

DOI: 10.5846/stxb201711292145

王志超, 许宇星, 竹万宽, 杜阿朋. 雷州半岛尾叶桉和湿加松人工林蒸腾耗水规律研究. 生态学报, 2019, 39(6): - .

Wang Z C, Xu Y X, Zhu W K, Du A P. The transpiration water consumption of two common fast-growing forests in Leizhou Peninsula. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

雷州半岛尾叶桉和湿加松人工林蒸腾耗水规律研究

王志超, 许宇星, 竹万宽, 杜阿朋*

国家林业局桉树研究开发中心 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站, 湛江 524022

摘要:为正确认识大径材桉树及湿加松耗水规律,为地区人工林树种选择、栽培及抚育提供指导,应用 TDP 热扩散探针技术,对 10 年生尾叶桉和湿加松树干液流进行连续监测,并同步测定各气象因子,分析了雷州半岛地区尾叶桉和湿加松蒸腾耗水的日变化特征和季节变化规律,并与气象因子建立了相关模型。结果表明:尾叶桉和湿加松边材液流均表现出典型的昼高夜低的单峰型日变化特征,各月平均液流速率不同,且旱雨季差异显著;其中峰值尾叶桉雨季(0.127 cm/min)和旱季(0.096 cm/min)分别是湿加松雨季和旱季的 1.30 倍和 1.57 倍;日平均液流速率尾叶桉雨季(0.045 cm/min)和旱季(0.033 cm/min)分别是湿加松雨季和旱季的 1.27 倍和 1.54 倍;启动时间和迅速下降时间雨季两树种间差异不大,但旱季尾叶桉要提前湿加松约 1—1.5 h 启动,并晚 0.5—1 h 迅速下降。影响两树种边材液流速率的主要气象因子相同。尾叶桉人工林年平均单株日耗水量为 12.79 L/d,是湿加松的 1.33 倍,林分蒸腾耗水量尾叶桉(582.16 mm)和湿加松(483.24 mm),分别占同期年降雨量的 34.2%和 28.4%,且两树种旱雨季蒸腾耗水量均雨季显著大于旱季。

关键词: 蒸腾耗水;液流速率;旱雨季;尾叶桉;湿加松

The transpiration water consumption of two common fast-growing forests in Leizhou Peninsula

WANG Zhichao, XU Yuxing, ZHU Wankuan, DU Apeng*

China Eucalypt Research Centre, Guangdong Zhanjiang Eucalyptus Plantation Ecosystem Research Station, Zhanjiang 524022, China

Abstract: To examine water consumption rules in *Eucalyptus macrophylla* and *Pinus elliottii* × *P. caribaea* and to provide guidance for tree species selection, cultivation and tending of regional plantation, sap flow of plantation grown, *E. urophylla* and *Pinus elliottii* × *P. caribaea* were continuously measured using the Thermal dissipation sap flow velocity probe technology and the meteorological factors were continuously monitored and measured simultaneously to establish a sap flow rate model with meteorological factors. The diurnal variation and seasonal variation of transpiration water consumption of *E. urophylla* and *Pinus elliottii* × *P. caribaea* in the Leizhou Peninsula were analyzed. Results showed that diurnal variations of sap flow of both *E. urophylla* and *Pinus elliottii* × *P. caribaea* displayed typical single-peaked curves. The average monthly flow rate was different and significant difference was found during the rainy season and drought. The peak sap flow of *E. urophylla* in the rainy season (0.127 cm/min) and dry season (0.096 cm/min) were 1.30 times and 1.57 times higher than that of *Pinus elliottii* × *P. caribaea*, respectively. The average daily flow rate of *E. urophylla* in the rainy season (0.045 cm/min) and dry season (0.033 cm/min) were 1.27 times and 1.54 times higher than that of *Pinus elliottii* × *P. caribaea*, respectively. There was no significant difference between the start-up time and the rapid decline time of the two species in the rainy season. But the *E. urophylla* in the dry season increased by about 1—1.5 hours in advance and started to decline rapidly 0.5—1 hour

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2017QA033);“十三五”国家重点研发计划课题(2016YFD0600505);广东省林业科技创新项目(2017KJCX020);广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站项目(2018-LYPT-DW-141)

收稿日期:2017-11-29; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dapzj@163.com

later than that of *Pinus elliottii* × *P. caribaea*. The main meteorological factors affecting the sapwood flow rate of the two species are the same. The average single plant daily water consumption of *E. urophylla* plantation was 12.79 L / d, which was 1.33 times higher than that of *Pinus elliottii* × *P. caribaea*. The stand transpiration water consumption of *E. urophylla* (582.16 mm) and *Pinus elliottii* × *P. caribaea* (483.24 mm) accounted for 34.2% and 28.4% of the annual rainfall, respectively, and the Stand transpiration water consumption of both tree species during the rainy season was significantly greater than that during the dry season.

