

杉木幼树树干液流影响因子及其对杉木林蒸腾量的贡献

刘鑫, 张金池, 庄家尧, 顾哲衍, 韩诚, 吴雁雯

(南京林业大学 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 江苏 南京 210037)

摘要: 2012年9月至2013年8月,利用包裹式树干液流仪、插针式树干液流仪和小气象站对南京市东善桥林场的杉木幼树树干液流速率、杉木树干液流速率及环境因子进行了连续观测,研究了杉木幼树树干液流影响因子及其对杉木林蒸腾的贡献。结果表明:(1)杉木幼树液流速率的日变化具有季节差异性,均表现为单峰曲线并且日间液流速率大于夜间;(2)春、夏、秋、冬季液流速率峰值分别为:79.97,105.22,70.30,33.19 g/h;(3)太阳辐射是影响杉木幼树树干液流速率的主导因子,其次是饱和水汽压差,日液流量与太阳辐射、空气温度、饱和水汽压差、各层次土壤温度呈极显著的正相关关系;(4)分别建立了液流速率、日液流量与环境因子的模型,可以较好地解释液流速率与日液流量的变化;(5)杉木幼树全年液流量对杉木林蒸腾量的贡献率为6.12%,夏季的贡献率最大。

关键词: 杉木幼树;液流;环境因子;相关性;贡献率

文献标识码:A

文章编号:1000-288X(2014)06-0073-06

中图分类号:S715.4

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.021

Impact Factors of Sap Flow of Chinese Fir Sapling and Its Contribution to Transpiration of Chinese Fir Forest

LIU Xin, ZHANG Jin-chi, ZHUANG Jia-yao, GU Zhe-yan, HAN Cheng, WU Yan-wen

(*Jiangsu Key Laboratory of Soil and Water Conservation and*

Ecological Restoration, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: Based on the 12 months observation of the sap flow rate and environmental factors by using sap flow meter and mini weather station in Dongshanqiao Forest of Nanjing City from September 2012 to August 2013, the impact factors of the sap flow of Chinese fir sapling and its contribution to transpiration of Chinese fir forest was analyzed. Results indicated that: (1) The sap flow rate of Chinese fir sapling showed seasonal differences and the change of the sap flow rate took on a single-peak curve in different seasons. Sap flow rates in daytime were higher than those during the night. (2) The crest values of the sap flow rate in spring, summer, autumn and winter was 79.97, 105.22, 70.30, 33.19 g/h, respectively. (3) The dominant environmental factor of sap flow rate was solar radiation, the next was vapor pressure deficiency. The correlation between daily sap flow and solar radiation, air temperature, vapor pressure deficiency, soil temperature at all layers showed a significant positive correlation. (4) The models to relate the sap flow rate, daily sap flow with environmental factors were established. These models could better explain the change of the sap flow rate and daily sap flow. (5) The ratio of contribution of Chinese fir saplings sap flow throughout the year to the total transpiration of Chinese fir forest was 6.12%, and the ratio of contribution in summer was the largest.

Keywords: Chinese fir sapling; sap flow; environmental factors; correlation; contribution ratio

作为陆地生态系统水循环的主体,森林生态系统的水循环一直是林学、森林生态学、森林水文学等相关科学领域关注的焦点问题之一。蒸腾是森林植被耗水的主要方式,随着水资源的紧缺,国际社会对蒸

腾问题的研究日益重视^[1-2]。在土壤—植被—大气连续体水热传输过程中,树干液流的动态变化成为林分蒸腾研究的基础^[3-4]。近年来,国内外相关领域的学者们开展了很多关于树干液流特征的研究,研究对象

收稿日期:2013-11-26

修回日期:2013-12-01

资助项目:林业公益性行业科研专项“长三角水源区面源污染林业生态修复技术研究”(2011104055-1);国家自然科学基金项目(31170663);江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641)

