

天目山柳杉古树的树干液流速率时空变化

蒋文伟¹, 郭运雪¹, 杨淑贞², 赵明水²

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 临安 311300; 2. 天目山国家级自然保护区 管理局, 浙江 临安 311311)

摘要: 应用热扩散式边材液流计, 研究了天目山柳杉 *Cryptomeria fortunei* 树干液流速率时空变化、蒸腾耗水量及其与环境因子的关系, 揭示了柳杉水分生理的内在机制。结果表明: 柳杉树干液流速率的日变化呈单峰曲线, 春季于 6:20 左右启动, 12:30 左右达到峰值, 18:50 左右开始迅速下降。夏季于 7:00 左右启动, 13:20 左右达到峰值, 19:40 左右开始迅速下降。春季液流启动比夏季早, 达到高峰和迅速下降时间均比夏季提前。春季液流峰值、日均液流速率和液流量均显著大于夏季, 且胸径越大的柳杉液流速率越大; 在柳杉不同方位上, 春季柳杉南向液流速率最大, 为平均值的 187.3%, 西向最小仅为平均值的 15.4%。夏季东向液流速率最大, 为平均值的 226.2%, 北向最小为平均值的 33.1%。同一季节不同测点的液流速率日变化有明显差异, 但具有较好的一致性, 不同季节液流变化节律表现不同; 在柳杉垂直高度上, 柳杉春季日均液流速率大小排序为中位(61.71 g·min⁻¹) > 上位(48.36 g·min⁻¹) > 下位(35.10 g·min⁻¹), 夏季则为上位(20.65 g·min⁻¹) > 下位(14.81 g·min⁻¹) > 中位(10.43 g·min⁻¹), 不同高度的树干液流速率差异明显, 且上位液流的波动节律明显早于中位和下位, 上位液流峰值出现的时间比下位要早。图 5 表 3 参 30

关键词: 植物学; 柳杉; 热扩散; 液流速率; 时空变化; 天目山

中图分类号: S715.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2012)06-0859-08

Temporal and spatial changes for sap flow velocity of *Cryptomeria fortunei* stems in National Nature Reserve of Mount Tianmu

JIANG Wen-wei¹, GUO Yun-xue¹, YANG Shu-zhen², ZHAO Ming-shui²

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Management Office, National Nature Reserve of Mount Tianmu, Lin'an 311311, Zhejiang, China)

Abstract: To protect the *Cryptomeria fortunei* plant community in National Nature Reserve of Mount Tianmu, the temporal and spatial changes of stem sap flow velocity and transpiration as well as their relationship to meteorological factors were studied using a thermal dissipation probe (TDP). Also, internal mechanisms of water physiology were explained. Results showed that the diurnal change of sap flow velocity was a single peak curve. In spring, sap flow started at 06:20, peaked at 12:30, and fell quickly at 18:50. However in summer, it started at 07:00, peaked at 13:20, and fell quickly at 19:40. The peak value, average daily velocity, and sap flow flux in spring were larger than in summer with a larger diameter stem having a greater sap flow velocity. For stem orientation, compared with the average sap flow, in spring flow velocity in the southern section was largest (187.3%) and in the western part lowest (15.4%); however, in summer sap flow velocity in the east was largest (226.2%) and lowest in the north (33.1%). Sap flow for vertical height of the stem by season, showed that in spring the order of average daily sap flow velocity for the middle (61.71 g·min⁻¹) > the top (48.36 g·min⁻¹) > the bottom (35.10 g·min⁻¹), but in summer revealed the top (20.65 g·min⁻¹) > the bottom (14.81 g·min⁻¹) > the middle (10.43 g·min⁻¹). [Ch, 5 fig. 3 tab. 30 ref.]

