南昌 3 种城市树木液流密度及其环境响应特征*

叶学敏 袁 希 李虹茹 杨 桦 刘琳奇 罗坤水

（江西省林业科学院/江西南昌城市生态系统定位观测研究站/南昌市城市森林生态重点实验室，南昌 330013）

摘要：【目的】揭示城市主要树种水分利用规律及其环境影响因子，为城市林荫道树种选择与节水养护管理提供理论支撑与技术参考。【方法】以南昌 3 种城市树木香樟、闽楠和木荷为研究对象，利用热耗散探针测定树干液流密度（J_s），探究不同树种在不同生长时期的树干液流动态差异及其与环境因子的相关性。【结果】速生期（7—9 月）香樟的 J_s 最高，为 71.88 g·cm^{-2}·h^{-1}；其次为木荷（49.94 g·cm^{-2}·h^{-1}）；闽楠最低（44.24 g·cm^{-2}·h^{-1}）。3 种树木速生期的 J_s 均显著高于展叶期（4—6 月）。不同树种 J_s 的季节变化主要受太阳辐射（SR）和饱和水汽压差（VPD）的影响。展叶期木荷和闽楠 J_s 滞后 SR 变化 1 h，香樟则完全同步；3 种树木 J_s 对 VPD 变化存在显著的时滞效应，展叶期均为液流提前 1 h，速生期均为液流滞后 2 h。樟树的生理耗水量较大且对 SR 响应敏感，木荷耗水较低但对环境响应不敏感，闽楠耗水最低且对环境响应不敏感。【结论】城市树种的液流密度偏高，耗水量较大。树种和生长期差异是决定城市树木液流密度及其环境响应的关键。速生期是灌溉调控的关键窗口，需综合考虑环境因子时滞效应，针对不同树种的水分响应特征采取差异化供水策略，有助于实现城市绿地水分的高效利用。

关键词：树干液流；干旱；香樟；展叶期；城市森林

DOI：10.12169/zgcsly.2025.12.16.0001

Sap Flow Density of Three Urban Tree Species in Nanchang and Its Environmental Response Traits

Ye Xuemin Yuan Xi Li Hongru Yang Hua Liu Linqi Luo Kunshui

(Jiangxi Academy of Forestry/Nanchang Urban Ecosystem Positioning Observation and Research Station/ Nanchang Key Laboratory of Urban Forest Ecology, Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】 This study aims to elucidate the water use patterns of major tree species used in cities and their influencing factors to environment, providing theoretical support and technical references for species selection of urban street trees and their water-saving management. 【Method】 Three tree species, including *Camphora officinarum*, *Phoebe bournei*, and *Schima superba*, are selected in Nanchang to measure their sap flow density (J_s) using the heat dissipation probe method, and examine the difference in their sap flow densities on different growth stages and their relationships with environmental factors. 【Result】 During the fast-growing season between July and September, *C. officinarum* has the highest J_s (71.88 g·cm^{-2}·h^{-1}), followed by *S. superba* (49.94 g·cm^{-2}·h^{-1}) and *P. bournei* (44.24 g·cm^{-2}·h^{-1}). For all the three species, J_s is significantly higher in the fast-growing season than during the leaf-spreading stage between April and June. Seasonal variation in J_s is mainly regulated by solar radiation and vapor pressure deficit (VPD). During the leaf-spreading stage, the sap flow (J_s) of *S. superba* and *P. bournei*

收稿日期：2025-12-16

* 基金项目：江西省自然科学基金青年项目（20252BAC200371）；江西省重点研发计划项目（20261BCF320043）；江西省林业科学院青年人才培养项目（2024520802）

第一作者：叶学敏，男，1991 年生，博士，副研究员，研究方向为树木生理生态。E-mail：yexuemin0827@jxlky.cn

通信作者：罗坤水，男，1971 年生，学士，研究员，研究方向为城市生态。E-mail：526492282@qq.com

lags behind changes in solar radiation (SR) by 1 hour, while *C. officinarum* is completely synchronized with SR. However, all the three tree species exhibit significant time-lag effects in J_s in response to changes in vapor pressure deficit (VPD); on the leaf expansion stage, sap flow occurs one hour ahead of VPD changes, whereas on the fast-growing stage, sap flow lags behind VPD changes by 2 hours. *C. officinarum* has a high physiological water consumption and is sensitive to SR, *S. superba* has low water consumption but is insensitive to environmental responses, and *P. bournei* has the lowest water consumption and remains unresponsive to environmental changes.【Conclusion】 Urban tree species have a higher sap flow density and greater water consumption. Sap flow density of urban trees and its environmental response are determined by tree species and growth period. The fast-growing period is a critical time for irrigation, requiring the comprehensive consideration of the time lapse effect of environmental factors. Hence, adopting differentiated water supply strategies in line with the water response traits of different tree species will help achieve efficient water utilization in urban green spaces.