Key Words: transpiration; sap flow velocity; rainy and dry season; *Eucalyptus urophylla*; *Pinus elliottii* × *P. caribaea*

蒸腾是植物生命活动必需的生理代谢过程^[1],其耗水占根部吸收水分的 99% 以上^[2],树干液流是蒸腾作用在植物体内产生的上升流,提供 99.8% 以上的蒸腾耗水,因此可以通过精确测定树干液流来反映植株的蒸腾耗水状况^[3]。树干液流受植物生物学结构、气象因子及土壤水分等因素的综合影响^[4],其中生物学结构决定树干液流的潜在能力^[5],而气象因子和土壤水分决定树干液流的变化趋势和瞬时波动特征^[6-8],因此准确分析掌握单株树干液流变化规律及其影响因素,并结合林分特征进行尺度转换,对于正确评价大面积人工林蒸腾耗水量及其对局域水资源的影响具有重要作用。

树木的蒸腾耗水量是人工林树种选择的重要参数^[9],桉树和松树作为公认的速生林种,已成为雷州半岛地区重要的造林树种。湿加松(*Pinus elliottii* × *P. caribaea*)是湿地松(*Pinus elliottii*)与加勒比松(*P. caribaea*)的杂交子代,具有生长快、生长量大、树干圆满通直、抗逆性强等优点^[10],20 世纪 50 年代已在澳大利亚地区广泛种植,并取得成功^[11-12]。80 年代开始在广东开展杂交实验,并随后在广东,广西,福建等亚热带南缘省份大面积推广。目前对于湿加松的研究主要集中在生长表现^[13]、木材材性^[14]、以及育种方面^[15],而对于其蒸腾耗水特征方面的研究尚未见报道。桉树由于其本身的生物学结构及速生性决定了其单位时间单位面积的耗水量高于一般树种,再加上该地区降雨时空分配不均引起的季节性干旱,导致桉树耗水问题成为广泛关注和争论的焦点^[16-17]。目前已有许多学者进行了相关方面的研究,如张宁南等^[18]研究了 4 年生尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)的液流密度和蒸腾耗水特征;孙振伟等^[19]对柠檬桉(*Corymbia citriodora*)树干液流及蒸腾耗水季节变异进行了研究,王志超等^[20]对 2 年生—3 年生尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)旱雨两季树干液流特征进行了分析,VERTESSY 等^[21]与 WULLSCHEGER 等^[22]研究了王桉(*Eucalyptus regnans*)的树干液流动态。但国内对于 10 年生以后大径材桉树蒸腾耗水特征的研究较少,更未有人对大径材阶段的尾叶桉和湿加松的蒸腾耗水规律进行对比分析。

本研究利用精确度高、对植株损伤小、可在树木自然生长状态下对树干液流的连续观测的 Granier 热扩散探针法(TDP)^[23]对雷州半岛地区 10 年生尾叶桉树干液流进行持续观测,并与同期 10 年生湿加松树干液流对比分析,并结合自动气象观测站对环境因子作同步测定,以期揭示雷州半岛地区尾叶桉和湿加松人工林蒸腾耗水规律,为正确认识桉树的耗水问题及地区人工林树种选择提供数据支持和理论指导。

1 研究区概况

研究区位于广东雷州半岛地区,试验样地设置在广东湛江桉树森林生态系统国家定位观测站内(21°30' N, 111°38' E),海拔 90 m,地势平坦,属海洋性季风气候,年均降雨量约 1500 mm,多集中在 5—10 月份,为雨季,占全年降雨量的 77%—85%;年均温度 23℃,年总辐射量 4240 MJ/m²,年均相对湿度 80.4%。试验区土壤类型主要是玄武岩砖红壤,土层厚度 2 m 以上,0—80 cm 土层内平均有机质含量 1.6% 以上,pH 4.5—5.3,土壤肥力属中等水平。乔木层主要有尾叶桉、湿加松和尾巨桉;林下植被丰富,主要灌木有五色梅(*Lantana camara*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)、槲栎(*Quercus aliena*)等;主要草本植物有飞扬草(*Euphorbia hirta*)、飞机草(*Eupatorium odoratum*)、蟛蜞菊(*Wedelia chinensis*)以及白花鬼针草(*Herba Bidentis Pilosa*)等。

2 研究对象及方法

2.1 研究对象

研究对象为尾叶桉人工林和湿加松人工林,林龄均为 10 年,立地条件一致;其中尾叶桉人工林现存密度 1245 株/hm²,叶面积指数 1.37,平均胸径为 22.5 cm,平均树高 21.7 m,平均冠幅 3.61 m;湿加松人工林现存密度 1375 株/hm²,叶面积指数 0.95,平均胸径为 18.9 cm,平均树高 12.3 m,平均冠幅 2.45 m。在对尾叶桉和湿加松人工林林分调查的基础上,分别在各林分内设置 20 m×20 m 标准样地 1 个,作为观测试验区。

2.2 研究方法

2.2.1 树干液流的测定

在尾叶桉和湿加松人工林标准样地内,分别选择 5 株生长良好、无病虫害、树干圆满通直无挤压的标准木作为液流持续观测样木,观测周期为 1 年(4 月到次年 3 月),样木的各项参数详见表 1。

树干液流测定方法采用 Granier 热扩散探针法,传感器采用德国 Ecomatik 公司 SF-L4 针型热扩散探针(33 mm),数据采集器采用 DL_{2c} 数据采集器,采集时间间隔 10 min,与气象监测时间同步。为避免不同高度、不同方位间液流的差异以及太阳辐射的影响,探针均安装在同一高度的北侧,同时用防辐射铝箔覆盖。