收稿日期: 2011-12-29; 修回日期: 2012-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30972342)

作者简介: 蒋文伟, 副教授, 博士, 从事城市生态学与景观生态学研究。E-mail: wenweijiang@zafu.edu.cn

Key words: botany; *Cryptomeria fortunei*; thermal dissipation; sap flow velocity; temporal and spatial change; Mount Tianmu

柳杉 *Cryptomeria fortunei* 系杉科 Taxodiaceae 柳杉属 *Cryptomeria* 常绿乔木, 为中国特有树种, 高达 54 m, 产自长江流域以南且分布广泛。据调查, 在浙江天目山和龙泉, 福建南屏、沙县、泰宁、崇安, 江西庐山及云南昆明都分布有柳杉百年古树^[1]。天目山是森林和野生动物资源国家级自然保护区, 植物种类丰富, 拥有全世界最大的古柳杉群, 数量达 2 000 多株, 是“大树王国”的主体, 素有“大树华盖闻九洲”的美誉^[2]。自 20 世纪 90 年代以来, 天目山柳杉呈现衰退现象, 甚至出现大面积枯死, 严重影响了境域森林健康和动植物多样性保护, 许多学者为此开展了相关研究。张欣等^[3]研究了天目山柳杉林群落竞争关系, 还有学者研究了柳杉病虫害防治^[2,4]、繁殖及栽培技术等方面^[5-7], 而应用树干液流监测技术对柳杉水分生理研究鲜见报道, 仅见于赵丽娟等^[8]和蒋文伟等^[9]。目前, 利用热扩散式液流探针 (thermal dissipation probe, TDP) 技术, 国外有些学者^[10-11]研究了欧洲赤松 *Pinus sylvestris*, 山杏 *Prunus armeniaca* 的树干液流变化及蒸腾耗水特性; Vertessy 等^[12]与 Wullschlegel 等^[13]研究了桉树 *Eucalyptus regnans*, 栎树 *Quercus petraea* 等树干液流动态。国内有些学者分别选择麻栎 *Quercus acutissima*^[14], 杨树 *Populus × euramericana*^[15], 杉木 *Cunninghamia lanceolata*^[16], 山杨 *Populus davidiana*^[17], 元宝枫 *Acer truncatum*^[18] 及马占相思树 *Acacia mangium*^[19] 等树种, 研究树干液流日、月、年变化, 以及不同方位、垂直高度液流速率变化节律, 同时分析树干液流与环境因子之间的响应关系。赵丽娟等^[8]与蒋文伟等^[9]初步研究了单株柳杉在不同天气、不同季节的液流变化及与环境因子之间的关系。本研究在此基础上, 以 2 株柳杉为研究对象, 进行多个空间测点监测, 试图从时空层面探寻柳杉树干液流传输及蒸腾耗水特性, 了解柳杉水分生理动态及与环境因子的内在响应关系, 为保护天目山柳杉古树景观提供理论参考。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于浙江临安天目山龙峰尖附近(30°20'N, 119°23'E), 坡向南, 海拔 1 067 m, 属中亚热带北缘向北亚热带过渡地带, 气候温暖湿润, 雨水充沛。年平均气温为 8.8~14.8 °C, 最冷月平均气温 -2.6~3.4 °C, 最热月平均气温 19.9~28.1 °C, ≥10 °C 积温 2 500~5 100 °C, 无霜期 209~235 d, 年均降水量 1 390~1 870 mm。土壤厚度约为 50 cm, 多为黄壤土和棕黄壤土。保护区内植物区系古老, 有蕨类植物 171 种, 种子植物 1 641 种(包括亚种、变型)^[20], 是当今华东地区植被保存较完好的地区之一。试验林属于亚热带常绿针叶林, 植物种类丰富, 除柳杉以外, 还有交让木 *Daphniphyllum macropodum*, 玉兰 *Magnolia denudata*, 灯台树 *Bothrocaryum controversum* 等, 林下有阔叶山麦冬 *Liriope platyphylla*, 吉祥草 *Reineckia carnea*, 翠云草 *Selaginella uncinata* 等地被植物。

1.2 研究方法

观测内容包括树干液流时间变化与空间变化。从春季(4月和5月)和夏季(6月、7月和8月)中分别选择 6 个典型的晴天研究柳杉树干液流日、季时间变化, 观测不同方位、垂直高度的液流速率研究及其空间变化。由于调查样地柳杉树龄多集中于 120~160 a, 本试验选取长势良好、树龄分别为 120 a 和 160 a 古柳杉树作为样木。其中, 方位探针安装于样木 1 (树龄 120 a) 树高 1.3 m 处的东、南、西、北 4 个方向, 不同高度探针安装于树高 1.3, 4.0, 8.0 m 处, 均安装在树干北向; 样木 2 (树龄 160 a) 仅在树高 1.3 m 处北向安装探针, 并利用生长锥钻取木芯, 测定树皮厚度和边材厚度 (表 1)。液流计的安装、

