

江西千烟洲杉木生长季树干液流特征及影响因子

涂洁¹, 胡良¹, 刘琪琛², 危骏¹

(1. 南昌工程学院 生态与环境科学研究所, 江西 南昌 330099; 2. 北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要: 运用 Granier 热扩散法对杉木 *Cunninghamia lanceolata* 树干液流速率进行测定, 并结合自动气象站同步连续监测太阳辐射、空气温度、空气相对湿度等气象因子, 为杉木人工林的可持续经营和林地水资源的有效管理提供理论依据。结果表明: ①晴天液流为典型的单峰曲线, 呈明显的季节变化规律, 表现为开始启动、到达峰值和保持较大速率的时间不同。雨天液流速率明显低于同时期晴天液流水平, 且液流变化节律因降雨时段不同存在差异。②不同月份杉木平均液流速率大小关系依次为: 7 月 ($0.001\ 012\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) > 6 月 ($0.000\ 999\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) > 8 月 ($0.000\ 941\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) > 9 月 ($0.000\ 930\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) > 5 月 ($0.000\ 731\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) > 4 月 ($0.000\ 628\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) > 10 月 ($0.000\ 494\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)。③生长季液流速率对平均净辐射的响应存在逆时针方向 1 h 的时滞, 对空气温度、空气相对湿度、水汽压亏缺的响应存在顺时针方向 2 h 的时滞。液流速率与平均净辐射、空气温度、水汽压亏缺呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与空气相对湿度呈显著负相关 ($P < 0.05$), 气象因子对液流速率的影响程度存在季节差异。在考虑时滞效应的情况下, 建立各月液流速率与气象因子的多元线性回归方程, 经 F 值检验, 均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 决定系数 R^2 为 0.95 左右。图 3 表 2 参 32

关键词: 植物学; 杉木; 树干液流; 季节变化; 气象因子

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)02-0257-07

Sap flow characteristics during the growing season for *Cunninghamia lanceolata* in red soil areas of Jiangxi Province

TU Jie¹, HU Liang¹, LIU Qijing², WEI Jun¹

(1. Research Institute of Ecology & Environmental Sciences, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, Jiangxi, China; 2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: As an excellent pioneer tree species, *Cunninghamia lanceolata* has been widely planted for ecological reforestation in red soil areas of subtropical China. To evaluate the ability of *C. lanceolata* for utilization and adjustment of available environmental water during reforestation in degraded red soil areas, and ultimately provide a theoretical basis for suitable tree species selection and stand structure configuration, sap flow velocity (J_s) was measured with the thermal dissipation probe method at Qianyanzhou Experimental Station of Jiangxi Province. Also, several related environmental factors, including average net radiation (ANR), air temperature (T_a), and relative air humidity (RH) were recorded continuously using an automatic weather station. A correlation analysis, an analysis of variance (ANOVA), and a regression analysis were used on the data. Results showed that (1) Diurnal variations of sap flow displayed typical single-peaked curves on sunny days. Obvious seasonal dynamics were found mainly because of different starting times, peak times, and durations of time at relatively high levels of sap flow velocity. Furthermore, based on the same time point, sap flow velocity was much lower on rainy days than that on sunny days, and diurnal changes of sap flow exhibited strong differences due to intervals between precipitation. (2) The average monthly sap flow velocity follows the order of July

收稿日期: 2014-04-22; 修回日期: 2014-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31260172); 江西省大学生创新创业训练计划项目(201311319039)

作者简介: 涂洁, 副教授, 博士, 从事区域生态生产力研究。E-mail: tujie8058@163.com

(0.001 012 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), June(0.000 999 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), August(0.000 941 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), September(0.000 930 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), May (0.000 731 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), April (0.000 628 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), October (0.000 494 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$). (3) About a 1 h time lag existed between Js and ANR in a clockwise direction; and a 2 h time lag was found between Js and Ta, RH, and vapor pressure deficit (VPD) in a counter-clockwise direction. Js was positively correlated with ANR ($r = 0.495-0.781$), Ta ($r = 0.752-0.878$), and VPD ($r = 0.712-0.933$), but negatively correlated with RH ($r = -0.790--0.978$); the ANOVAs were also significant. However, the influence of meteorological factors on Js differed. In the cases the time lag effect contained, multi-linear regression patterns between monthly Js and factors were all significant at $F = 0.01$ with the coefficients of determination (R^2) as high as 0.95. [Ch, 3 fig. 2 tab. 32 ref.]