表 1 被测样木基本参数
Table 1 Basic conditions of the sample trees

树种 Tree Species	样树编号 Number	林龄 Age/a	胸径 Diameter at breast height/cm	树高 Tree height/m	冠幅 Canopy/m	边材面积 Sapwood area/cm ²	树干位点高度 Height/m
尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	1	10	21.7	21.2	3.1	205.8	1.3
	2	10	25.5	23.7	3.3	284.3	1.3
	3	10	22.2	24.5	3.9	215.4	1.3
	4	10	25.1	20.3	3.8	275.4	1.3
	5	10	20.8	18.8	3.9	189.1	1.3
湿加松	1	10	24.5	13.1	3.3	393.1	1.3
<i>P. elliotii</i> × <i>P. caribaea</i>	2	10	19.9	13.2	2.2	258.1	1.3
	3	10	15.5	11.4	2.4	155.7	1.3
	4	10	18.7	12.4	2.3	227.6	1.3
	5	10	16.1	11.1	1.9	168.1	1.3

根据 Granier^[24]液流计算公式:

$$Js = 0.0119 \times (dt_{\max}/dt_{\text{act}} - 1)^{1.231} \times 60 \tag{1}$$

$$dt = T_{1-0} - (T_{1-2} + T_{1-3})/2 \tag{2}$$

式中, Js 为液流速率,cm/min; $dt_{\max}$ 、 dt_{act} 均由式(2)计算得到, $dt_{\max}$ 一般指夜间空气湿度为 100%长达 2d 或树干直径停止变化、处于相对稳定状态时算得的 dt 值; T_{1-0} 、 T_{1-2} 、 T_{1-3} 分别为探针 S_0 、 S_2 、 S_3 分别与 S_1 间的温度差,℃。

2.2.2 边材面积的测定

样木的边材面积无法直接测量,只能通过生长锥测出边材厚度,进而根据取芯处的树干直径以及树皮厚度进行计算。为避免生长锥对样木造成损伤进而影响液流速率的监测,在 2 处试验地内分别随机选取 30 株树,测量其胸径和边材厚度,每株树分东西、南北两个方向分别取木芯一条,测其边材厚度取平均值,计算边材面积,并建立胸径与边材面积的关系方程。经拟合回归我们得出:

尾叶桉人工林关系方程为:

$$As = 0.4382D^2 - 2.701D + 18.48 \tag{3}$$

湿加松人工林关系方程为:

$$As' = 0.608D^{2.0232} \quad (4)$$

两树种边材拟合方程决定系数 R^2 均达到 0.8 以上, 拟合效果较好。式中 As 、 As' 为边材面积, cm^2 , D 为胸径, cm 。根据关系方程计算出样树的边材面积(表 1), 进而计算液流通量。

2.2.3 气象因子的测定

两处试验地相距较近, 因此在尾叶桉和湿加松试验区之间开阔地带安置美国 Campbell 公司的 CR3000 型自动气象观测系统, 连续观测试验期间的大气温度(T , $^{\circ}\text{C}$)、空气相对湿度(RH , $\%$)、太阳辐射(Slr , W/m^2)、降雨量($Rain$, mm)等气象指标, 数据采集时间间隔为 10min, 与液流监测时间间隔一致。同时为考虑大气温度和湿度的协同效应, 利用大气温度和相对湿度计算空气饱和水汽压差(VPD , Kpa), 公式如下:

$$VPD = (1 - RH) \times 0.6108e^{\left(\frac{17.27T}{T + 273.3}\right)} \quad (5)$$

式中, RH 为空气相对湿度, $\%$; T 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 统计分析

采用 Excel 2003、SPSS 19.0 以及 SigmaPlot 12.5 统计软件对所有数据进行分析并作图

3 结果与分析

3.1 尾叶桉、湿加松边材液流速率特征研究

3.1.1 两种速丰林液流速率日变化特征

分别选取雨季(降雨量为 1500.2mm)和旱季(降雨量为 204.5mm)中典型月份(雨季为 7 月—9 月;旱季为 12 月—次年 2 月)的日变化液流数据进行每 10min 平均, 得出两种速丰林旱雨季的平均日变化进程, 如图 1 所示。由图可知, 两种速丰林树干液流均表现出典型的昼夜变化规律, 白天变化幅度大, 呈典型的单峰型曲线。尾叶桉、湿加松雨季与旱季液流差异均较大, 主要表现在日平均液流速率、日峰值, 启动时间及液流迅速下降时间上, 其中雨季日平均液流速率尾叶桉($0.045 \text{ cm}/\text{min}$)及湿加松($0.036 \text{ cm}/\text{min}$)分别是旱季的 1.5 倍和 1.8 倍, 两个树种间日平均液流速率雨季尾叶桉是湿加松的 1.27 倍, 旱季为 1.54 倍, 存在较大差异; 日峰值雨季尾叶桉($0.127 \text{ cm}/\text{min}$)是旱季的 1.32 倍, 湿加松雨季($0.097 \text{ cm}/\text{min}$)是旱季($0.061 \text{ cm}/\text{min}$)的 1.6 倍, 而尾叶桉雨季是湿加松的 1.30 倍, 旱季为 1.57 倍; 从启动时间来看, 尾叶桉雨季启动时间在 6:00—7:30 之间, 比旱季提前约 1 h 左右, 湿加松雨季启动时间与尾叶桉差异不大, 而旱季启动时间比尾叶桉旱季启动时间滞后约 1—1.5h; 液流迅速下降时间雨季两树种间差异不大, 均在 16:30—17:30 之间, 而旱季尾叶桉较雨季要提前 1—1.5h, 湿加松较尾叶桉旱季液流迅速下降时间仍提前约 0.5—1 h 左右。因此从图上看雨季两者差异不大, 仅峰值尾叶桉略高于湿加松, 而旱季尾叶桉峰值型要高宽于湿加松。