表 1 柳杉样木生长特征

Table 1 Growth characters of *Cryptomeria fortunei*

样木编号	树干位点高度/m	直径/cm	树皮厚度/cm	测定方位	边材宽度/cm	边材面积/cm ²	树龄/a
1	1.3	62.8	0.5	东、南、西、北	23.4(平均值)	2 822.909(平均值)	120
	4.0	52.6	0.5	北	19.7	1 974.271	
	8.0	43.4	0.7	北	16.3	1 316.045	
2	1.3	75.6	1.0	北	28.1	4 016.683	160

环境因子的测定见文献[9]，运用 DPS V 7.0 软件进行数据统计分析，采用 Excel 制图。

2 结果与分析

2.1 柳杉树干液流速率的日变化和季变化

从对 2 株柳杉样木北向 1.3 m 处树干液流速率观测表明(图 1)，柳杉液流速率日变化呈典型的单峰曲线。每日凌晨，液流开始启动，之后迅速增加，中午达到最大峰值。傍晚液流开始迅速下降，直到次日凌晨启动之前降至最低，没有明显的停止界限。夜间仍存在微弱的液流，主要是由根压所致^[21]。由于根压的作用，土壤水分便以主动的方式进入柳杉树体，补充白天因蒸腾作用而消耗的水分，维持树体的水分平衡。

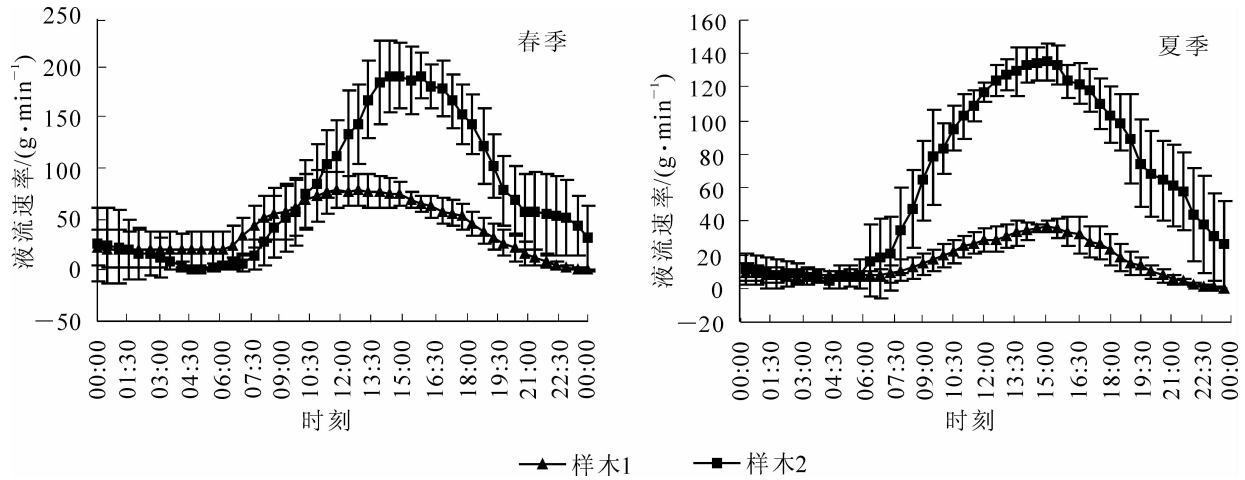


图 1 春夏季节柳杉液流速率日变化

Figure 1 Diurnal changes of sap flow velocity of *Cryptomeria fortunei* in spring and summer

从对不同季节柳杉液流速率日变化动态(表 2)可知：液流启动时间上样木 1 和样木 2 相对一致，前后相差 30 min 左右，春季启动稍早于夏季；液流达到峰值时间上，样木 2 比样木 1 晚 1 h 左右，但 2 株样木春季液流达到峰值时间都早于夏季 1 h 左右；峰值和日均液流速率上，2 株样木都是夏季显著地小于春季，样木 1 夏季液流峰值和日均速率分别为春季 47.1%和 39.3%，样木 2 分别为春季 69.9%和