作者简介:刘鑫(1988—),男(汉族),江苏省睢宁县人,硕士研究生,主要研究方向为森林水文、水土保持。E-mail:731845212@qq.com。

通信作者:张金池(1962—),男(汉族),山东省安丘县人,教授,博士生导师,主要从事林业生态工程、水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:zhang8811@njfu.edu.cn。

多属于单木尺度,如:Nicolas^[1],Zeppel^[5]等分别研究了成年杏树(*Armeniaca vulgaris*)、桉树(*Eucalyptus*)的液流特征;赵仲辉^[6]、乌日娜^[7]等分别研究了杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)液流变化及其与环境因子的关系;王艳兵^[8]、周翠鸣^[9]等分别研究了华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、广州荷木(*Schima superba*)夜间液流变化及其对蒸腾的贡献。通过单木液流测定实现林分蒸腾量的尺度转换同样是人们关注的热点^[10-11]。杉木为苏南丘陵区主要造林树种,分布广泛,并且杉木林内多分布萌生的幼树,为了更加准确地进行杉木林分尺度的蒸腾耗水研究,就不能忽视幼树的耗水情况。目前这方面的研究还鲜有报道,因此,本研究采用 Flow32 A-1 K 包裹式茎流仪对南京市东善桥林场铜山分场实验地中杉木林内幼树树干液流的特点及其与环境因子的关系进行分析,旨在为建立杉木幼树耗水机理模型、准确分析南方丘陵区杉木林分蒸腾耗水量提供基础数据和理论依据。

1 研究区概况

研究区位于南京市近郊国营东善桥林场铜山分场(31°35′—31°39′N,118°50′—118°52′E),距南京市 20 km。该区属北亚热带季风气候区,年均温 15.1℃,无霜期 229 d,年日照 2 199.5 h,区内气候温和湿润,四季分明,雨热资源比较丰富,生长季长,年平均降水量 1 100 mm,时间分布上多存在两个多雨期:一是春夏之交的梅雨,二是夏季的台风雨,为全国雨期最长的地区之一,十分有利于农作物和林木的生长。地形以丘陵为主,海拔在 38~388 m,森林类型以杉木、马尾松(*Pinus massoniana*)、麻栎(*Heterocyclus acutisima*)、毛竹(*Phyllostachys*)为主。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验地选在 42 年生杉木林,林下幼树平均树高为 2.0 m,平均胸径为 2.3 cm,密度为 2 032 株/hm²,平均坡度为 22°。土壤类型为黄棕壤。选择 3 株冠型良好,生长健康的杉木幼树,具体参数详见表 1。

表 1 杉木幼树的生长情况

样树编号	胸径/cm	树高/m	冠幅/cm
1	1.0	1.23	35
2	1.6	1.89	37
3	2.5	2.45	40

2.2 试验方法

2.2.1 树干液流仪安装与测定 用 Flow32 A-1K 包裹式茎流仪对树干液流进行测定。测定前,用砂纸轻轻将被测样木的茎干打磨光滑,然后用胸径尺测定树干直径,之后在打磨好的安装区抹上 G4 油脂,仔细将包裹式探头安装于被测区,用铝箔包裹,以防止太阳辐射,最后用胶带和玻璃胶密封,防止雨水进入。将探头与数据传输的电缆线与数据采集器相应的接口连接,数据采集器的电源线与 12 V 电池接通,通过计算机与数据采集器连接。将测定样木的茎干类型、面积、探头电压、起始时间、数据记录的间隔等参数输入到数据采集器,然后定期用电脑采集数据。本研究数据扫描间隔为 10 s,每 30 min 进行平均值计算并储存。