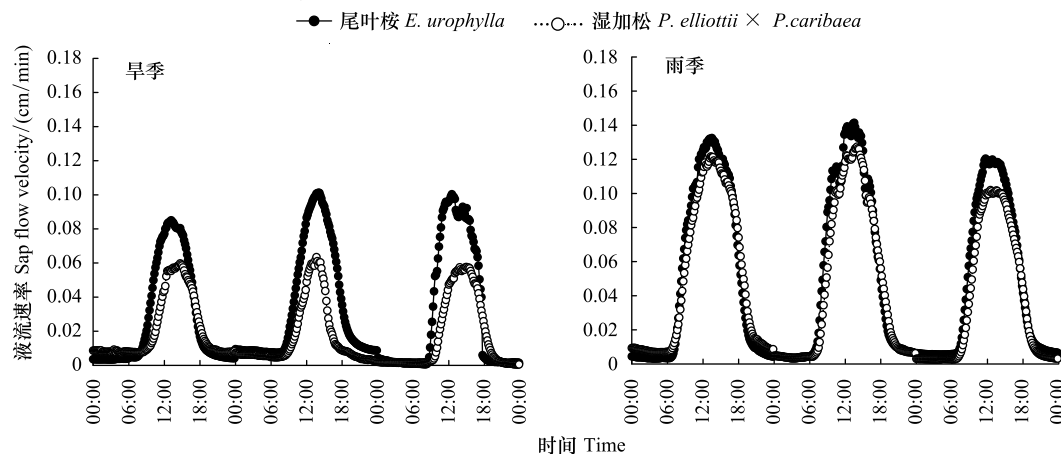


图 1 尾叶桉、湿加松旱雨季液流速率日变化特征

Fig.1 Features and differences of sap flow in daytime during both rainy and dry seasons of *E. urophylla* and *P. elliptica* × *P. caribaea*

分析夜间液流发现,两树种旱雨季均存在较大的夜间液流,且前半夜液流速率及变化幅度均较后半夜大,后半夜夜间液流均较小且平稳,推测原因可能是后半夜树干水分接近饱和,夜晚水分补充的时间主要为前半夜。尾叶桉雨季夜间平均液流速率(0.0059 cm/min)与旱季(0.0062 cm/min)无显著性差异;湿加松雨季夜间平均液流速率(0.0063 cm/min)与旱季(0.0060 cm/min)差异不显著,且两树种间夜间液流无论是旱季还是雨季差异均未达到显著水平。

3.1.2 尾叶桉、湿加松平均液流速率月动态规律

树木边材液流速率受气象因素、土壤状况及自身生理特性的影响,呈现出明显的季节变化规律^[25]。将尾叶桉、湿加松各月份液流速率进行平均,得出一年内各月份平均液流速率变化图(图 2),由图中可以看出,研究期间尾叶桉月平均液流速率 12 月份最小,而湿加松 1 月最小,分别为 0.027 cm/min 和 0.016 cm/min,最大值月份尾叶桉为 8 月,为 0.051 cm/min,是最小月份的 1.9 倍;湿加松最大月平均液流速率出现在 7 月,为 0.048 cm/min,是最小月份的 3.0 倍。两树种各月份平均液流速率大小依次为:尾叶桉 8 月>7 月>10 月>9 月>6 月>5 月>1 月>11 月>4 月>2 月>3 月>12 月,湿加松为 7 月>8 月>6 月>9 月>11 月>5 月>4 月>12 月>10 月>3 月>2 月>1 月,各月平均液流速率尾叶桉均大于湿加松,其中雨季月份两树种间差距小于旱季月份间的差距。

3.2 两种速丰林边材液流速率与气象因子间的关系

树木边材液流速率的日变化特征主要受气象因子的影响,为了更好的分析液流速率与气象因子间的关系,分别选取雨季和旱季各连续 6 天(雨季 7 月 15—20 日,旱季 11 月 10—15 日;其中阴雨天气 5 天,晴天 7 天)的液流速率和气象因子数据进行分析作图(图 3),通过 Pearson 相关分析我们得出,湿加松和尾叶桉均与空气温度、风速、太阳辐射、光合有效辐射和水汽压亏缺呈极显著正相关($P<0.01$),而与相对湿度呈极显著负相关($P<0.01$),与降雨量无显著相关性。其中湿加松各影响因子相关系数大小为 VPD>相对湿度(负相关)>光合有效辐射>太阳辐射>大气温度>风速;尾叶桉为相对湿度(负相关)>VPD>光合有效辐射、太阳辐射>大气温度>风速。

为了进一步揭示环境因子对液流速率的综合影响建立树干液流速率与上述环境因子的多元线性模型采用逐步法进行回归分析,以 5% 和 10% 的可靠性作为因变量入选和剔除临界值最终的回归模型参数见表 2。

