最大,低海拔样地的树种液流速率整体上更易受到大气温度的影响,而高海拔样地对大气温度的敏感性较低。

4 讨论

本研究旨在深入探究鼎湖山过渡性针阔混交林中不同树种的水分利用特征及其影响因素。通过与前期研究的对比分析,进一步揭示了该森林生态系统中水分利用的复杂性与差异性。以下讨论涵盖了液流密度变化的模式、不同树种的响应差异以及环境因素的影响。

表 4 树干液流速率与环境因子的偏相关分析

Table 4 Partial correlation analysis between sap flow rate and environmental factors

一号样地偏相关系数 Partial correlation coefficient of plot 1				
控制变量 Control variable	分析变量 Analysis variable	木荷 <i>S. superba</i>	马尾松 <i>P. massoniana</i>	锥 <i>C. chinensis</i>
<i>RH, T</i>	SUN/PAR	-0.544 **	-0.612 **	-0.526 **
<i>RH, SUN</i>	<i>T</i>	0.649 **	-0.380 **	-0.099 **
<i>T, SUN</i>	<i>RH</i>	-0.217 **	0.171 **	-0.199 **
SUN	VPD	0.420 **	-0.326 **	0.085 **
二号样地偏相关系数 Partial correlation coefficient of plot 2				
控制变量 Control variable	分析变量 Analysis variable	木荷 <i>S. superba</i>	马尾松 <i>P. massoniana</i>	锥 <i>C. chinensis</i>
<i>RH, T</i>	PAR	0.848 **	0.746 **	0.849 **
<i>RH, PAR</i>	<i>T</i>	0.163 **	0.176 **	0.173 **
<i>T, PAR</i>	<i>RH</i>	-0.282 **	-0.289 **	-0.333 **
PAR	VPD	0.327 **	0.334 **	0.298 **
三号样地偏相关系数 Partial correlation coefficient of plot 3				
控制变量 Control variable	分析变量 Analysis variable	木荷 <i>S. superba</i>	马尾松 <i>P. massoniana</i>	锥 <i>C. chinensis</i>
<i>RH, T</i>	PAR	0.866 **	0.856 **	0.848 **
<i>RH, PAR</i>	<i>T</i>	0.262 **	0.238 **	0.170 **
<i>T, PAR</i>	<i>RH</i>	-0.327 **	-0.398 **	-0.280 **
PAR	VPD	0.390 **	0.394 **	0.233 **

RH: 相对湿度 Relative humidity; *T*: 温度 Temperature; SUN: 太阳总辐射 Total solar radiation; PAR: 光有效辐射 Photosynthetically active radiation; VPD: 水汽压亏缺 Vapor pressure deficit; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$

表 5 环境因子影响程度对比

Table 5 Comparison of the impact degree of environmental factors

树种 Spices	一号样地 Plot 1	二号样地 Plot 2	三号样地 Plot 3
木荷 Pm <i>P. massoniana</i>	$T > SUN > VPD > RH$	$PAR > VPD > RH > T$	$PAR > VPD > RH > T$
马尾松 Ss <i>S. superba</i>	$SUN > T > VPD > RH$	$PAR > VPD > RH > T$	$PAR > RH > VPD > T$
锥 Ch <i>C. chinensis</i>	$SUN > RH > T > VPD$	$PAR > RH > VPD > T$	$PAR > RH > VPD > T$

4.1 液流密度变化的模式与对比分析

本研究结果显示,不同树种的单日树干液流密度表现为“昼高夜低”的单峰或双峰曲线。在前期的研究中,鼎湖山植物的单日液流密度通常呈现为“昼高夜低”的单峰曲线^[14]。而在其他地区的研究中,植物单日树干液流密度可能呈现“昼高夜低”的双峰或多峰曲线^[31-33]。树干液流的变化呈现双峰曲线的原因是中午温度最高时植物气孔暂时关闭,液流速率降低;而若单日温度最高时气孔未关闭,液流速率的日变化则呈单峰曲线。这种多样化的模式揭示了不同树种在应对温度和光照变化时所表现出的独特生理响应机制。