Keywords: sap flow; drought; *Camphora officinarum*; leaf spreading stage; urban forest

土壤水分在蒸腾拉力的驱动下沿植物-木质部向上运输，利用热耗散探针测定单位时间内通过单位边材面积的液流量，即为树干液流密度（J_s，$g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$）。将树干液流密度乘以边材面积，可估算整株植物或林分的蒸腾速率和水分运输状况。树干液流不仅受植物自身特性（如气孔导度、导管直径和叶片水势等）的影响，还受其他环境因子（如温度、太阳辐射、降水等）的调控。由于热耗散探针具有连续性、准确性和稳定性等优势，已被广泛应用于森林生态定位观测站中，以监测森林植物蒸腾耗水的昼夜变化和季节动态[1-5]。

城市生态系统中面临的水分胁迫更为复杂和严峻。首先，赣北地区夏季干旱尤为频繁，其中 2019 年和 2022 年属极端干旱年份[6]，树木面临更高的气穴化和死亡风险[7]。其次，城市内有大量的人工构筑物，如混凝土、柏油路面，各种建筑墙面等，改变了下垫面的热力属性，显著增加了土壤和空气温度，形成了城市热岛效应，加剧了植被失水速度并削弱土壤水分补给能力。当前，大量城市绿化乔木出现枝叶焦枯、大树死亡等现象，且多发于展叶和速生期，常绿树种受害风险显著高于落叶树种[8]。这可能与不同生长期树木在叶面积构建、蒸腾需求及水分调控策略上存在显著差异有关，展叶期与速生期代表了树木水分需求由低到高的关键阶段。此外，树干液流对环境因子的响应通常存在时间滞后效应，该现象反映了植物在水分运输与气孔调控过程中的综合调节能力以及对不同气候因子的敏感性，前人主要对人工林或天然林开展大量树干液流的研究[9-10]，对城市树木液流密度的研究较为匮乏。因此，明确城市乔木在不同生长期树干液流密度及其对环境因子的滞后响应特征，对于深入认识城市树木水分利用机制、降低生长季水分胁迫风险及优化城市绿化养护管理具有重要意义。

依托南昌市城市生态系统定位观测研究站，选择亚热带典型常绿阔叶树种香樟（*Cinnamomum camphora*）、木荷（*Schima superba*）与闽楠（*Phoebe bournei*），采用热耗散探针法长期监测不同生长期的树干液流动态，结合太阳辐射、气温、饱和水汽压差等环境驱动因子，探究 3 个树种在展叶期（4—6 月）和速生期（7—9 月）不同时期的水分利用特征及其调控机制，旨在揭示城市树木液流密度的时空变化特征，为城市绿化管理、树种优化配置及抗逆策略制定提供理论支撑与技术参考。

1 研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于南昌城市生态系统定位观测研究站主站点（115°49′05″E，28°44′32″N），为典型亚热带季风性湿润气候。年平均气温为 17 ℃，极端高温为 40.9 ℃；年均相对湿度为 78.5%；年平均降水量 1 600~1 700 mm，但降水分配不均，有湿旱之分，11 月至翌年 1 月为干旱期，但不威胁植物生长，其他月份皆有较大降水[11]；以红壤为主。在站内选择一片 40 年以上针阔混交林，在林

内设置 30 m × 30 m 的观测样地，乔木层优势种包括香樟、闽楠、木荷与湿地松（*Pinus elliottii*），样地内乔木平均树高 16.5 m，平均胸径（DBH）25.0 cm，郁闭度为 85%左右。选择香樟、闽楠、木荷 3 个树种进行研究，时间为 2024 年 4 月 1 日至 9 月 30 日。

表 1　样木特征

树种	编号	胸径/cm	树高/m	枝下高/m	冠幅面积/m^2	树木年龄/a
香樟	1	27.10	17.5	3.0	200.9	40 以上
	2	38.90	19.0	2.8	624.3	40 以上
	3	26.90	17.7	4.0	305.4	40 以上
木荷	1	34.30	18.8	2.6	459.7	40 以上
	2	15.30	15.0	4.0	307.8	20 以上
	3	18.70	16.5	3.0	355.5	20 以上
闽楠	1	8.60	9.3	2.2	50.2	约 12
	2	8.40	8.5	2.5	55.4	约 12
	3	9.60	9.5	3.0	63.6	约 12