Flow32-1K 包裹式茎流利用能量平衡原理,即输入热量(P_{in})等于各部分耗散热量(Q_f, Q_v, Q_r)之和。主要计算公式有:

$$(1) \text{ 茎流带走的热量计算公式: } Q_f = P_{in} - Q_r - Q_v$$

$$(2) \text{ 竖向茎杆传导的热量计算公式:}$$

$$Q_v = \frac{K_{st} A_{rea} (BH - AH)}{0.04}$$

$$(3) \text{ 径向茎杆传导的热量计算公式: } Q_r = K_{sh} CH$$

$$(4) \text{ 茎杆鞘传导速率的计算公式:}$$

$$K_{sh} = \frac{P_{in} - Q_v}{CH} \text{ (此公式仅限植物茎杆茎流为零时)}$$

$$(5) \text{ 茎流速率的计算公式: } F = \frac{P_{in} - Q_r - Q_v}{C_p d_T}$$

式中: P_{in} ——热量输入; Q_f ——茎流带走的热量; Q_r ——径向散热; Q_v ——竖向导热; C_p ——水的比热; C ——径向热电堆电压; A ——竖向热电偶电压; B ——竖向热电偶电压; H ——加热电压; K_{st} ——茎杆热传导速率(经验值); K_{sh} ——鞘传导速率(调零计算值); A_{rea} ——茎杆横截面积; d_T ——竖向两热电偶电压和的平均值; F ——茎流速率(g/h)。

在能量平衡方程中,木本、禾本、空心植物类型对应的轴向热传导常数 K_{st} 分别为 0.42, 0.54, 0.28。杉木属于木本植物,因此 K_{st} 取 0.42。

2.2.2 各环境因子测定 使用小气象站进行各环境因子的连续测定,存储 30 min 的均值,此次测定的环境因子有太阳辐射 R_s (W/m²)、空气相对湿度 R_{Ha} (%)、空气温度 T_a (°C)、风速 W_s (m/s)、土壤含水率 S_{MC} (%)、土壤温度 T_s (°C)。

饱和水汽压差(V_{pd})是当时温度下空气中的饱和水汽压(e_s)与实际水汽压(e_a)之间的差值,可由公式^[12]计算得出:

$$V_{pd} = e_s - e_a = (1 - R_{Ha})e_s$$

$$e_s = 0.610 \cdot 8e^{\frac{17.27T_a}{T_a + 273.3}}$$

式中: V_{pd} ——饱和水汽压差(kPa); R_{Ha} ——空气相对湿度(%); T_a ——空气温度(°C)。

2.2.3 数据处理 采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行数据处理和统计分析。

3 结果与分析

3.1 树干液流变化特征

3.1.1 杉木幼树、成龄树液流速率昼夜变化特征

由图 1 可以看出,春、夏、秋、冬四季杉木幼树、成龄树液流速率的昼夜变化特征具有显著的季节差异性。夏季,杉木幼树、成龄树液流速率最大,幼树液流开始时间为 5:00 左右,峰值出现的时间为 11:00(105.22 g/h),在 20:00 降到平稳状态,成龄树开始时间为 6:00 左右,达到峰值时间为 2:00 左右(3 516.52 g/h)。春季,杉木幼树从 5:00—6:00 左右开始逐渐上升,在

10:30 达到峰值(79.97 g/h),在 19:30 降到平稳状态,秋季与冬季幼树液流启动时间都较晚,秋季启动时间为 8:00,在 11:30 达到峰值(70.30 g/h),在 17:00 左右液流基本降低为 0,冬季启动时间为 8:30,峰值时间为 13:00(33.19 g/h),在 16:30 左右液流基本降为 0。春、秋、冬季杉木成龄树液流速率分别开始于 10:00,10:00 和 12:00 并稳步升高,峰值均出现在 16:00 左右,分别为 1 171.64, 2 102.52, 794.79 g/h。不同季节,杉木幼树液流速率均表现为单峰曲线并且日间液流速率大于夜间,其中春、夏季夜间液流明显,秋、冬季夜间液流较低,主要是因为,春、夏季日间液流较大,蒸腾耗水量较大,夜间通过吸收水分补充树木生理活动所必须的水分。春、夏、秋、冬季杉木幼树液流速率启动的时间均早于成龄树,并且达到峰值的时间同样早于成龄树,不同季节幼树液流速率峰值分别约为成龄树液流速率峰值的 6.83%, 2.99%, 3.34%, 4.18%。