表 2 春夏季节柳杉液流速率日变化动态

Table 2 Diurnal changes of sap flow velocity of *Cryptomeria fortunei* in spring and summer

季节	观测日期	液流启动时刻		达到峰值时刻		液流速率峰值/(g·min ⁻¹)		平均液流速率/(g·min ⁻¹)		迅速下降时刻	
		样木 1	样木 2	样木 1	样木 2	样木 1	样木 2	样木 1	样木 2	样木 1	样木 2
春季	04-06	6:00	6:30	13:00	14:30	63.451	196.865	36.285	59.522	18:30	18:00
	04-21	5:30	6:00	13:30	14:00	92.752	155.779	33.809	51.001	18:00	19:00
	04-22	6:30	6:30	13:00	14:00	76.441	230.739	32.723	85.782	18:00	18:30
	05-01	5:30	6:00	12:30	14:30	93.743	199.380	38.867	86.830	19:00	19:30
	05-02	6:00	6:00	13:00	13:30	110.964	250.013	61.718	107.727	19:30	19:30
	05-03	6:00	7:00	13:00	13:30	89.519	194.164	35.876	67.090	18:30	18:00
夏季	06-03	6:30	7:00	13:30	15:00	42.138	147.371	14.832	49.997	19:00	19:30
	06-11	7:00	6:30	13:30	13:00	42.600	149.663	16.231	67.161	19:30	20:00
	06-14	7:30	7:00	14:30	13:30	42.430	137.279	12.793	61.605	19:30	19:30
	07-19	6:30	6:30	14:00	14:30	37.599	145.435	15.394	60.074	19:30	19:30
	07-31	6:30	6:30	13:00	13:30	44.298	142.418	18.604	71.625	20:00	19:30
	08-01	7:00	7:30	14:30	14:30	39.105	135.318	16.121	71.682	20:00	20:00

83.4%，而且样木2液流峰值平均值及日均液流速率都大于样木1。其中，在春季样木2分别是样木1的2.3倍和1.9倍，在夏季分别是样木1的3.5倍和4.0倍，胸径越大柳杉液流速率越大；液流开始下降时间上，夏季出现较晚，为19:30-20:00，春季较早，为18:30-19:00，液流变化总体是夏季比春季晚1h左右。春季液流波动幅度要显著地大于夏季，其原因在于春季光合有效辐射变幅剧烈，空气湿度、叶面湿度均较低，温差日变幅较高(图2)，致使春季柳杉树干液流在启动时间、达到峰值时间上都早于夏季，这与樊敏等^[22]研究结论有所不同。

通过进一步对柳杉液流速率与环境因子的相关性统计分析(表3)表明，影响春季柳杉液流速率的主要环境因子是空气温度、光合有效辐射和空气湿度，与空气温度和光合有效辐射呈显著正相关，与空气湿度呈显著负相关；影响夏季柳杉液流速率的主要环境因子是空气温度、叶面湿度和空气湿度，与空气