Key words: botany; *Cunninghamia lanceolata*; sap flow; seasonal changes; meteorological factors

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国南方亚热带地区重要的造林树种, 具有生长快, 材质好, 单产高等优点, 在该区植被恢复重建中占有十分重要的地位。长期以来对杉木的关注主要集中在生物量及生产力^[1-2]、凋落物分解及养分归还^[3-5]、土壤理化性质^[6-7]、土壤微生物^[8-9]、土壤呼吸^[10-11]以及水文生态效益^[12-13]等方面, 对杉木蒸腾耗水规律的研究仅见赵忠辉等^[14]和史梅娟等^[15]对杉木液流变化及其与环境因子关系的报道。植被蒸腾耗水特征是确定植物空间配置及植被恢复目标的重要依据, 而树干液流是植物蒸腾耗水的一个重要衡量指标, 因此, 研究树干液流具有重要的实践意义。热扩散探针法可以通过自然状态下连续测定树干液流, 测得的数据能够准确反映水分在植物体内的传输速率, 由此可以测算植株个体或整个林分的蒸腾速率^[16]。大量研究表明: 液流速率除受自身生理学特性^[17-18]和土壤供水^[19]制约外, 还受气象因子^[14,20-21]影响。因此, 系统研究并掌握环境因子的变化规律及其对树干液流的影响, 对于建立科学合理的林木耗水模型具有非常重要的意义。以江西省典型代表性造林树种杉木为研究对象, 采用热扩散式探针法对其树干液流及相关气象因子进行长期同步观测, 探讨杉木生长季液流日、季变化特征及其对气象因子的响应, 为杉木人工林的可持续经营和林地水资源的有效管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究地位于江西省泰和县中国科学院千烟洲试验站(26°44'48"N, 115°04'1"E), 海拔 100 m 左右, 相对高度为 20~50 m, 属典型的红壤丘陵地貌。区内年均气温为 17.9 °C, ≥ 0 °C 活动积温 6 523 °C, 年日照时数 1 406 h, 太阳总辐射量 4 223 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 无霜期 323 d。年均降水量 1 542 mm, 其中 4~6 月降水量约占全年的一半, 7~8 月高温少雨, 易出现伏旱, 年均相对湿度 84%, 具有典型亚热带季风气候特征。样地设在试验站 1985 年前后营造的风景林针阔混交林内, 面积为 149.19 m^2 , 郁闭度 0.9 以上。乔木层是以杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 马尾松 *Pinus massoniana*, 木荷 *Schima superba*, 枫香 *Liquidambar formosana* 等为主的混交林, 林下分布有少量山矾 *Symplocos sumuntia* 和黄檀 *Dalbergia hupeana* 等。

2 研究方法

2.1 树干液流和气象因子的测定

根据热设计功耗(TDP)探头的长度和被测木具有代表性的原则, 选取生长良好、树干通直、无被挤压的 22 年生杉木 3 株作为试验材料安装液流计, 具体参数见表 1。

表 1 样木基本情况

Table 1 General conditions of the sample trees

树号	胸径/cm	树高/m	心材厚度/cm	边材厚度/cm	边材面积/ cm^2	密度/(株 $\cdot\text{hm}^{-2}$)
1	23.1	17.5	9.1	11.2	329	1 898
2	22.6	17.2	8.4	11.9	342	1 927
3	23.5	18.0	9.8	10.8	328	1 882

在被测木树干 1.3 m 处安装 TDP 探针(型号 TDP-30, Dynamax 公司, 美国), 另一端与数据采集器(DT-50, Data Taker 公司, 澳大利亚)连接, 液流观测时间为 2008 年 4 月至 2008 年 10 月。采用自动气