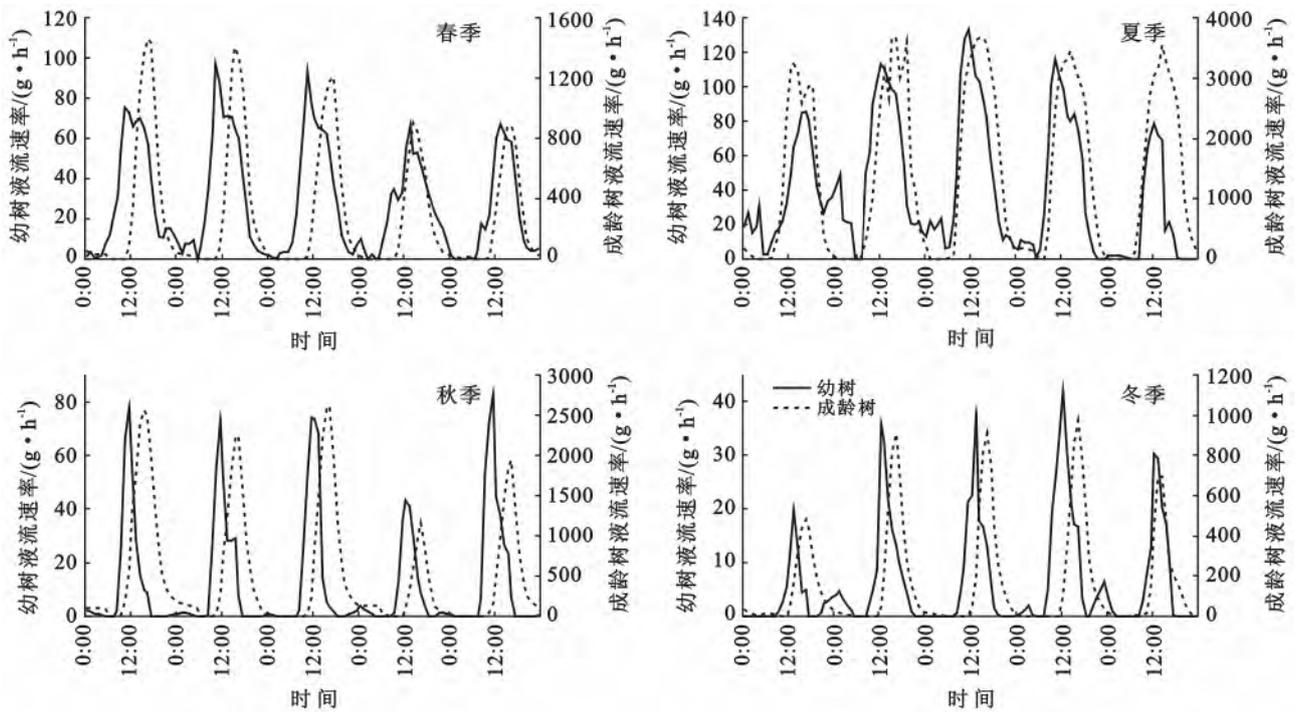


图 1 不同季节树干液流速率昼夜变化特征

3.1.2 树干液流量变化特征及其对杉木林总液流量的贡献 不同季节杉木幼树日液流量表现出显著的季节性差异(图 2),夏季日液流量最大,平均约为 0.168 mm/d,其次是春季,约为 0.133 mm/d,秋冬季分别为 0.063 和 0.031 mm/d。

由图 3 可知,春、夏、秋、冬四季杉木幼树与杉木成林的夏季液流量最大,杉木成林液流量为 170.94 mm,杉木幼树液流量为 15.41 mm,秋季杉木成林液

流量仅次于夏季,约为 157.11 mm,春季杉木幼树液流量仅次于夏季,约为 10.07 mm,冬季液流量最低,杉木成林为 61.53 mm,杉木幼树为 2.75 mm。各季节杉木幼树液流量对杉木林液流量的贡献率分别为 7.09%, 8.27%, 3.54%, 4.29%, 全年总贡献率为 6.12%。说明杉木幼树的蒸腾对于杉木林总体蒸腾量具有重要的作用,在估算杉木林蒸腾耗水及造林安排时不可忽视。