4.2 不同树种的液流密度响应差异

本研究的另一个关键发现是,不同树种的液流密度存在显著的差异。本研究中不同树种平均树干液流密度的大小排序为锥>木荷>马尾松,这种差异可能与不同树种的木质部结构有关^[34-35]。与王晓娟等人^[36]的研究结果不同是,本研究并未发现树干胸径大小与液流速率之间存在显著相关性。同时,同一树种的不同个体之间也存在差异,这可能与树木的树型特征有关^[37]。这些差异性的结果强调了树种特性在水分利用中的重要作用,为今后的森林管理和保护提供了有价值的参考。

4.3 环境因素对液流密度的影响

本研究发现,不同环境因素对各树种树干液流速率的影响程度存在差异。已有的研究显示,虽然结果各不相同,但大多数研究表明,太阳辐射是影响液流密度的主要环境因子^[38-39]。黄德卫等^[26]认为,树干液流密度在湿季主要受光合有效辐射影响,而在干季则主要受气温影响。武鹏飞等的研究表明,人工杨树林的树干液流在日间与气温相关性较大,夜间则与 VPD(气孔导度)更相关。傅贺菁等^[40]的研究则认为,在不同地区,不同树种的液流速率受环境因子的影响各不相同。本研究结果显示,太阳辐射是影响树干液流密度的关键环境因子。一号样地的液流密度整体高于二、三号样地,这可能与一号样地的平均水汽压亏缺较高有关^[41]。这表明水分在不同树种中的运输过程可能受到水汽压亏缺的显著调节。此外,整体而言,大气温度对一号样地的样树液流速率的影响大于二、三号样地,这可能与样地的海拔高度不同有一定关系。

5 结论

了解不同树种的水分利用特征对于生态系统的保护和管理具有重要意义。本研究聚焦于鼎湖山过渡性针阔混交林中木荷、马尾松和锥三种树种的水分利用特征及其影响因素。根据研究结果,得出以下结论:1)在鼎湖山过渡性针阔混交林中,不同树种的树干液流日变化模式存在多样性,主要表现为“昼高夜低”的单峰或双峰曲线。这表明,不同树种对温度和光照变化具有不同的生理响应策略。木荷的液流速率在一号样地受大气温度的影响较大,而在二、三号样地则受到较小影响。马尾松在所有样地中,液流速率均受光照影响最大,这表明其对光环境的响应较为敏感。2)不同树种的液流密度存在显著差异,研究结果显示锥的平均树干液流密度最高,其次是木荷,马尾松最低。这种差异可能与不同树种的木质部结构以及水力特性有关。同时,即使是同一树种的不同个体之间,液流密度也存在明显差异,这可能反映了树木个体特征(如树型和树龄)在水分利用过程中的重要性。3)环境因素对不同树种的液流密度影响程度不同。研究发现,太阳辐射是影响树干液流密度的关键环境因子,尤其在一号样地,液流密度整体高于二、三号样地,这可能与该样地的较高水汽压亏缺有关。此外,大气温度对一号样地的样树液流速率的影响作用显著大于二、三号样地,可能与样地的海拔高度差异相关。这些发现强调了环境条件,特别是光照和水汽压亏缺,在不同树种水分利用过程中的重要性。

综上所述,本研究通过对鼎湖山过渡性针阔混交林中不同树种的水分利用特征及其影响因素的综合分析,深化了对该生态系统中水分运输机制的理解。这些结果不仅为森林生态系统的管理和保护提供了重要参考,还为进一步研究生态系统的水分循环与生态平衡关系提供了有力的基础。未来研究可以增加样本数量,进一步探讨不同环境因素对树干液流速率的具体影响机制,及其在不同森林演替阶段中的表现,这将有助于更好地理解生态系统的复杂水分利用过程,为生态系统管理和保护提供更精确的理论支持。