1.2　数据采集

在样地内随机选取长势良好且大小均匀的 9 株样树（表 1）。于 2023 年使用热耗散技术（TDP）测量树干液流[3]。在距离地面 1.3 m 处削去 10 cm×10 cm 的树皮，然后使用电钻在削去树皮处沿直径方向钻孔，将两支探针沿树高方向置入乔木内部，高度相差 10 cm，并用密封胶进行孔洞密封，外侧用保温铝箔绕树周对探针进行覆盖，以减少光照及温度变化对数据采集的影响，用胶带缠绕保温铝箔上方以防止雨水进入传感器区域。监测系统每 10 min 获取并存储 1 次上下探针之间的温差数据。

样地内设置自动气象站每 5 min 监测并记录样地内的空气温度（*Ta*,℃）、空气相对湿度（*RH*,%）、太阳辐射（W · m^{-2}）、风速（m · s^{-1}）、土壤湿度（%）等环境数据。由于设备故障，未能记录 4 月 16—18 日、7 月 10—18 日、8 月 4 日—9 月 2 日的部分数据。

1.3　数据处理和分析

根据经验公式将温差数据换算为树干液流密度[2-3]：

$$J_s = 0.0119\left(\frac{\Delta T_M - \Delta T}{\Delta T}\right)^{1.231} \times 3\,600 \quad (1)$$

式（1）中：J_s 为单木的瞬时树干液流密度（g · cm^{-2} · h^{-1}）；ΔT_M 为当日上下探针温差最大值（℃）；ΔT 为探针瞬时温差（℃）。

通过上述气象数据获得的大气温度和空气相对湿度计算饱和水汽压差：

$$VPD = 0.611e^{17.502Ta/(Ta+240.97)} \times (1 - RH) \quad (2)$$

式（2）中：*VPD* 为饱和水汽压差（KPa）；*Ta* 为空气温度（℃）；*RH* 为空气相对湿度（%）。

对不同季节的空气温度、相对湿度、VPD 及同一树种的树干液流密度进行非参数检验；通过 Pearson 分析不同树种的树干液流与空气温度、相对湿度、VPD 等因子之间的相关关系。通过线性回归分析构建不同样木树干液流密度对环境因子的响应。采用错位相关对比法研究不同样木的树干液流密度与环境因子之间的相关性，将树干液流密度与太阳辐射、VPD 逐次进行步长为 1 h 的错位移动并进行 Pearson 相关分析，当相关系数最大时确定为树干液流响应环境因子的迟滞时间。

数据分析及绘图通过 SPSS 22.0 和 Origin 2018 完成。

2　结果与分析

2.1　环境因子及树干液流密度的季节差异

由表 2 可知，季节尺度上，环境因子在试验期（2024 年 4—9 月）表现为显著的季节差异。展叶期（4—6 月）平均空气温度为 22.50 ℃，极端高温为 39.40 ℃，平均空气相对湿度为 83.96%，平均 VPD 为 0.40 Kpa，平均太阳辐射为 180.79 W · m^{-2}，平均风速为 0.74 m · s^{-1}，平均土壤湿度为 31.47%；而速生期（7—9 月）平均空气温度为 30.56 ℃，极端高温为 41.00 ℃，平均空气相对湿度为 71.75%，平均 VPD 为 1.07 Kpa，平均太阳辐射为 165.26 W · m^{-2}，平