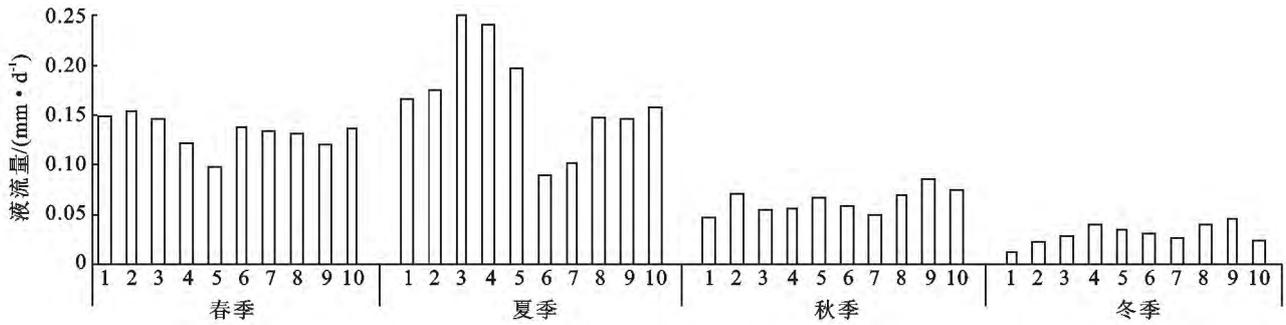


图 2 杉木幼树日液流量变化特征

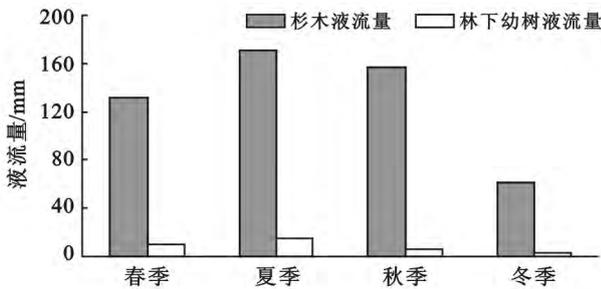


图 3 不同季节杉木液流量

3.2 树干液流影响因素分析

3.2.1 液流速率影响因素分析 众多学者研究发现树干液流速率与饱和水汽压差、太阳辐射、空气温度等环境因子的关系显著,可以较好地解释树干液流速率的变化,黄德卫等^[3]得出液流速率变化与光合有效辐射、水汽压亏缺和气温等环境因子的变化呈显著正相关;张刚华等^[13]发现边材液流速率与太阳辐射、空气温度、蒸汽压亏缺、林内风速呈极显著正相关,与空气相对湿度呈极显著负相关;丁访军等^[14]认为影响毛竹生长季和非生长季的主要因子分别是光合有效辐射、空气温度。表 2—3 分别分析了杉木幼树液流速率与气象因子与土壤因子的相关性,气象因子主要影响冠层,土壤因子主要影响根部吸水,通过比较可以明显看出,杉木幼树液流速率与气象因子的相关性要强于土壤因子,主要是因为气象因子直接影响杉木

叶片的蒸腾作用。不同季节,太阳辐射均是影响杉木幼树液流速率的主导因子,空气温度是影响春季液流速率的第二因子,夏、秋、冬季饱和水汽压差则是第二影响因子。

春季,液流速率与各深度的土壤含水率呈极显著的负相关关系,与土壤温度则是呈现极显著的正相关关系,其中分别与 40 cm 土壤含水率和 5 cm 土壤温度的相关系数最大。夏、秋季液流速率与土壤含水率的相关性不显著,夏季液流速率与 5 cm 土壤温度呈现正相关关系,秋季则呈现负相关关系,夏、秋季液流速率与 10, 15, 40 cm 土壤温度呈现负相关关系。冬季液流速率与 5 cm 土壤温度和 10, 15, 40 cm 土壤含水率呈现正相关关系,其中,与 40 cm 的相关性最大,主要是幼树根系分布有关。由此可以看出,土壤因子对杉木幼树液流速率的影响存在显著的季节性差异。