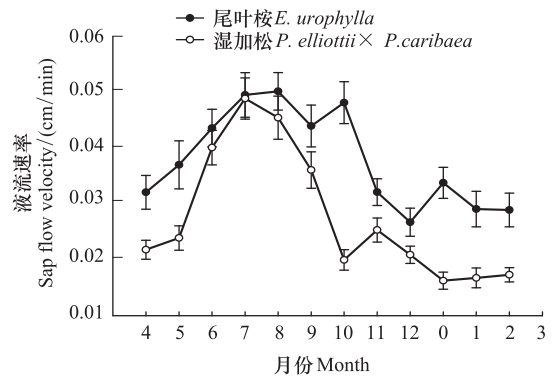


图 2 不同月份尾叶桉、湿加松平均边材液流速率

Fig.2 The monthly average of stem sap velocity in different month

表 2 湿加松、尾叶桉液流速率与气象因子的多元回归模型估计
Table 2 Parameters of multivariable model of sap velocity and meteorological factors

树种 Species	项目 Item	偏回归系数 $\times 10^{-4}$ Partial regression coefficient	标准误差 $\times 10^{-3}$ Standard error	t	Sig.	偏相关系数 Partial correlation coefficient
湿加松 <i>P. elliottii</i> $\times$ <i>P. caribaea</i>	常数	-658.96	9.07	-7.27	0.00	—
	饱和水汽压差	913.71	2.39	38.23	0.00	0.678
	有效辐射	2.66	0.024	11.01	0.00	0.256
	太阳辐射	-2.8	0.030	-9.42	0.00	-0.221
	相对湿度	5.99	0.093	6.47	0.00	0.154
尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	风速	2.58	0.046	5.56	0.00	0.133
	常数	2482.44	4.74	52.34	0.00	—
	相对湿度	-25.78	0.051	-50.37	0.00	-0.772
	有效辐射	0.83	0.0020	41.16	0.00	0.704
	风速	4.37	0.059	7.45	0.00	0.177

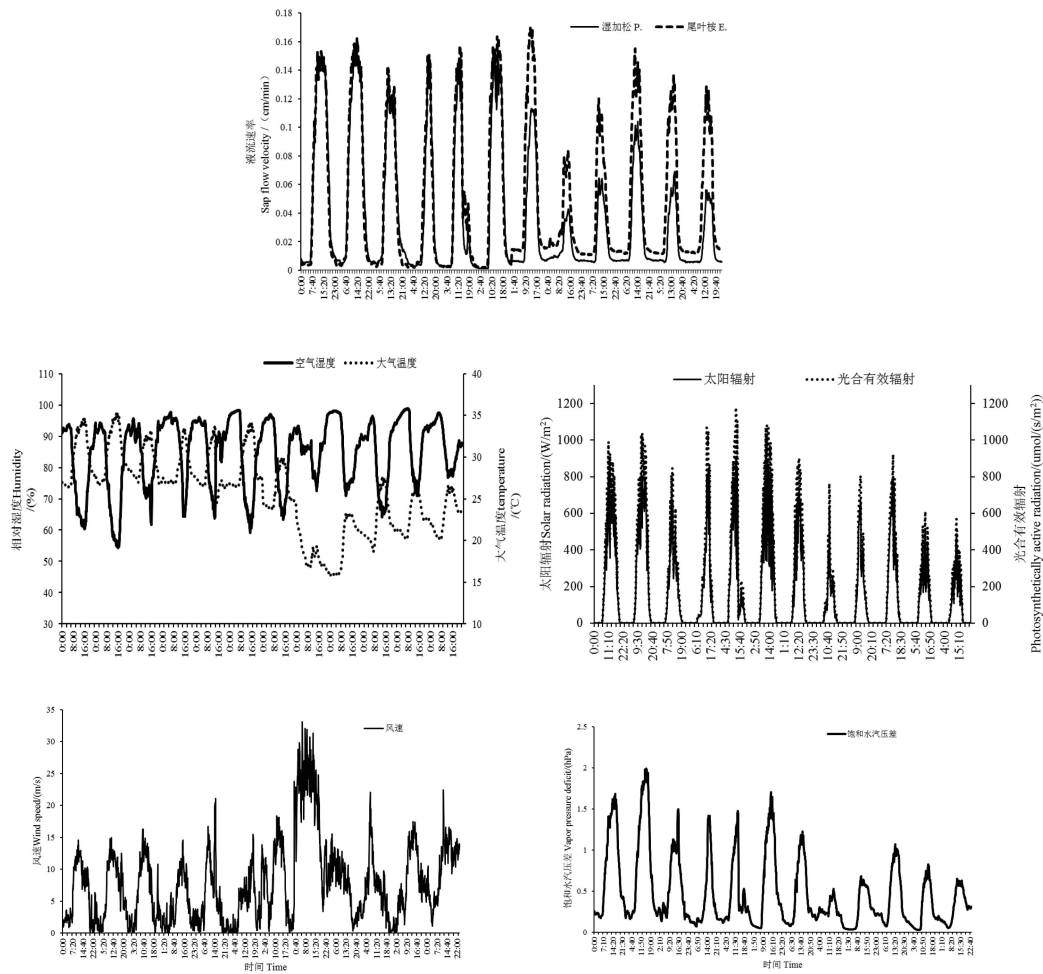


图3 湿加松和尾叶桉液流速率与气象因子日变化

Fig.3 Relationship between stem sap flow rate and meteorological factors

湿加松: $VC = -0.0659 + 9.14 \times 10^{-2} VPD + 2.66 \times 10^{-4} PAR - 2.80 \times 10^{-4} SR + 5.99 \times 10^{-4} RH + 2.58 \times 10^{-4} V_{wind}$; $R^2 = 0.95$, $n = 1728$