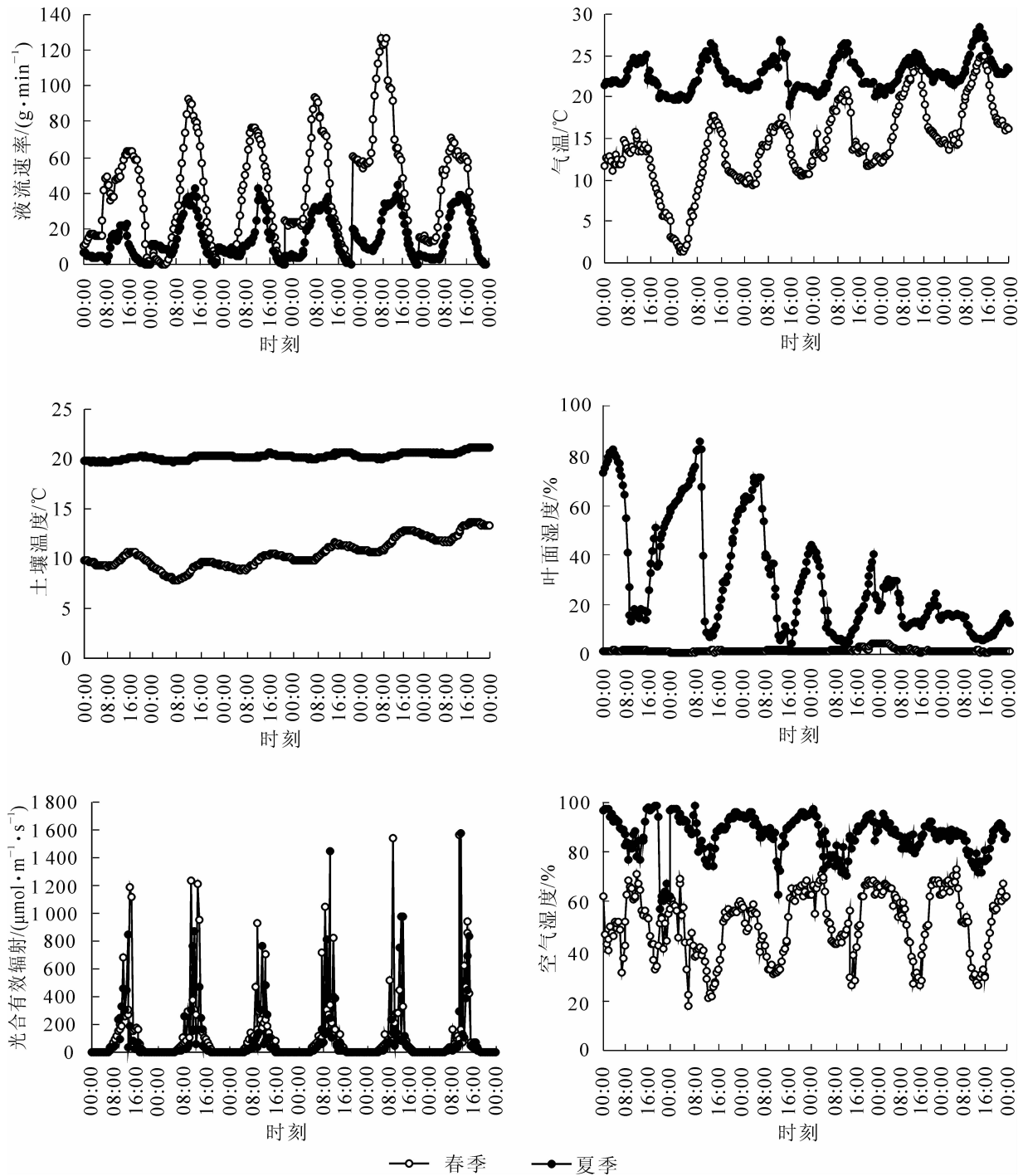


图2 春季和夏季环境因子的日变化

Figure 2 Diurnal changes of environmental factors in spring and summer

温度呈显著正相关，与叶面湿度、空气湿度呈显著负相关。

2.2 柳杉不同方位树干液流变化

在柳杉不同方位上，同一季节不同测点液流速率日变化节律有明显差异，但具有较好的一致性（图 3）。在春季，树干东、南、北向方位的

树干液流约在 6:00–6:30 启动，而西向的树干液流启动较晚，约在 7:00–7:30；液流峰值出现时间上，东、南、北向方位峰值出现约在 12:00–13:30，南向较晚约在 14:00；液流进入低谷时间约在 18:00–20:00，不同方位不超过 120 min。从图 3 可知，春夏两季树干不同方位液流速率大小差异明显。在春季，树干东、南、西、北向 4 个方位液流速率峰值分别为日均值的 141.6%，187.3%，15.4%，55.7%，而夏季则分别为：226.2%，53.7%，87.0%，33.1%。夏季东向方位的树干液流速率明显大于其余 3 个方位，也比春季 4 个方位的要大，可能与柳杉林冠、根系在不同方位分布程度等因素有关。