参考文献(References):

- [1] Köstner B, Falge E M, Alsheimer M, Geyer R, Tenhunen J D. Estimating tree canopy water use via xylem sapflow in an old Norway spruce forest and a comparison with simulation-based canopy transpiration estimates. *Annales Des Sciences Forestières*, 1998, 55(1/2): 125-139.
- [2] Asbjornsen H, Tomer M D, Gomez-Cardenas M, Brudvig L A, Greenan C M, Schilling K. Tree and stand transpiration in a Midwestern bur oak savanna after elm encroachment and restoration thinning. *Forest Ecology and Management*, 2007, 247(1/2/3): 209-219.
- [3] Cohen Y, Fuchs M, Green G C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell & Environment*, 1981, 4(5): 391-397.
- [4] 郭锦荣, 白天军, 邓文平, 陈琦. 不同胸径日本柳杉树干液流及其蒸腾耗水差异. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2019, 39(2): 70-77.
- [5] 杨丽琳, 邢万秋, 王卫光, 曹明珠. 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. *植物生态学报*, 2023, 47(4): 571-583.
- [6] 武鹏飞, 刘云强, 李冬梅, 陈志军, 马长明. 环境因子对沙地人工杨树林树干液流的驱动影响. *中国农业气象*, 2021, 42(5): 402-411.
- [7] Komatsu H, Shinohara Y, Kume T, Tsuruta K, Otsuki K. Does measuring azimuthal variations in sap flux lead to more reliable stand transpiration estimates? *Hydrological Processes*, 2016, 30(13): 2129-2137.
- [8] Deng Y, Wu S, Ke J, Zhu A J. Effects of meteorological factors and groundwater depths on plant sap flow velocities in karst critical zone. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146764.
- [9] 卢志朋, 魏亚伟, 李志远, 郭鑫炜, 周永斌. 辽西北沙地樟子松树干液流的变化特征及其影响因素. *生态学杂志*, 2017, 36(11):