表 2 液流速率与气象因子的 Pearson 相关系数

季节	R_s	V_{pd}	T_a	W_s	W_d
春季	0.853**	0.626**	0.659**	0.606**	0.041
夏季	0.869**	0.714**	0.706**	0.600**	-0.033
秋季	0.803**	0.579**	0.514**	0.437**	0.312**
冬季	0.870**	0.757**	0.647**	0.648**	0.156**

注: R_s 为太阳辐射; V_{pd} 为饱和水汽压差; T_a 为空气温度; W_s 为风速; W_d 为风向。**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,下同。

表 3 液流速率与土壤因子的 Pearson 相关系数

季节	S_{wc5}	T_{5s}	S_{wc10}	T_{10s}	S_{wc15}	T_{15s}	S_{wc40}	T_{40s}
春季	-0.270**	0.342**	-0.309**	0.264**	-0.324**	0.254**	-0.325**	0.274**
夏季	-0.015	0.091*	0.030	-0.107*	0.025	-0.173**	0.034	-0.169**
秋季	0.014	-0.113*	-0.005	-0.199**	-0.029	-0.176**	-0.018	-0.132**
冬季	0.007	0.117*	0.096*	0.015	0.135**	-0.009	0.143**	0.014

注: S_{wc5} 为 5 cm 土壤含水率; T_{5s} 为 5 cm 土壤温度; S_{wc10} 为 10 cm 土壤含水率; T_{10s} 为 10 cm 土壤温度; S_{wc15} 为 15 cm 土壤含水率; T_{15s} 为 15 cm 土壤温度; S_{wc40} 为 40 cm 土壤含水率; T_{40s} 为 40 cm 土壤温度。下同。

通过相关性分析可以看出,环境因子对杉木幼树的液流速率影响显著,因此可以通过环境因子对其进

行一定的预测,以杉木幼树液流速率为因变量 $Y(g/h)$, 太阳辐射 $R_s(W/m^2)$, 空气温度 $T_a(^\circ C)$, 饱和水汽压

差 V_{pd} (kPa), 风速 W_s (m/s), 风向 W_d ($^{\circ}$), 土壤含水率 ($S_{wc5}, S_{wc10}, S_{wc15}, S_{wc40}, \%$), 土壤温度 ($T_{5s}, T_{10s}, T_{15s}, T_{40s}, ^{\circ}C$) 为自变量, 采用逐步剔除法进行多元回归分析, 建立杉木幼树液流速率与环境因子的回归模型, 各模型的 F 检验以及常数、系数的 t 检验均是极

显著, 而且通过残差分析, 模型详见表 4。春、夏季液流速率与环境因子的拟合模型的决定系数 R^2 均在 0.85 左右, 说明利用环境因子对春、夏季杉木幼树液流速率的预测效果最好, 秋、冬季的 R^2 分别为 0.663 和 0.788, 也可以较好地解释液流速率的变化。

表 4 液流速率与环境因子的多元回归模型

季节	多元线性回归模型	决定系数
春季	$Y = -19.834 + 0.062R_s + 0.392T_a + 8.352W_s + 1.427T_{5s}$	$R^2 = 0.844$
夏季	$Y = 95.167 + 0.064R_s + 4.035T_a + 213.38S_{wc10} - 8.673T_{10s}$	$R^2 = 0.857$
秋季	$Y = 628.1 + 0.087R_s + 1088.727S_{wc5} - 1724.6S_{wc10} - 2958.163S_{wc15}$	$R^2 = 0.663$
冬季	$Y = -1.647 + 0.032R_s + 1.034T_a - 3.479T_{5s} + 3.363T_{40s}$	$R^2 = 0.788$