2.3 柳杉不同高度树干液流变化

春夏季节柳杉不同高度液流速率日变化（图 4）表明：柳杉上位液流的波动节律明显早于下位和中位，上位液流峰值出现的时间比下位要早。在春季，上位树干液流启动约在 6:30，峰值出现约在 12:30，而中位和下位无论是液流启动时间还是液流峰值出现时间都要晚一些，在 7:00 左右和 13:30 左右，夏季

表 3 液流速率与环境因子的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between sap flow velocity and environmental factors

时间	空气温度	空气湿度	叶面湿度	光合有效辐射	土壤温度
春季	0.637**	-0.459**	-0.249*	0.498**	0.079
夏季	0.770**	-0.499**	-0.549**	0.446**	0.119*

说明：* 代表在 0.05 水平上显著，** 代表在 0.01 水平上显著。

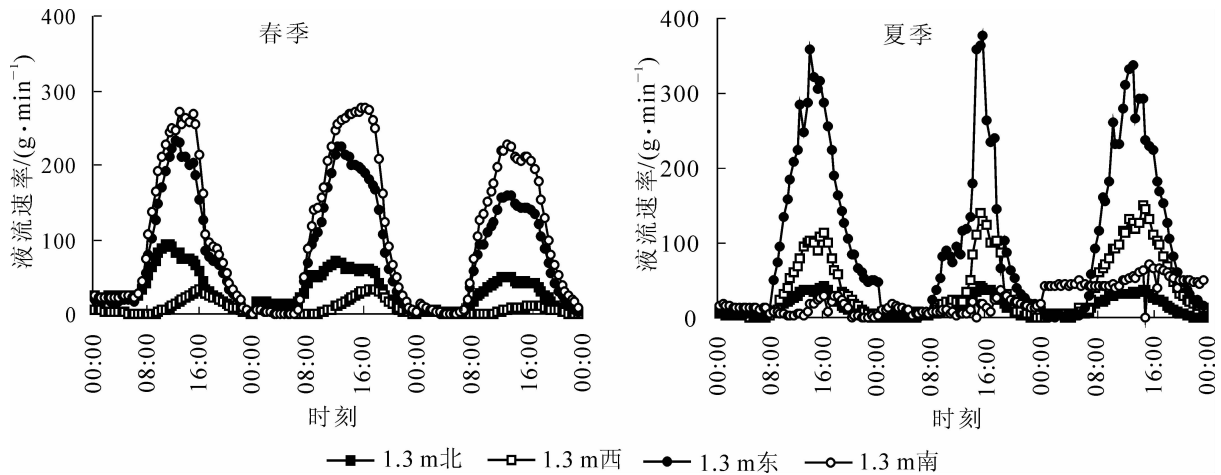


图 3 春、夏季节柳杉树干不同方位液流速率日变化动态

Figure 3 Diurnal fluctuation of sap flow velocity of *Cryptomeria fortunei* at different orientation in spring and summer