尾叶桉: $VC = 0.2482 - 2.58 \times 10^{-3} RH + 8.31 \times 10^{-5} PAR + 4.37 \times 10^{-4} V_{wind}$; $R^2 = 0.924$, $n = 1728$

式中, VC 为边材液流速率; PAR 为光合有效辐射; VPD 为水汽压亏缺; RH 空气相对湿度; SR 为太阳辐射; V_{wind} 为风速。

3.3 林分的树木蒸腾耗水量估算

如表3所示,观测期间尾叶桉人工林年平均单株日耗水量为12.79 L/d,是湿加松的1.33倍;旱雨两季两树种均差异显著,其中尾叶桉雨季平均单株日耗水量为15.31 L/d,是旱季的1.50倍,湿加松雨季平均单株日耗水量为12.38 L/d,是旱季的1.81倍;两种速丰林各月的平均单株日耗水量均存在差异,其中尾叶桉最小为9.01 L/d,出现在12月份,最大为8月份16.92 L/d;湿加松平均单株日耗水量最小出现在1月份为5.64 L/d,最大值为7月份16.94 L/d。通过林分现存密度进行尺度转换我们得出:尾叶桉和湿加松人工林林分年蒸腾耗水量分别为582.16 mm和483.24 mm,分别占同期年降雨量的34.2%和28.4%。雨季尾叶桉林分蒸腾量占年总蒸腾量的3/5,是同期降雨量的23.4%,旱季蒸腾量为231.4 mm,是同期降雨量的113%;湿加松林分雨季蒸腾量为313.04 mm,是旱季的1.84倍,占同期降雨量的20.9%,旱雨两季蒸腾量分别为同期降雨量的20.9%和83.2%(见图4)。

表 3 湿加松、尾叶桉林分蒸腾耗水量

Table 3 Transpiration water consumption of *E. urophylla* and *P. elliotii*×*P. caribaea*

日期 Date	林分月耗水量 Monthly transpiration/mm		平均单株日耗水量 Mean daily sap flux of simple tree/(L/d)		降雨 量 Rainfall/mm
	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	湿加松 <i>P. elliotii</i> × <i>P. caribaea</i>	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	湿加松 <i>P. elliotii</i> × <i>P. caribaea</i>	
4 月 April	40.40	31.16	10.82	7.55	37.6
5 月 May	48.16	35.31	12.48	8.28	425.8
6 月 June	54.89	57.32	14.69	13.90	307.2
7 月 July	64.44	72.20	16.70	16.94	228.3
8 月 August	65.28	67.14	16.92	15.75	353.9
9 月 September	55.36	51.57	14.82	12.50	79.1
10 月 October	62.64	29.50	16.23	6.92	105.9
11 月 November	40.45	36.20	10.83	8.78	80.9
12 月 December	34.78	30.87	9.01	7.24	24.5
1 月 January	43.97	24.02	11.39	5.64	29.7
2 月 February	34.18	22.37	9.80	5.81	21.9
3 月 March	37.63	25.58	9.75	6.00	9.9
综合 Total	582.16	483.24	12.79 *	9.61 *	1704.7

* 代表观测期间的日均耗水量

4 结论与讨论

尾叶桉和湿加松边材液流速率受气象因素的瞬时影响,均表现出明显的昼夜变化规律:白天变化幅度大,呈明显的单峰型曲线。蒋文伟等^[26]认为白天随着太阳辐射的增强,叶片气孔导度增大,植物气体交换加快,同时空气温度升高,叶片和空气中水汽压梯度增大,水汽汽化加快,从而加快蒸腾,增大液流速率,很多学者的研究均证明了这一点^[27-28]。两树种夜间均存在夜间液流且较白天微弱,依据 Goldstein 等^[29]的理论,夜间液流活动是植物体为弥补日间蒸腾造成的水分亏缺,为植物体补充水分的过程。研究发现,两树种旱雨季夜间液流速率及变化幅度均显著大于后半夜,说明前半夜是两树种水分补充的主要时期。夜间液流的产生原因目前尚有争论,孙振伟等^[19]、蒋文伟等^[26]认为夜晚蒸腾作用为零,根压是夜间液流产生的主要因素。还有很多学者认为夜间液流的产生不仅仅是根压造成的,如果有足够的外部环境,夜间也会有明显的蒸腾作用^[30],鱼腾飞等^[31]对胡杨(*Populus euphratica*)蒸腾耗水的研究中发现,胡杨夜间有明显的蒸腾作用,平均蒸腾速率为 $0.7\text{ mmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。尾叶桉和湿加松夜间液流的产生原因,还需进一步分别对其夜间气孔蒸腾进行监测,同时对夜间液流速率与气象因素进行相关分析,从而确定夜间液流是否因单纯的夜间补水还是夜间蒸腾和树干补水同时进行造成的。