均风速为 1.08 m·s^{-1}，平均土壤湿度为 22.12%。以上说明速生期相对展叶期具有更高的空气温度和风速，更低的空气相对湿度和土壤湿度，以及更高的饱和水汽压差，这些因子的显著差异将极大影响植物在速生期的蒸腾作用，集中表现为树干液流密度的差异。季节尺度上，不同树种 J_s 差异显著（P<0.05）。展叶期（4—6 月）香樟的 J_s 最高（45.35 g·cm^{-2}·h^{-1}），其次为木荷（31.38 g·cm^{-2}·h^{-1}）；闽楠最低（25.71 g·cm^{-2}·h^{-1}）（表 2）。4 月展叶初期，3 个树种液流密度整体偏低、波动偏小；4 月下旬—6 月，随叶片完全展开、气温升高，3 个树种液流同步持续抬升，整体蒸腾耗水强度全面升高，日波动幅度变大；6 月末—7 月初，临近夏季高温期，香樟依旧维持高位耗水，闽楠整体有所回落，木荷反而出现明显峰值冲高（图 1）。速生期（7—9 月）香樟的 J_s 最高（71.88 g·cm^{-2}·h^{-1}），其次为木荷（49.94 g·cm^{-2}·h^{-1}），闽楠最低（44.24 g·cm^{-2}·h^{-1}）（表 2）。7 月初期，3 个树种液流同步冲高，木荷出现全周期最高耗水峰值。7 月末—8 月，香樟液流处高位，几无下降；木荷逐步平缓回落；闽楠小幅波动下行。9 月，气温回落、生长放缓，3 个树种液流密度同步缓慢稳步下降，蒸腾耗水整体减弱（图 2）。所有树种液流密度呈现密集锯齿状波动，白天光合蒸腾旺盛时液流密度大幅冲高，夜间植物蒸腾停止、液流快速回落（图 1~2）。非参数检验结果表明，香樟、木荷、闽楠样木的速生期树干液流密度均显著（P<0.05）高于展叶期（表 2）。

表 2 环境因子和各树种液流密度的特征

生长期		空气温度/℃	空气相对湿度/%	饱和蒸气压差/Kpa	太阳辐射/(W·m^{-2})	风速/(m·s^{-1})	土壤湿度/%	香樟液流密度/(g·cm^{-2}·h^{-1})	木荷液流密度/(g·cm^{-2}·h^{-1})	闽楠液流密度/(g·cm^{-2}·h^{-1})
展叶期	平均值	22.50^{b}	83.96^{a}	0.40^{b}	180.79^{a}	0.74^{b}	31.47^{a}	45.35^{bA}	31.38^{bB}	25.71^{bC}
	最大值	39.40	100.00	3.12	1 922.54	5.40	51.40	190.8	170.97	164.43
	变异系数	18.94	18.09	121.16	180.30	70.82	14.83	75.27	78.83	68.61
速生期	平均值	30.56^{a}	71.75^{b}	1.07^{a}	165.26^{b}	1.08^{a}	22.12^{b}	71.88^{aA}	49.94^{aB}	44.24^{aB}
	最大值	41.00	96.90	4.15	926.50	7.60	52.30	193.45	244.27	187.59
	变异系数	11.93	15.12	61.11	147.38	61.56	29.24	95.26	95.53	88.78

注：不同小写字母表示各个环境因子和各树种的液流密度在不同生长期的显著差异（P<0.05）；不同大写字母表示展叶期和速生期的液流密度在不同树种间的显著差异（P<0.05）。