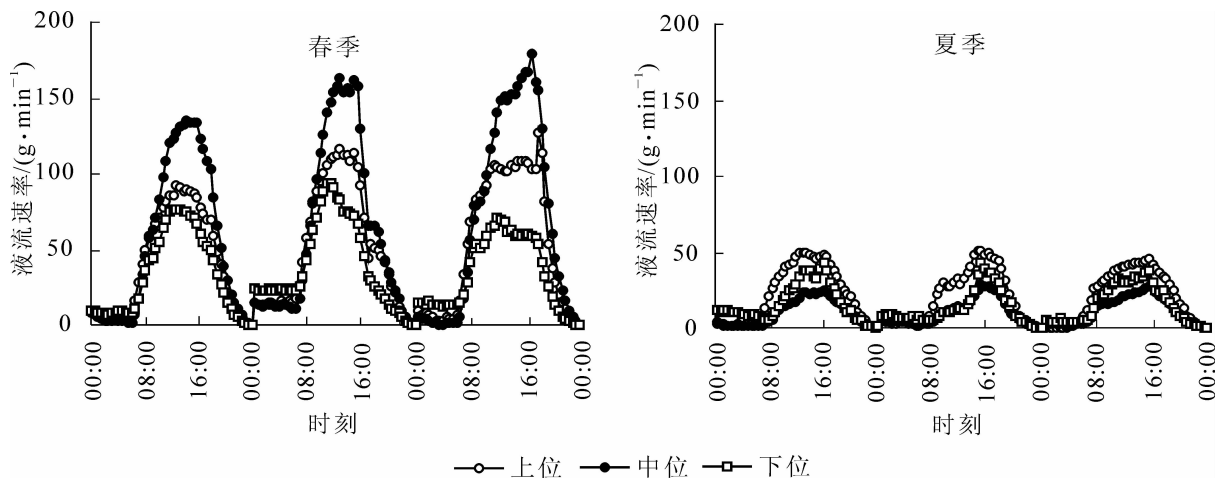


图 4 春夏季节柳杉不同高度液流速率日变化

Figure 4 Diurnal change of sap flow velocity of *Cryptomeria fortunei* at different heights in spring and summer

液流日变化节律与春季相似。柳杉不同高度的树干液流速率差异明显,春季日均液流大小排序为中位($61.71 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$)>上位($48.36 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$)>下位($35.10 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$),而夏季则为上位($20.65 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$)>下位($14.81 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$)>中位($10.43 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$),与刘德良^[23]的研究结果不同。理论上讲,如果树干不同高度探测点之间没有枝条,不同高度的液流速率排序应为上位>中位>下位^[24]。在本试验中,由于样木柳杉主干液流测点间都有较多的侧枝,树体水分很可能通过枝条蒸腾而失水,同时树干水容也起了一定的调节作用,因此液流速率大小排序有所不同。

2.4 春夏季柳杉树干日液流量比较

不同季节柳杉树干日液流量(图5)可知:春季树干日液流量(胸径处)远大于夏季,说明柳杉春季蒸腾量大,是林分水分管理的关键时期。春季树干日均液流量为 $52.56 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$,夏季仅为 $20.4 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$,为春季的38.8%。春季柳杉液流通量相对较大的原因,一是与柳杉的生长发育有关,春季是柳杉抽稍长叶的季节,对水分需求很大;二是与天目山春季干旱夏季多雨的气候有关。

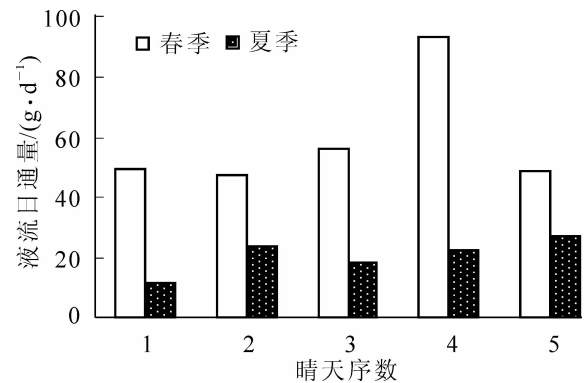


图5 不同季节柳杉树干日液流量

Figure 5 Daily sap flow volume of *Cryptomeria fortunei* in different seasons

3 结论与讨论

柳杉树干液流的日变化与太阳辐射、空气温度等环境因子之间具有较好的生态同步性。在生长期,柳杉树干液流速率的日变化呈单峰曲线,春季液流启动比夏季早,达到高峰和迅速下降时间均比夏季提前,春季液流峰值、日均液流速率和液流通量均显著大于夏季,这与樊敏等^[22]研究结论有所不同,其原因在于树木液流的变化除了受生物学结构、土壤供水影响外,很大程度上受气象因子的制约^[25]。本研究发现,不同季节影响液流速率的主要环境因子有所不同,但是液流与空气温度、光合有效辐射的正相关,与相对湿度负相关,及与土壤温度的相关性较差的关系属性在不同季节里却完全一致,这与刘文国等^[26]对杨树人工林树干液流与环境因子的关系研究结论相一致。研究结果发现柳杉春季树干日均液流量($52.56 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$)明显大于夏季($20.4 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$),且树木胸径越大则树干液流速率及蒸腾耗水量也越大,由此表明春季是柳杉水分管理的关键时期。