象站记录空气温度(T_a), 空气相对湿度(H_R), 平均净辐射(R_{AN})等环境因子, 数据采集时间与液流计同步(数据采集间隔 30 min)。为了综合表达空气温度与空气相对湿度的协同效应, 采用 Campbell^[22]的方法计算水汽压亏缺(D_{VP})。

树干液流速率 $v(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ 由 Granier 经验公式计算得到。 $v=0.0119 \times (\frac{\Delta T_{\max}-\Delta T}{\Delta T})^{1.231}$ 。其中: ΔT 为 2 根探针间的温差, ΔT_{\max} 为连续 7~10 d 所测液流数据中的最大值^[23]。

2.2 数据处理

利用 Dynamax 公司提供的软件进行数据下载和保存, 采用 SPSS 16.0 和 KaleidaGraph 3.6 分析数据和绘图。

3 结果分析

3.1 液流速率季节变化规律

选取杉木生长季典型天气(晴天、雨天)液流数据分析液流日变化(图 1 和图 2)。

晴天(图 1): 杉木生长季各月晴天液流日变化为典型的“昼高夜低”单峰曲线, 呈现出明显的季节变化规律, 表现在开始启动、到达峰值和保持较大速率的时间不同。6 月和 7 月最早启动, 8:00 左右, 比其他月份提前 1.0~2.0 h, 10 月启动时间推迟到 11:00。6 月和 7 月到达峰值的时间最早, 约 11:30, 并且保持较大液流速率($0.0026 \pm 0.0002 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)的时间长达 6 h。除 4 月和 10 月到达峰值的时间推迟到 17:00 以后, 其他月份到达峰值的时间基本在 13:00 左右。5 月和 8 月到达峰值后分别保持较大液流速率($0.0025 \pm 0.0001 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)和($0.0028 \pm 0.0001 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)5 h 以上。

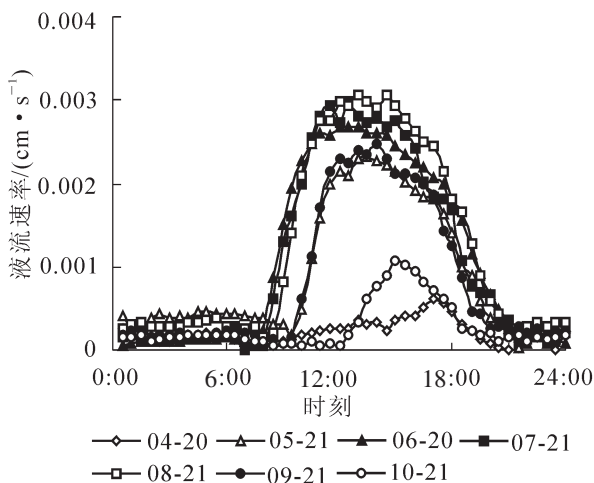


图 1 杉木晴天液流速率日变化

Figure 1 Diurnal variations of sap flow velocity of *Cunninghamia lanceolata* in sunny days

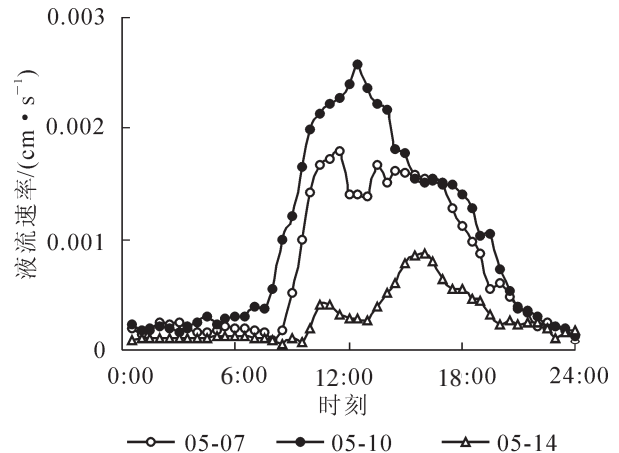


图 2 杉木雨天液流速率日变化

Figure 2 Diurnal variations of sap flow velocity of *Cunninghamia lanceolata* in rainy days