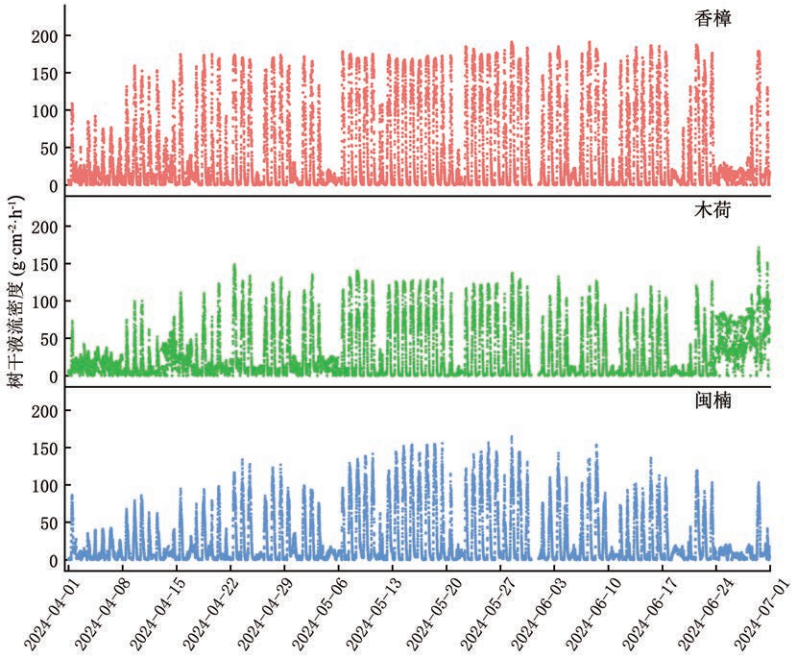


图 1 展叶期（4—6 月）样木树干液流密度特征

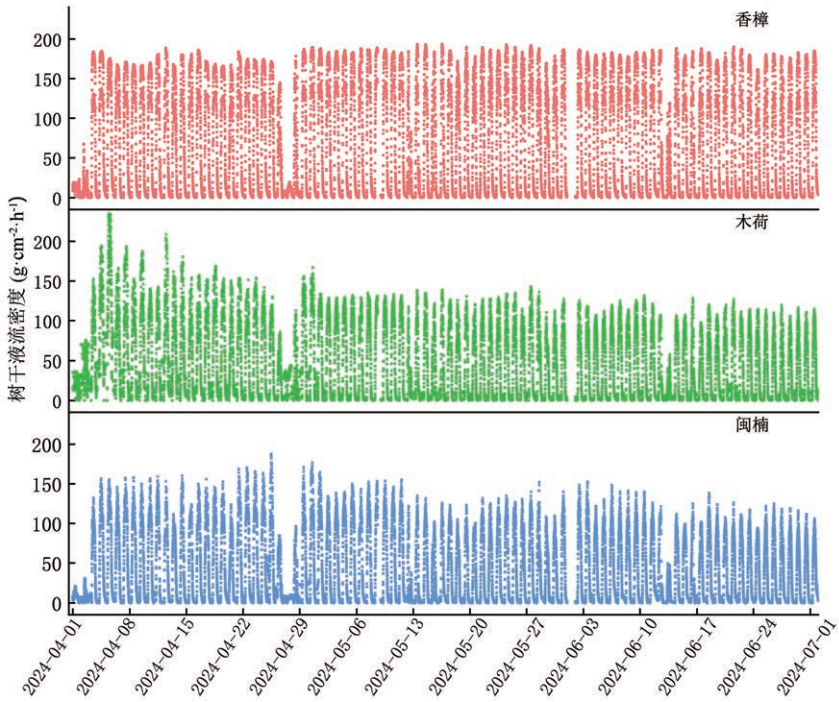


图 2　速生期（7—9 月）样木树干液流密度特征

2.2　树干液流与环境因子之间的相关关系

整体来看，在研究期内（4—9 月），不同样木的树干液流密度均表现为与太阳辐射、空气温度、VPD、风速极显著（$P<0.01$）正相关，与空气相对湿度、土壤湿度极显著（$P<0.01$）负相关（表 3）。分季节相关分析表明，展叶期的香樟、闽楠树干液流密度与太阳辐射、空气温度、VPD、风速均呈极显著（$P<0.01$）正相关，与空气相对湿度、土壤湿度呈极显著负相关（$P<0.01$），速生期闽楠液流密度与土壤湿度除外（$P<0.05$）。然而，展叶期的木荷树干液流密度与土壤湿度的相关性不显著（表 3）。

表 3　生长期内样木环境因子与样木树干液流密度的相关性

样木	生长期	太阳辐射	空气温度	空气相对湿度	饱和蒸气压差	风速	土壤湿度
香樟	生长期	0.860**	0.580**	−0.659**	0.723**	0.496**	−0.234**
	展叶期	0.843**	0.572**	−0.699**	0.756**	0.445**	−0.193**
	速生期	0.864**	0.662**	−0.644**	0.698**	0.477**	−0.057**
木荷	生长期	0.812**	0.535**	−0.576**	0.673**	0.466**	−0.076**
	展叶期	0.771**	0.502**	−0.576**	0.650**	0.397**	−0.014
	速生期	0.828**	0.642**	−0.597**	0.680**	0.462**	0.167**
闽楠	生长期	0.879**	0.554**	−0.669**	0.733**	0.494**	−0.222**
	展叶期	0.870**	0.536**	−0.721**	0.778**	0.433**	−0.243**
	速生期	0.882**	0.674**	−0.655**	0.723**	0.496**	−0.024*

注：** 表示 $P<0.01$，* 表示 $P<0.05$。

土壤液流密度与环境因子（太阳辐射、空气温度、空气相对湿度、饱和水汽压差、风速、土壤湿度）之间的回归模型（表 4）中，各因子综合可以解释不同样木树干液流密度 69.2%以上的变异；除去展叶期木荷外，各因子可以解释不同样木树干液流密度 76.4%以上的变异。以上证明模型具有较好的解释力度。