受气象因素和土壤供水等因素的影响,尾叶桉和湿加松各月平均液流速率均存在较大差异,尤其是旱雨两季间的日变化特征差异更大,两树种雨季启动时间均早于旱季,峰值、维持高液流速率的时间及日平均液流速率均雨季大于旱季。这与王志超等^[20]对尾巨桉旱雨两季液流特征的研究结果保持一致。造成这一结果的原因主要是雷州半岛地区雨热同期,较高的太阳辐射、空气温度和充足的供水条件使得雨季蒸腾速率大于旱季。这在其他树种如大叶相思(*Acacia auriculiformis*)^[32]、马占相思(*Acacia mangium*)^[33]的研究中也证明了这一观点。尾叶桉和湿加松两树种间日变化特征也存在较大差异,雨季两树种间差异较小,旱季差异较大,这主

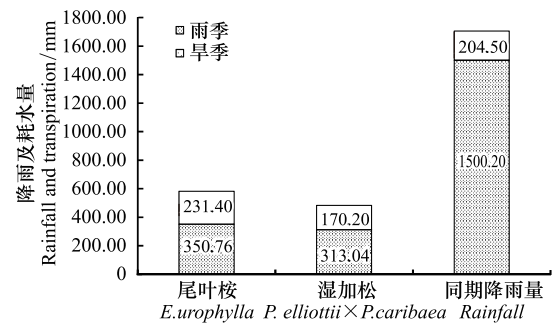


图 4 湿加松、尾叶桉旱雨季林分蒸腾耗水量及同期降雨量比较/mm

Fig.4 Comparison of transpiration water consumption and rainfall during the same rainy season and dry season

要是由树种本身的生物学特性决定的。

研究表明,尾叶桉和湿加松边材液流速率是多个气象因子综合影响的结果,两树种均与空气温度、风速、太阳辐射、光合有效辐射以及水汽压亏缺呈极显著正相关,与空气相对湿度呈极显著负相关,而与降雨量无显著相关性,这与刘国粹等^[17]对白天尾叶桉与气象因子的关系研究结果保持一致。熊伟等^[34]研究认为影响林木蒸腾的最主要的微气象因子是太阳辐射、空气相对湿度和气温,其中与冠层太阳辐射、饱和水汽压差、气温呈正相关关系,与空气湿度呈负相关关系,本研究的结果也与此观点保持一致。

本研究对 10 年生尾叶桉和湿加松林分蒸腾耗水量的研究表明:尾叶桉年平均单株耗水量为 12.79 L/d (1.59 mm/d),湿加松为 9.61 L/d (1.31 mm/d),林分年耗水量尾叶桉和湿加松分别为 582.16 mm 和 483.24 mm,分别占同期降雨量的 34.2% 和 28.4%。张宁南^[35]对河头、纪家 4a 生尾叶桉人工林耗水量研究中两林分日均耗水量分别为 1.49、1.53 mm/d,年耗水量为 542、559 mm,与本研究 10 年生林分耗水量相当,原因是 10 年生尾叶桉日平均液流速率小于 4 年生液流速率,但边材面积却显著大于 4 年生,综合起来,平均单株日耗水量两林龄相差不大。湿加松蒸腾耗水研究目前较少,但对 25 年生加勒比松蒸腾耗水量研究发现其日耗水量为 0.35—3.52 mm/d^[36];刘琪璟等^[37]对 20 年生湿地松耗水量研究发现,其林分年蒸腾量为 477 mm (1.31 mm/d)。

尾叶桉和湿加松旱雨季的蒸腾量也有较大差异,其中尾叶桉雨季蒸腾量为 350.76 mm,占年总蒸腾量的 60%,日平均耗水量为 1.91 mm/d,是旱季日均耗水量的 1.5 倍;而湿加松雨季蒸腾量 (313.04 mm) 是旱季蒸腾量的 1.84 倍。张宁南等^[35]对河头纪家尾叶桉旱雨季的蒸腾量研究中同样发现,两林分的日耗水量均是雨季显著大于旱季,这与本文的研究结果相一致。导致这一结果的原因是旱季土壤有效水的减少及较低的 VPD 等在不同程度上都限制了林木的耗水量。

参考文献 (References):