雨天(图 2): 由于降雨时段不同, 杉木雨天液流日变化表现出显著性差异。根据当时的气象资料, 5 月 7 日降雨主要集中在 7:00 以前, 虽然此时液流活动尚未正式启动, 但此时较弱的太阳辐射($<18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)和较高的空气相对湿度($>98\%$)会抑制液流启动和上升, 液流直至 9:00 才正式启动, 之后呈单峰型变化。5 月 10 日降雨主要集中在 19:00 以后, 此时液流活动基本已经结束, 降雨对液流活动没有影响, 液流 8:00 启动、12:00 到达峰值以及 16:00 之后迅速下降。5 月 14 日全天降雨, 由于太阳辐射弱($<20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 空气相对湿度高($>99\%$), 极大地降低了叶片气孔内外的蒸汽压梯度, 导致液流无明显的启动, 一直处于无规律的小幅波动。雨天液流速率明显低于同时期晴天液流水平。

选取生长季(4~10 月)液流数据, 结合主要环境因子的月变化曲线(图 3), 分析杉木液流速率的月变化规律。将每月测定结果相加求其平均值, 得到不同月份杉木平均液流速率($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)大小关系依次为: 7 月(0.002843 ± 0.000400), 8 月(0.002675 ± 0.000400), 6 月(0.002158 ± 0.000400), 5 月(0.001959 ± 0.000300), 9 月(0.001594 ± 0.000100), 4 月(0.001194 ± 0.000100), 10 月(0.000849 ± 0.000100)。

4 月树木刚刚从休眠状态恢复, 气温较低, 降水量较少, 液流速率较低。进入 5 月, 气温、土温回升, 树木进入生长季, 需要吸收大量水分完成体内的各种新陈代谢, 液流速率因此有了较大幅度的提高。虽然 8 月气温、土温、太阳辐射强度均达到 1 年中的最高值, 但由于 7 月刚经过雨季, 土壤供水充足, 同时具备了充分的水分供给和较强的蒸腾拉力, 有利于植物的蒸腾, 因此平均液流速率最大值出现在 7 月。进入 10 月, 随着光照强度的减弱和温度的降低, 树体代谢减慢, 蒸腾速率也随之降低。

3.2 液流速率对气象因子的响应

选取典型代表月份 4 月、7 月和 10 月连续 10 d 逐小时液流数据和气象数据, 将液流速率与平均净辐射、空气温度、空气相对湿度、水汽压亏缺按 30 min 进行逐行错位对应分析, 分析错位移动后数据的相关关系。当相关系数达到最大值时, 所对应的错位时间为液流速率与以各气象因子的时滞时间^[24]。分析结果表明: 液流速率对平均净辐射存在逆时针方向 1 h 的时滞, 对空气温度、空气相对湿度、水汽压亏缺存在顺时针方向 2 h 的时滞。在考虑时滞效应的情况下, 对树干液流与气象因子进行偏相关分析(表 2)。液流速率与平均净辐射、空气温度、水汽压亏缺呈显著正相关, 与空气相对湿度呈显著负相关, 说明这 4 个气象因子对杉木生长季各月液流速率的影响作用趋势一致。根据相关系数绝对值的大小, 4 月各气象因子对杉木液流速率的影响程度大小依次为空气相对湿度 (-0.978**) > 水汽压亏缺 (0.911**) > 空气温度 (0.878**) > 平均净辐射 (0.495**), 7 月为空气温度 (0.838**) > 空气相对湿度 (-0.790**) > 平均净辐射 (0.781**) > 水汽压亏缺 (0.712**), 10 月为空气相对湿度 (-0.930**) > 水汽压亏缺 (0.933**) > 空气温度 (0.752**) > 平均净辐射 (0.519**)。由此看出, 杉木生长季液流速率的主导气象因子存在季节差异。