表 4 树干液流密度与环境因子的线性回归方程

样木	生长期	回归方程	R^2	P
香樟	生长期	$J_s=-12.401+0.076x_1+1.314x_2-0.465x_3+8.214x_4+6.648x_5+0.825x_6$	0.817	<0.001
	展叶期	$J_s=-14.596+0.072x_1+1.782x_2-0.481x_3+8.093x_4+5.297x_5+0.714x_6$	0.811	<0.001
	速生期	$J_s=-15.088+0.076x_1+2.492x_2-0.76x_3+0.173x_4+8.844x_5+0.453x_6$	0.819	<0.001
木荷	生长期	$J_s=-72.517+0.052x_1+1.012x_2+0.104x_3+17.266x_4+6.101x_5+1.417x_6$	0.764	<0.001
	展叶期	$J_s=-56.248+0.049x_1+0.894x_2-0.026x_3+14.415x_4+3.433x_5+1.426x_6$	0.692	<0.001
	速生期	$J_s=-48.415+0.055x_1+1.013x_2-0.266x_3+10.489x_4+7.551x_5+1.781x_6$	0.806	<0.001
闽楠	生长期	$J_s=-5.711+0.072x_1+0.487x_2-0.327x_3+13.524x_4+5.561x_5+0.745x_6$	0.843	<0.001
	展叶期	$J_s=1.014+0.071x_1+0.781x_2-0.296x_3+14.873x_4+3.335x_5+0.325x_6$	0.829	<0.001
	速生期	$J_s=-52.036+0.068x_1+1.338x_2-0.068x_3+14.815x_4+9.482x_5+0.527x_6$	0.855	<0.001

注：J_s为液流密度；x_1为太阳辐射；x_2为空气温度；x_3为空气相对湿度；x_4为饱和水汽压差；x_5为风速；x_6为土壤湿度。

2.3 树干液流的时滞效应

太阳辐射、VPD 与树干液流密度的 Pearson 相关性系数较高（表 3）。因此，采用错位分析法对展叶期和速生期不同树种的树干液流密度与太阳辐射、VPD 的时滞效应进行分析。结果（图 3）表明，香樟在展叶期的树干液流密度与太阳辐射存在−1 h（树干液流滞后 1 h）的时滞，此时决定系数（R^2）在±6 h 的错位相关分析中最大（R^2 = 0.852）；而在速生期时滞效应不明显，即−1 h 和 0 h 的决定系数基本一致（R^2 = 0.828）。香樟在展叶期树干液流密度与 VPD 表现为 1 h（树干液流提前 1 h）的时滞效应，速生期则表现为 2 h 的时滞。木荷在展叶期和速生期的树干液流密度与太阳辐射均存在−1 h（树干液流滞后 1 h）的时滞。木荷在展叶期树干液流密度与 VPD 表现为 1 h（树干液流提前 1 h）的时滞，速生期则表现为 2 h的时滞。闽楠在展叶期的树干液流密度与太阳辐射表现为−1 h 或 0 h 的时滞，在速生期为 0 h 时滞。闽楠在展叶期树干液流密度与 VPD 表现为 1 h（树干液流提前 1 h）的时滞，速生期则表现为 2 h 的时滞。总体来说，不同样木的树干液流密度滞后于太阳辐射峰值，而提前于 VPD 峰值；不同树种的树干液流密度的时滞效应存在差异；树干液流密度对于 VPD 的响应在速生期较展叶期有 1 h 的差异。

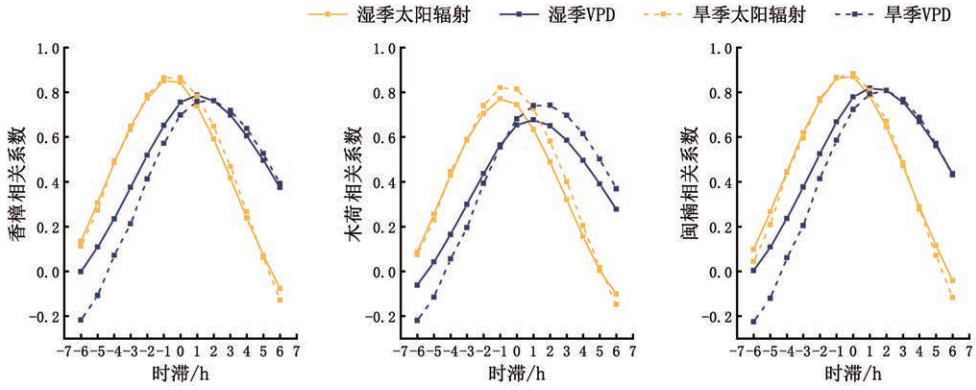


图 3 树干液流密度与太阳辐射、VPD 的时滞效应

3 讨论

3.1 树干液流密度的变化趋势

蒸腾作用是植物在环境因素和自身需求的共同作用下产生的水分运移现象，由于光合作用和水分运输等的需要，植物液流密度（J_s）受到气温、太阳辐射、土壤湿度、风速、树种等的影响[2,12-13]。本研究表明，7—9 月的南昌具有更高的空气温度和风速，更低的空气相对湿度和土壤湿度，以及更高的饱和水汽压差，综合影响了植物气孔的开闭，导致更为剧烈的植物水分运输，因此速生期的所有样木的树干液流密度均显著高于展叶期。前人研究发现，植物展叶期的 J_s低于速生期，因而将更多的光合产物投入叶片的构建