- [1] 尹立河,黄金廷,王晓勇,董佳秋,马洪云,张俊. 陕西榆林地区旱柳和小叶杨夜间树干液流变化特征分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(8): 85-90.
- [2] 凡超,邱燕萍,李志强,李建光,张邦跃,袁沛元. 荔枝树干液流速率与气象因子的关系. 生态学报, 2014, 34(9): 2401-2410.
- [3] 徐利岗,苗正伟,杜历,鲍子云,王怀博,李金泽. 干旱区枸杞树干液流变化特征及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(17): 5519-5527.
- [4] 温杰,陈云明,唐亚坤,吴旭,谢育利,崔高阳. 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. 应用生态学报, 2017, 28(3): 763-771.
- [5] 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.
- [6] 孙慧珍,周晓峰,康绍忠. 应用热技术研究树干液流进展. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1074-1078.
- [7] 隋旭红,张建军,文万荣. 晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究. 生态学报, 2011, 31(16): 4791-4798.
- [8] 聂立水,李吉跃,翟洪波. 油松、栓皮栎树干液流速率比较. 生态学报, 2005, 25(8): 1934-1940.
- [9] 张宁南,徐大平, Morris J, 周光益,周国逸,吴仲民. 雷州半岛尾叶桉人工林液流茎流特征的研究. 林业科学研究, 2003, 16(6): 661-667.
- [10] 栾启福,姜景民,张建忠,沈凤强,刘昭息. 国外松种间杂交育种及其 F₁ 代早期生长评价. 林业科学研究, 2008, 21(3): 314-319.
- [11] Nikles D G. Experience with some Pinus hybrids in Queensland, Australia//Dungey H S, Dieters M J, Nikles D G, eds. Proceedings of QFRI/CRC-SPF Symposium on Hybrid Breeding and Genetics of Forest Trees-Theme: case studies of hybrid breeding programs. Brisbane: QFRI/CRC-SPF, 2000: 27-43.
- [12] Nikles D G. The first 50 years of the evolution of forest tree improvement in Queensland[C]//Dieters M J, Matheson A C, Nikles D G, Harwood, C E, Walker, S M, eds. Proceedings of QFRI - IUFRO Conference on Tree Improvement for Sustainable Tropical Forestry. Australia: QFRI - IUFRO, 1996: 51-64.
- [13] 张应中,赵奋成,林军,赖旭恩,黄永权,蔡坚. 湿加松在粤北山区早期生长表现初报. 林业科学研究, 2007, 20(4): 556-562.
- [14] 潘志刚,管宁,韦善华,杨建林,王观明,陈斌. 我国南方杂交松生长和材性的研究. 林业科学研究, 1999, 12(4): 398-402.
- [15] 李义良,赵奋成,吴惠珊,张应中,李福明,钟岁英,李宪政,蔡坚. 湿加松亲本间遗传距离与杂种优势的相关性分析. 林业科学研究, 2012, 25(2): 138-143.
- [16] 时忠杰,徐大平,张宁南,邱志军,胡哲森,郭俊誉. 桉树人工林水文影响研究进展[J]. 林业科学, 2009, 45(11): 135-140.

- [17] 刘国粹, 杜阿朋, 赵知渊, 谢耀坚, 张婧. 雷州半岛尾叶桉人工林蒸腾耗水特征. 华中农业大学学报, 2015, 34(6): 27-32.
- [18] 张宁南, 徐大平, JIM Morris, 周光益, 白嘉雨, 周涛. 雷州半岛尾叶桉人工林耗水量研究[J]. 林业科学研究, 2007, 20(1): 1-5.
- [19] 孙振伟, 赵平, 牛俊峰, 倪广艳, 朱丽薇, 高建国, 赵秀华, 张振振, 周娟. 外来引种树种大叶相思和柠檬桉树干液流和蒸腾耗水的季节变异. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2588-2595.
- [20] 王志超, 竹万宽, 杜阿朋. 尾巨桉旱雨两季树干液流特征分析. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 319-325.
- [21] Vertessy R A, Hatton T J, Reece P, O'Sullivan S K, Benyon R G. Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique. Tree Physiology, 1997, 17(12): 747-756.
- [22] Wullschlegel S D, Hanson P J, Todd D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. Forest Ecology and Management, 2001, 143(1/3): 205-213.
- [23] 陈彪, 陈立欣, 刘清泉, 刘平生, 张志强. 半干旱地区城市环境下樟子松蒸腾特征及其对环境因子的响应. 生态学报, 2015, 35(15): 5076-5084.
- [24] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [25] 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. 生态学报, 2009, 29(7): 3970-3976.
- [26] 蒋文伟, 杨广远, 赵明水, 杨淑贞. 天目山柳杉树干液流的昼夜及季节变化. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(5): 77-80.
- [27] 刘春鹏. 河北省平山县石质山区主要造林树种耗水特征研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
- [28] 王志超, 杜阿朋. 尾巨桉树干液流动态及其影响因子分析. 东北林业大学学报, 2016, 44(5): 24-28.
- [29] Goldstein G, Andrade J L, Meinzer F C, Holbrook N M, Cavelier J, Jackson P, Celis A. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. Plant, Cell & Environment, 1998, 21(4): 397-406.
- [30] Snyder K A, Richards J H, Donovan L A. Night-time conductance in C_3 and C_4 species: do plants lose water at night? Journal of Experimental Botany, 2003, 54(383): 861-865.
- [31] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 张小由, 赵春彦. 胡杨的夜间蒸腾——来自树干液流、叶片气体交换及显微结构的证据. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 8-16.
- [32] 王小菲, 孙永玉, 李昆, 张春华, 李彬. 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. 林业科学研究, 2013, 26(2): 145-150.
- [33] 赵平, 邹绿柳, 饶兴权, 马玲, 倪广艳, 曾小平, 蔡锡安. 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化. 生态学报, 2011, 31(20): 6038-6048.
- [34] 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.
- [35] 张宁南. 广东桉树人工林耗水量研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [36] 张宁南, 徐大平, Morri S J, 杨曾奖, 周光益. 雷州半岛加勒比松人工林旱季液流特征与耗水量研究. 林业科学研究, 2007, 20(5): 591-597.
- [37] 刘琪璟, 曾慧卿, 马泽清. 江西千烟洲湿地松人工林碳蓄积及其与水分的关系. 生态学报, 2008, 28(11): 5322-5330.