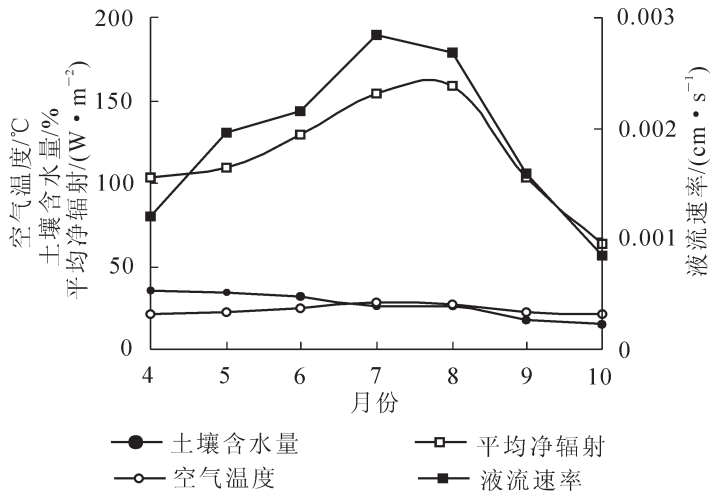


图 3 生长季液流及环境因子月变化

Figure 3 Monthly variations of sap flow and environmental factors during growing season

表 2 杉木生长季不同时期树干液流速率与气象因子的偏相关分析

Table 2 Partial correlation analysis between sap flow velocity of *Cunninghamia lanceolata* and meteorological factors in growing season

控制变量	分析变量	偏相关系数		
		4 月	7 月	10 月
气温、相对湿度、水汽压亏缺	平均净辐射 R_{AN}	0.495**	0.781**	0.519**
相对湿度、水汽压亏缺、平均净辐射	气温 T	0.878**	0.838**	0.752**
气温、平均净辐射、水汽压亏缺	相对湿度 H_R	-0.978**	-0.790**	-0.930**
气温、平均净辐射、相对湿度	水汽压亏缺 D_{VP}	0.911**	0.712**	0.933**

说明: ** 为 0.01 水平上显著相关。

为了更好地揭示气象因子对液流速率的综合影响, 以 0.01 的可靠性作为入选和剔除临界值, 在考虑时滞效应的情况下, 建立杉木生长季各月液流速率与气象因子的多元回归模型。其中, 4 月和 10 月回归模型入选因子包括空气温度、平均净辐射、空气相对湿度, 而 7 月只有平均净辐射和水汽压亏缺入选, 空气温度因子被剔除, 这可能是由于该时段水汽压亏缺综合表达了空气温度与空气相对湿度对液流速率的影响。方差分析结果显示: 所有回归模型的拟合效果良好, 经 F 值检验, 达到极显著水平, 决定系数 R^2 在 0.95 左右。可见, 所有回归方程均能较好地揭示液流变化与气象因子变化的相关规律。4 月: $y = 0.003 + 7.109 \times 10^{-5} x_1 + 5.905 \times 10^{-7} x_2 - 5.411 \times 10^{-5} x_3$, $R^2=0.943$, $F=240.121$; 7 月: $y = 0.010 + 1.725 \times 10^{-6} x_2 - 0.003 x_4$, $R^2=0.958$, $F=325.071$; 10 月: $y = -4.02 \times 10^{-5} x_1 + 4.982 \times 10^{-7} x_2 + 1.328 \times 10^{-6} x_3$, $R^2=0.950$, $F=246.408$ 。其中: x_1 为空气温度, x_2 为平均净辐射, x_3 为空气相对湿度, x_4 为水汽压亏缺。

4 结论与讨论

杉木生长季晴天液流日变化为典型的单峰型, 与赵忠辉等^[14]和史梅娟等^[15]对杉木的研究结果一致, 与朱亚等^[25]对胡杨 *Populus euphratica* 树干液流日变化呈双峰型的结论不同。液流日变化呈明显的季节变化规律, 表现在开始启动、到达峰值和保持较大速率的时间不同。6 月和 7 月最早启动和到达峰值, 并且保持较大液流速率的时间 6 h 以上, 10 月开始启动和到达峰值的时间最迟。赵忠辉等^[14]对湖南会同杉木的研究认为, 晴天液流开始升高的时刻由冬季至夏季逐渐提前, 回到低值的时刻逐渐推后, 秋季液流峰值出现的时间最早, 冬季最晚。此外, 雨天液流速率明显低于同时期晴天液流水平。