而不是快速的生长。不同树种 J_s 差异显著，速生期（7—9 月）香樟的 J_s 最高，为 71.88 g · cm^{-2} · h^{-1}，其次为木荷（49.94 g · cm^{-2} · h^{-1}），闽楠最低（44.24 g · cm^{-2} · h^{-1}）。相比天然常绿阔叶林中樟树的液流密度（28.36 g · cm^{-2} · h^{-1}）以及木荷速生期液流密度（42.08 g · cm^{-2} · h^{-1}）[14-15]，城市树种的液流密度整体偏高，表明其耗水量更大，这可能与城市环境中较高的气温与蒸汽压亏缺、较强的辐射条件，以及市政道路浇水养护作用下，树木维持较高的蒸腾以实现降温与碳同化有关。

本研究表明，不同季节、不同样木的树干液流密度在昼夜尺度上均表现为单峰曲线，并且与太阳辐射、空气温度、空气相对湿度、饱和水汽压差、风速等因子的变化趋势存在响应，这与前人研究是一致的[16]。树干液流与日出后的太阳辐射、温度、风速等因子的变化趋势基本一致，植物在日间打开气孔以增加蒸腾量，树干液流密度上升；当液流密度达到一定阈值后接近植物气孔导度和木质部运输能力的极限，表现为树干液流密度达到峰值；在夜间温度下降后植物气孔关闭导致蒸腾拉力作用减弱，树干液流密度降低。

太阳辐射作为一系列地表变化的驱动力，深刻影响着树干液流：其一方面增加空气温度、降低湿度改变植物的生存环境；另一方面植物通过光合作用响应太阳辐射完成自身生长更新。与大量研究结果[1-2]一致，本研究表明太阳辐射是树干液流最重要的影响因素。本研究中，树干液流密度与空气温度显著正相关，与空气湿度显著负相关，其作用原理是气温升高导致蒸腾作用加强；而湿度增加会降低植物叶片内外气压差，降低蒸腾作用[17]。黄德卫等[1]认为，树干液流在干季主要受气温影响，与本研究结果一致。在所有样木中，速生期树干液流密度与气温的相关系数均高于雨季。VPD 作为空气干燥程度的主要反映指标，是空气温度和湿度的综合结果，VPD 越高表明植物叶片与大气之间的水汽压差越大，植物需要更多水分以防止脱水死亡，因此反映出更高的树干液流密度。作为驱动树干液流的主要因子，VPD 与树干液流密度正相关，尤其是在热带（包括亚热带）地区[18]，这与本研究的结果一致。本研究中部分样木的树干液流密度与土壤水分的相关系数较低甚至相关系数不显著，可能是由于树木根系发达，主要利用深层次的土壤水分以增加水分来源[19]。

3.2　树干液流密度与环境因子的时滞效应

本研究中，3 个树种对太阳辐射的时滞响应存在明显的种间差异，这可能源于其水力结构与水分调节策略的不同[13]。木荷在展叶期和速生期均表现为稳定的滞后 1 h（−1 h），推测其具有较大的木质部水容，对辐射驱动的冠层蒸腾变化起到缓冲作用，属于较为保守的水力策略，液流响应因此相对滞后。闽楠在展叶期时滞波动（−1 h 或 0 h）、速生期完全同步（0 h），说明其水分传输效率较高，根冠信号传导迅速，且成熟期可能采取等水策略——通过快速气孔调节维持叶片水势稳定，使基部液流能即时响应冠层需求。香樟则未表现出与辐射的稳定时滞，这可能与其环孔材的导管结构有关：粗大导管虽导水率高，但对环境波动极为敏感，易因气孔频繁开闭导致液流昼夜节律不稳定，因而时滞规律性较差。