3.2.2 日液流量影响因子分析 由表 5 可以看出, 杉木幼树日液流量与环境因子的相关性与液流速率存在显著差异, 日液流量与太阳辐射、空气温度、饱和水汽压差、各层次土壤温度呈极显著的正相关关系, 与其它环境因子的相关性则不显著, 其中与空气温度、5 cm 土壤温度的相关性最大, 与液流速率影响因子相比最大的差异在于土壤温度的影响变大, 主要是因为土壤因子直接影响根吸收水分的多少。

表 5 日液流量与环境因子的 Person 相关性

R_s	T_a	V_{pd}	T_{5s}	T_{10s}	T_{15s}	T_{40s}
0.631**	0.829**	0.492**	0.801**	0.795**	0.755**	0.720**

注:表中各数据表示各因子全在 0.01 水平显著相关。

为了进一步说明日液流量与环境因子的关系, 以杉木幼树日液流量为因变量 Y (mm/d), 太阳辐射 R_s (W/m^2), 空气温度 T_a ($^{\circ}C$), 饱和水汽压差 V_{pd} (kPa), 土壤温度 ($T_{5s}, T_{10s}, T_{15s}, T_{40s}, ^{\circ}C$) 为自变量, 分别采用曲线估计与多元线性回归分析, 建立日液流量与环境因子的回归模型, 各模型详见表 6。曲线估计分析结果显示, 杉木幼树日液流量与太阳辐射、空气温度之间呈现指数函数关系, 与饱和水汽压差、土壤温度则呈现幂函数关系, 其中, 与 5 cm 土壤温度的拟合模型的决定系数最大, 为 0.725。逐步剔除法多元线性回归模型的决定系数达到 0.799, 相比较曲线估计可以更好地解释日液流量的变化。

表 6 杉木幼树日液流量与环境因子的拟合模型

模型类型	变量	模型	决定系数 R^2	显著性
指数函数	太阳辐射	$Y = 0.0229e^{0.0002R_s}$	0.419	0.000
指数函数	空气温度	$Y = 0.0226e^{0.0752T_a}$	0.696	0.000
幂函数	饱和水汽压差	$Y = 0.1452V_{pd}^{0.7529}$	0.451	0.000
幂函数	5 cm 土壤温度	$Y = 0.0014T_{5s}^{507.2}$	0.725	0.000
幂函数	10 cm 土壤温度	$Y = 0.0006T_{10s}^{743.2}$	0.719	0.000
幂函数	15 cm 土壤温度	$Y = 0.0021T_{15s}^{402.8}$	0.668	0.000
幂函数	40 cm 土壤温度	$Y = 0.0019T_{40s}^{435.7}$	0.627	0.000
多元线性	太阳辐射、空气温度、饱和水汽压差	$Y = -0.0465 + 0.0057T_a + 9.2E-6R_s - 0.0414V_{pd}$	0.799	0.000

4 讨论与结论

(1) 杉木幼树液流速率的日变化特征具有显著的季节差异性, 由春季到冬季液流速率达到峰值的时间逐渐退后, 与丁访军等^[15]研究毛竹液流速率达到峰值的时间略有差异, 夏季液流速率最大, 其次是春季, 冬季液流速率最小, 并且春、夏季液流速率变化曲线显著宽于秋、冬季。春、夏、秋、冬季液流速率变化曲线均表现为单峰曲线, 并且夜间测得一定的液流变化, 这与曹恭祥^[4]等研究华山松、蒋文伟^[15]等研究柳

杉和李妙伶等^[16]研究梭梭树的结果相一致, 但春、夏季夜间液流变化较明显。

(2) 杉木幼树液流速率与气象因子的相关性要强于土壤因子, 春、夏、秋、冬季太阳辐射均是主导因子, 与影响杨树^[17]、马占相思^[18]液流的主导因子是光合有效辐射的研究结果相一致, 土壤因子对杉木幼树液流速率的影响存在显著的季节性差异。