杉木生长季液流速率与平均净辐射、空气温度、水汽压亏缺呈显著正相关, 与空气相对湿度呈显著负相关。然而, 随着时空位移的变化, 影响液流的主要环境因子也会发生变化。4 月和 10 月杉木液流速率主要受空气相对湿度影响, 而 7 月杉木液流速率与空气温度相关性最强。这是由于在植物生长季, 不同时期自身生理生态特征的差异和对环境因子不同的响应导致杉木在不同月份树干液流日变化趋势受环境因子的影响各不相同。朱亚等^[25]得出: 影响胡杨不同月份液流速率的主导因子不同, 4 月胡杨液流速率受空气温度影响, 8 月受光合有效辐射和水汽压亏缺影响, 而 10 月则受空气相对湿度影响。黄德卫等^[26]在对鼎湖山阔叶树种的研究时发现, 控制液流速率的主导因子随季节变化存在差异, 湿季中光合有效辐射为控制液流速率的首要, 干季中气温起到了主导作用。王文杰等^[21]认为, 随着时间尺度由大到小, 对树干液流影响最大的因子有从地下直接与根系水分吸收相关的土壤环境因子向地上直接影响叶片蒸腾的环境因子转变的趋势。王瑞辉等^[27]研究发现, 树干液流除受环境因子影响外, 还与树体当时的生理活动和水分状况有关。张宁南等^[28]得出不同天气条件下加勒比松 *Pinus caribaea* 影响液流速率的主导气象因子存在差异。此外, 液流速率与主要环境因子的关系还受树冠等级^[29]、树木直径^[30]、树干方位^[31]以及高度^[32]影响。因此, 影响液流密度的因子十分复杂, 除了植物自身的生理学特性外, 对其他相关因子, 如不同水分灌溉条件、土壤温度等进一步监测和研究都具有十分重要的意义。

5 参考文献

- [1] 侯振宏, 张小全, 徐德应, 等. 杉木人工林生物量和生产力研究[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(5): 97 – 103.
HOU Zhenhong, ZHANG Xiaoquan, XU Deying, *et al.* Study on biomass and productivity of Chinese fir plantation [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2009, **25**(5): 97 – 103.
- [2] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 南亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征[J]. 林业科学, 2009, **45**(8): 147 – 153.
KANG Bing, LIU Shirong, CAI Daoxiong, *et al.* Characteristics of biomass, carbon accumulation and its spatial distribution in *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem in low subtropical area [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(8): 147 – 153.
- [3] 宁晓波, 项文化, 王光军, 等. 湖南会同连作杉木林凋落物量 20 年动态特征[J]. 生态学报, 2009, **29**(9): 5122 – 5129.
NING Xiaobo, XIANG Wenhua, WANG Guangjun, *et al.* Litterfall production and dynamic for twenty years of a successive replanting *Cunninghamia lanceolata* plantation at Huitong Hunan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(9): 5122 – 5129.
- [4] 张慧玲, 宋新章, 张智婷, 等. UV-B 辐射对杉木凋落叶分解的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(4): 845 – 850.
ZHANG Huiling, SONG Xinzhang, ZHANG Zhiting, *et al.* Effects of UV-radiation on the decomposition of *Cunninghamia lanceolata* leaf litter [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22**(4): 845 – 850.
- [5] 郑金兴, 熊德成, 黄锦学, 等. 中龄和老龄杉木人工林凋落物量及养分归还[J]. 福建林学院学报, 2013, **33**(1): 18 – 24.
ZHEN Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, *et al.* Litter production and nutrient return in 2 plantations of young and old *Cunninghamia lanceolata* [J]. *J Fujian Coll For*, 2013, **33**(1): 18 – 24.
- [6] 李平, 郑阿宝, 阮宏华, 等. 苏南丘陵不同林龄杉木林土壤活性有机碳变化特征[J]. 生态学杂, 2011, **30**(4): 778 – 783.
LI Ping, ZHEN Abao, RUAN Honghua, *et al.* Variation of soil liable organic carbon in different age Chinese fir plantations in south Jiangsu [J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30**(4): 778 – 783.