与太阳辐射不同，3 个树种对饱和水汽压差（VPD）的时滞效应表现出高度一致的生长期差异：展叶期均为液流提前 1 h（+1 h），速生期均转变为液流滞后 2 h（−2 h）。这一趋同模式揭示了叶片发育阶段对气孔调节的主导作用。展叶期叶片角质层较厚、气孔功能未完善，对大气湿度变化不敏感，液流主要由太阳辐射驱动，因此峰值出现在 VPD 升高之前。进入速生期后，叶片成熟且气孔完全开放，对 VPD 的敏感性显著增强，此时树种均采取相同的水分利用策略：当高 VPD 诱发气孔关闭以防止木质部栓塞时，蒸腾作用与根部吸水出现时间差，导致液流峰值滞后于 VPD 峰值[20-21]。3 个树种在速生期均表现为 2 h 滞后，表明成熟叶片阶段，即便水力结构各异（如香樟的环孔材、木荷的散孔材），其气孔对大气干旱的响应模式依然趋同，体现了植物在规避水分胁迫上的功能收敛。

4　结论

城市树种的液流密度偏高，耗水量更大，且存在显著树种差异和生长期差异。J_s 的变化主要受太阳辐射和饱和水汽压差驱动，不同环境因子

的时滞效应有所不同。香樟生理耗水大且对环境较为敏感，速生期应加强水分管理。木荷耗水适中，但对环境变化较为保守，干旱风险较低。闽楠响应敏感，但耗水量低，干旱风险最低。采取物种和生长期的差异化供水策略，可以实现城市森林水分的高效利用。未来应进一步关注多尺度扩展（从单株到林分）、长期连续监测和多环境因子交互作用研究，以构建更全面的城市树木水分利用预测模型和树种筛选体系。

参考文献

[1]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.

[2]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.

[3]LU P, URBAN L, PING Z. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2004, 46(6): 631.

[4]张荣,毕华兴,焦振寰,等.生长季刺槐树干液流昼夜变化特征及其对气象因子的响应[J].浙江农林大学学报,2022,39(6):1238-1246.

[5]INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2021-the physical science basis: working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

[6]吴少强,汤崇军,郑太辉,等.基于连续无有效降雨日数指标的江西省干旱时空分布特征[J].长江流域资源与环境,2022,31(4):903-914.

[7]CHOAT B, BRODRIBB T J, BRODERSEN C R, et al. Triggers of tree mortality under drought[J]. Nature, 2018, 558(7711): 531-539.

[8]ZHANG H P, NING Q R, LI Q, et al. Contrasting heat tolerance of evergreen and deciduous urban woody species during heat waves[J]. Functional Ecology, 2024, 38(7): 1649-1660.

[9]郭锦荣,白天军,邓文平,等.不同胸径日本柳杉树干液流及其蒸腾耗水差异[J].西南林业大学学报(自然科学),2019,39(2):70-77.

[10]孟盛旺,杨风亭,戴晓琴,等.杉木径向生长动态及其对季节性干旱的响应[J].应用生态学报,2021,32(10):3521-3530.

[11]陈伏生.城乡梯度森林生态过程研究[M].北京:中国林业出版社,2013.

[12]ZENG X M, XU X L, YI R Z, et al. Sap flow and plant water sources for typical vegetation in a subtropical humid karst area of southwest China[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(3): e14090.

[13]ZHANG R F, XU X L, LIU M X, et al. Hysteresis in sap flow and its controlling mechanisms for a deciduous broad-leaved tree species in a humid karst region[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(11): 1744-1755.

[14]杜珍,张赐成,肖雄,等.亚热带典型次生林优势树木树干液流对夏秋极端干旱的响应[J].生态学报,2025,45(13):6317-6330.

[15]黄婉萱,罗璇,成仙利,等.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[J].生态学报,2025,457):3341-3352.

[16]罗璇,黄婉萱,杨萌萌,等.南亚热带3个潜在绿化树种水分利用种间差异及环境响应[J].中南林业科技大学学报,2024,44(10):62-73.

[17]高铭雨,刘敏,王俊,等.陕北安塞山地苹果树干液流变化特征及其对环境因子的响应[J].延安大学学报(自然科学版),2024,43(2):49-55.

[18]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.

[19]王彪,陈立欣,吴应明,等.干旱胁迫下环境与生理因子对晋西黄土区刺槐人工林树干液流的影响[J].北京林业大学学报,2024,46(4):127-140.

[20]刘斐耀,尤全刚,薛娴,等.荒漠绿洲过渡带多枝柽柳树干液流特征及其与环境因子关系[J].干旱区资源与环境,2024,38(3):112-122.

[21]李明阳,党宏忠,陈帅,等.毛乌素沙地南缘樟子松树干液流特征及其对环境因子的响应[J].干旱区资源与环境,2023,37(4):153-161.