- 3182-3189.
- [10] 韩新生, 许浩, 刘广全, 安钰, 王月玲, 董立国, 郭永忠, 万海霞. 不同时间尺度山杏树干液流密度对环境因子的响应. 西北林学院学报, 2023, 38(3): 31-39.
- [11] 许天云, 黄健强, 曾小平, 张宜辉, 孟泽, Otieno D, 李跃林. 鼎湖山森林演替初期优势种马尾松的树干液流特征. 应用与环境生物学报, 2022, 28(5): 1167-1174.
- [12] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. Granier 树干液流测定系统在马占相思的水分利用研究中的应用. 热带亚热带植物学报, 2005, 13(6): 457-468.
- [13] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(1/2): 19-29.
- [14] 王立景, 邓永红, 曾小平, 刘世忠, 孟泽, 李跃林. 我国南亚热带森林群落先锋树种马尾松的水分利用特征. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(3): 82-90.
- [15] 王铁浩, 张佳怡, 王彦辉. 重庆铁山坪马尾松树干液流变化规律及其个体差异. 中国水土保持科学, 2023, 21(3): 1-8.
- [16] 刘明国, 唐敬超, 王玉涛, 丁士富. 辽西地区油松树干液流变化规律及影响因子研究. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(2): 175-179.
- [17] 宋永昌. 中国常绿阔叶林分类试行方案. 植物生态学报, 2004, 28(4): 435-448.
- [18] 林路香, 何明华, 徐学英, 邓婉璐, 邓焕然, 张彩英. 广东孔江国家湿地公园 1 hm² 针阔叶混交林样地群落组成与结构研究. 林业与环境科学, 2020, 36(1): 9-20.
- [19] Xin R L I, Pabnov B H. A study on composition structure and species diversity in ecotone of coniferous and broad-leaved forest in Russia plain. *Biodiversity Science*, 1999, 7(4): 291-296.
- [20] 周宁. 论针阔混交林的优势. 科技创新与应用, 2013(7): 257.
- [21] 彭少麟, 王伯荪. 鼎湖山森林群落演替之研究(英文). 热带亚热带植物学报, 1993, 1(2): 34-42.
- [22] 邓永红, 王立景, 黄健强, 孟泽, 刘世忠, Otieno D, 李跃林. 鼎湖山天然针阔叶混交林优势树种对大气 SO₂ 的气孔吸收特征. 生态与农村环境学报, 2020, 36(3): 382-389.
- [23] 高德强. 鼎湖山典型森林水文过程氢氧稳定同位素特征研究. 中国林业科学研究院, 2017.
- [24] 程静, 欧阳旭, 黄德卫, 刘世忠, 张德强, 李跃林. 鼎湖山针阔叶混交林 4 种优势树种树干液流特征. 生态学报, 2015, 35(12): 4097-4104.
- [25] 黄健强, 邓永红, 曾小平, 孟泽, 张倩媚, 李跃林. 南亚热带针阔叶混交林生态系统水分利用效率. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2538-2545.
- [26] 黄德卫, 张德强, 周国逸, 刘世忠, Otieno D, 李跃林. 鼎湖山针阔叶混交林优势树种树干液流特征及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1159-1166.
- [27] Campbell, G S., Norman, J M. An introduction to environmental biophysics. *Photosynthetica*, 1999, 36(1/2): 30.
- [28] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [29] Čermák J, Deml M, Penka M. A new method of sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum*, 1973, 15(3): 171-178.
- [30] Oishi A C, Hawthorne D A, Oren R. Baseline: an open-source, interactive tool for processing sap flux data from thermal dissipation probes. *SoftwareX*, 2016, 5: 139-143.
- [31] 林平, 李吉跃, 马达. 北京山区油松林蒸腾耗水特性研究. 北京林业大学学报, 2006, S1: 47-50.
- [32] Čermák J, Kučera J, Bauerle W L, Phillips N, Hinckley T M. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 2007, 27(2): 181-198.
- [33] 朱丽薇, 赵平, 蔡锡安, 曾小平, 邹绿柳, 王权. 荷木人工林蒸腾与冠层气孔导度特征及对环境因子的响应. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(6): 599-606.
- [34] Battipaglia G, De Micco V, Brand W A, Linke P, Aronne G, Saurer M, Cherubini P. Variations of vessel diameter and $\delta^{13}\text{C}$ in false rings of *Arbutus unedo* L. reflect different environmental conditions. *New Phytologist*, 2010, 188(4): 1099-1112.
- [35] 上官方京, 赵明水, 张博纳, 汤璐瑶, 钱海蓉, 谢江波, 王忠媛. 亚热带植物水力性状与木质部解剖结构的关系. 浙江农林大学学报, 2022, 39(2): 252-261.
- [36] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 徐海龙, 李俊生, 蒲英霞. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征. 生态学报, 2018, 38(12): 4234-4244.
- [37] 王梦蕾, 袁红娟, 白宇, 孙照斌. 油松不同径向深度与方位树干液流特性研究. 西北林学院学报, 2023, 38(5): 221-227.
- [38] 涂洁, 廖迎春, 王辉民, 李燕燕. 江西退化红壤区马尾松液流特征及其对气象因子的响应. 江西农业大学学报, 2013, 35(4): 755-760.
- [39] 王媛, 魏江生, 刘兵兵, 周梅. 环境因子对大兴安岭南段白桦树干液流变化特征的影响. 东北林业大学学报, 2021, 49(2): 11-17.
- [40] 傅贺菁, 崔煜黄, 黄锦璐. 长汀水土流失区 3 种优势植物树干液流特征分析. 福建农业科技, 2021, 52(11): 69-74.
- [41] 许文豪, 尹立河, 贾伍慧, 张俊, 徐丹丹, 王晓勇. 环境因素对毛乌素沙地旱柳树干液流的影响分析. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 102-108, 116.