- [7] 王丹, 戴伟, 王兵, 等. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素[J]. 林业科学研究, 2009, **22**(5): 667 – 671.
- WANG Dan, DAI Wei, WANG Bing, *et al.* The variation characteristics of soil organic carbon and its influence factor in different developing stages of Chinese fir plantations [J]. *For Res*, 2009, **22**(5): 667 – 671.
- [8] 夏志超, 孔垂华, 王朋, 等. 杉木人工林土壤微生物群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2135 – 2140.
- XIA Zhichao, KONG Chuihua, WANG Peng, *et al.* Characteristics of soil microbial community structure in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(8): 2135 – 2140.
- [9] 袁颖红, 樊后保, 李辉信, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤微生物的影响[J]. 林业科学, 2012, **48**(9): 8 – 14.
- YUAN Yinghong, FAN Houbao, LI Huixin, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil microorganism in a Chinese fir plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(9): 8 – 14.
- [10] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响[J]. 植物生态学报, 2009, **33**(4): 739 – 747.
- WANG Guangjun, TIAN Dalun, YAN Wende, *et al.* Effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **33**(4): 739 – 747.
- [11] 王丹, 王兵, 戴伟, 等. 杉木生长及土壤特性对土壤呼吸速率的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(3): 680 – 688.
- WANG Dan, WANG bing, DAI Wei, *et al.* Effects of tree growth and soil properties on soil respiration rate in Chinese fir plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(3): 680 – 688.
- [12] 伍倩, 闫文德, 田大伦, 等. 杉木人工林不同层次植被穿透水的水化学特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, **31**(1): 59 – 64.
- WU Qian, YAN Wende, TIAN Dalun, *et al.* Hydrochemical characteristics of through-fall in different layers of *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *J Central South Univ For & Technol*, 2011, **31**(1): 59 – 64.
- [13] 周丽丽, 蔡丽平, 马祥庆, 等. 不同发育阶段杉木人工林凋落物的生态水文功能[J]. 水土保持学报, 2012, **16**(5): 249 – 253.
- ZHOU Lili, CAI Liping, MA Xiangqing, *et al.* Eco-hydrological function in different developing stages of Chinese fir [J]. *J Soil Water Conserv*, 2012, **16**(5): 249 – 253.
- [14] 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]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(7): 127 – 132.
- [15] 史梅娟, 郑怀舟, 王健, 等. 3种优势树种深秋树干液流特征与环境因子的关系[J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 2010, **26**(3): 57 – 61.
- SHI Meijuan, ZHEN Huaizhou, WANG Jian, *et al.* Sap flow velocities and its relationship with environmental factors in stems of three dominant tree species in late autumn [J]. *J Fujian Norm Univ Nat Sci Ed*, 2010, **26**(3): 57 – 61.
- [16] PHILP G. Whole-plant water use and canopy conductance of cassava under limited available soil water and varying evaporative demand [J]. *Plant & Soil*, 2005, **278**(1/2): 371 – 383.
- [17] LIU Xiaozhi, KANG Shaozhong, LI Fusheng. Simulation of artificial neural network model for trunk sap flow of *Pyrus pyrifolia* and its comparison with multiple-linear regression [J]. *Agric Water Manage*, 2009, **96**(6): 939 – 945.
- [18] ORTUÑO M F, CONEJERO W, MORENO F, *et al.* Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives [J]. *Agric Water Manage*, 2010, **97**(1): 1 – 11.
- [19] KÖHLER M, SCHWENDENMAMN L, HÖLSCHER D. Throughfall reduction in a cacao agroforest: tree water use and soil water budgeting [J]. *Agric For Meteorol*, 2010, **150**(4): 1079 – 1089.
- [20] 蒋文伟, 郭运雪, 杨淑贞, 等. 天目山柳杉古树的树干液流速率时空变化[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(6): 859 – 866.
- JIANG Wenwei, GUO Yunxue, YANG Shuzhen, *et al.* Temporal and spatial changes for sap flow velocity of *Cryptomeria fortunei* stems in National Nature Reserve of Mount Tianmu [J]. *J Zhejaung A & F Univ*, 2012, **29**(6): 859 – 866.
- [21] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 等. 不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系[J]. 林业科学, 2012, **48**