(3) 杉木幼树日液流量与太阳辐射、空气温度、饱和水汽压差、各层次土壤温度呈极显著的正相关关系, 其中, 与空气温度、土壤温度的相关性最强, 与其

它环境因子的相关性则不显著,与赵仲辉等^[6]研究湖南杉木日液流量影响因子的结果相一致,而桑玉强^[19]等研究栓皮栎人工林认为太阳辐射在各时间尺度上与液流密度的相关性均最高。另外,分别建立了杉木幼树日液流量与各因子的曲线模型及多元线性回归模型,其中,与 5 cm 深土壤温度建立的幂函数模型和多元线性回归模型的决定系数较大,可以更好地解释杉木幼树日液流量的变化。

(4) 森林的蒸腾耗水主要来自于乔木层,在进行单木尺度到林分尺度扩展时则往往会忽视林下乔木及灌木对蒸腾的贡献,本研究结果表明杉木幼树全年液流量对苏南丘陵区的杉木林蒸腾量的贡献率为 6.12%,夏季的贡献率最大达到 8.27%。王艳兵等^[8]在研究夜间液流量对整个生长季的蒸腾贡献率达到 7.22%,这与树木幼树对林分的蒸腾贡献基本相当,因此,在经营管理苏南丘陵杉木林必须考虑幼树对水分需求的影响,否则会极大的影响地区的林木生长。

[参 考 文 献]

- [1] Nicolas E, Torrecillas A, Ortuno M F, et al. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 72(2): 131-145.
- [2] 谢恒星,张振华,杨润亚,等. 龙爪槐树干液流相对于气象因子的滞后效应分析[J]. *林业科学*, 2007, 43(5): 106-110.
- [3] 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.
- [4] 曹恭祥,熊伟,王彦辉,等. 宁夏六盘山华山松树干液流的动态研究[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2010, 31(2): 42-47.
- [5] Zeppel M, Tissue D, Taylor D, et al. Rates of nocturnal transpiration in two evergreen temperate woodland species with differing water-use strategies [J]. *Tree Physiology*, 2010, 30(8): 988-1000.
- [6] 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.
- [7] 乌日娜,丁国栋,吴斌,等. 沙木蓼蒸腾耗水特性及环境影响因子研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 68-72.
- [8] 王艳兵,德永军,熊伟,等. 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1375-1385.
- [9] 周翠鸣,赵平,倪广艳,等. 广州地区荷木夜间树干液流补水的影响因子及其对蒸腾的贡献[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1751-1757.
- [10] Pfautsch S, Bleby T M, Rennenberg H, et al. Sap flow measurements reveal influence of temperature and stand structure on water use of *Eucalyptus regnans* forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(6): 1190-1199.
- [11] 熊伟,王彦辉,于澎湃,等. 华北落叶松树干液流的个体差异和林分蒸腾估计的尺度上推[J]. *林业科学*, 2008, 44(1): 34-40.
- [12] Campbell G S, Norman J M. *An Introduction to Environmental Biophysics* [M]. 2nd ed. New York: Springer Verlag, 1998.
- [13] 张刚华,陈步峰,聂洁珠,等. 热带山地雨林尖峰栲边材液流及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 742-748.
- [14] 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): 73-80.
- [15] 蒋文伟,郭运雪,杨淑贞,等. 天目山柳杉树干液流动态及其与环境因子的关系[J]. *江西农业大学学报*, 2011, 33(5): 899-905.
- [16] 李妙伶,周宏飞,孙鹏飞. 准噶尔盆地南缘梭梭树干液流规律比较[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(1): 101-108.
- [17] 张金池,黄夏银,鲁小珍. 徐淮平原农田防护林带杨树树干液流研究[J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(4): 21-25.
- [18] 王华,赵平,蔡锡安,等. 马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺间的时滞效应[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 225-230.
- [19] 桑玉强,张劲松,孟平,等. 栓皮栎人工林树干液流对不同时间尺度气象因子及水面蒸发的响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6661-6668.