- (1): 78 – 85.
- WANG Wenjie, SUN Wei, QIU Ling, *et al.* Relations between stem sap flow density of *Larix gmelinii* and environmental factors under different temporal scale [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(1): 78 – 85.
- [22] CAMPBELL G S, NORMAN J M. *A Introduction to Environmental Biophysics* [M]. 2nd ed. Madison: Springer-verlag Press, 1998: 40 – 45.
- [23] LU Ping, URBAN L, ZHAO PING. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in Trees: theory and practice [J]. *Acta Bot Sin*, 2004, **46**(6): 631 – 646.
- [24] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 马占相思(*Acacia mangium*)树干液流密度和整树蒸腾的个体差异[J]. 生态学报, 2006, **26**(12): 4050 – 4058.
- ZHAO Ping, RAO Xingquan, MA Ling, *et al.* The variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium* [J]. *Acta Bot Sin*, 2006, **26**(12): 4050 – 4058.
- [25] 朱亚, 吕光辉, 胡颖颖, 等. 艾比湖自然保护区胡杨树树干液流特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27**(11): 69 – 73.
- ZHU Ya, LÜ Guanghui, HU Yingying, *et al.* The experimental study of *Populus euphratica* sap flow characteristics in the Ebinur lake basin [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2013, **27**(11): 69 – 73.
- [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 Deiwei, 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]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(5): 1159 – 1166.
- [27] 王瑞辉, 马履一, 奚如春, 等. 元宝枫生长旺季树干液流动态及影响因素[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(3): 231 – 237.
- WANG Ruihui, MA Lüyi, XI Ruchun, *et al.* Fluctuation of *Acer truncatum* sap flow in rapid growth season and relevant variables [J]. *Chin J Ecol*, 2006, **25**(3): 231 – 237.
- [28] 张宁南, 徐大平, MORRIS J, 等. 雷州半岛加勒比松人工林旱季液流特征与耗水量研究[J]. 林业科学研究, 2007, **20**(5): 591 – 597.
- ZHANG Ningnan, XU Taiping, MORRIS J, *et al.* Characteristics of sap flux density and water use of *Pinus caribaea* plantation in dry season on the Leizhou Peninsula [J]. *For Res*, 2007, **20**(5): 591 – 597.
- [29] 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 of *Schima superba* [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46**(1): 40 – 47.
- [30] 王华田, 赵文飞, 马履一. 侧柏树干边材液流的空间变化规律及其相关因子[J]. 林业科学, 2006, **42**(7): 21 – 27.
- WANG Huatian, ZHAO Wenfei, MA Lüyi. Spatial variation of sap flow of *Platycladus orientalis* and its affecting factors [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(7): 21 – 27.
- [31] 张建国, 闫美杰, 时伟宇, 等. 辽东栎不同方位边材液流季节动态及其对蒸腾耗水测算的影响[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(3): 193 – 197.
- ZHANG Jianguo, YAN Meijie, SHI Weiyu, *et al.* Seasonal dynamics and azimuthal variations of sap flow in *Quercus liaotungensis* and their effects on transpiration estimates [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, **25**(3): 193 – 197.
- [32] 胡伟, 闫美杰, 杜峰, 等. 黄土丘陵区山杨展叶期树干液流分析[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(4): 48 – 52, 58.
- HU Wei, YAN Meijie, DU Feng, *et al.* Analysis on sap flow of *Populus davidiana* plantation in the leaf-flushing period in hilly-gully region of loess plateau [J]. *J Soil Water Conserv*, 2010, **24**(4): 48 – 52, 58.