在柳杉不同方位上,同一季节不同测点液流速率日变化差异明显,但有较好的一致性。春季,南向树干液流最大,西向最小;夏季,东向树干液流最大,北向最小;夏季东向方位的液流速率明显大于其余3个方位,也比春季4个方位的要大。王华田等^[27]在对侧柏 *Platycladus orientalis* 边材液流节律研究后,认为树干不同方位边材宽度和相应方位的冠幅大小与测定部位的边材宽度和冠幅之间关系不明确,但所测定液流速率较大的方位树冠枝梢数量多,具有一定的关联性;而王瑞辉等^[28]认为元宝枫 *Acer truncatum* 树干液流的方位差异与冠幅大小差异无关,一个可能的原因是根系分布的影响,根系分布多的方位液流速率就大。本研究中,春夏季节柳杉不同方位液流速率都有着明显自身特点及变化节律,可能与林冠及根系分布等因素有一定的关系。当然,该项研究仅仅只是开始阶段,有待今后深入探讨。

在春夏季节,柳杉上位液流的波动节律明显早于下位和中位,上位液流峰值出现时间比下位早。原因在于构成边材液流传输驱动力的要素包括蒸腾拉力、导管内由于水分子内聚力产生的毛管力、树体不同高度水的重力等。其中,蒸腾拉力和毛管力是液流上升的主要驱动力^[29]。随着测定部位的升高,被测部位导管中液流所受的拉力越来越大,液流速率也随之增大^[30]。本研究发现,春季液流峰值大小排序为中位>上位>下位,而夏季则为上位>下位>中位。理论上认为,树干边材面积随高度的升高而减小,导致树干上位边材液流速率大于中位和下位的液流速率,但由于不同季节柳杉树干分枝的生长量及耗水量不同,且不同季节受环境因子的影响也不同,从而使得液流速率空间位置的大小排序有所改变。

参考文献:

- [1] 夏爱梅, 达良俊, 朱虹霞, 等. 天目山柳杉群落结构及其更新类型[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21 (1): 44 - 50.

- XIA Aimei, DA Liangjun, ZHU Hongxia, *et al.* Community structure and update type of *Cryptomeria fortunei* in Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2004, **21** (1): 44 – 50.
- [2] 张昕, 张立钦, 王记祥, 等. 天目山柳杉瘿瘤病原菌观察[J]. 浙江林业科技, 2008, **28** (2): 55 – 57.
ZHANG Xin, ZHANG Liqin, WANG Jixiang, *et al.* Observation on pathogenetic fungi of gall disease on *Cryptomeria fortunei* in Tianmu Mountain [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2008, **28** (2): 55 – 57.
- [3] 张欣, 杨淑贞, 赵明水, 等. 天目山自然保护区柳杉种群种内和种间竞争[J]. 农村生态环境, 2004, **20** (4): 1 – 5.
ZHANG Xin, YANG Shuzhen, ZHAO Mingshui, *et al.* Intra and inter specific competition within *Cryptomeria fortunei* populations in The Mountain Tianmu National Nature Reserve [J]. *Rural Eco-Environ*, 2004, **20** (4): 1 – 5.
- [4] 李国会, 温国胜, 田海涛, 等. 天目山不同海拔高度柳杉瘿瘤病对柳杉健康的影响[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27** (4): 483 – 488.
LI Guohui, WEN Guosheng, TIAN Haitao, *et al.* Gall disease of *Cryptomeria fortunei* at different altitudes on Mount Tianmu, Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27** (4): 483 – 488.
- [5] 张翠萍, 方伟, 桂仁意, 等. 柳杉试管快繁技术的研究[J]. 林业科技开发, 2008, **22** (6): 36 – 39.
ZHANG Cuiping, FANG Wei, GUI Renyi, *et al.* Studies on mass propagation invitro of *Cryptomeria fortunei* hooibrenk by tissue culture [J]. *For Sci Technol Develop*, 2008, **22** (6): 36 – 39.
- [6] 杨淑贞, 李国会, 杜晴洲, 等. 输营养液对天目山柳杉的影响[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (6): 810 – 814.
YANG Shuzhen, LI Guohui, DU Qingzhou, *et al.* Effects of transfusion of nutrient solution to *Cryptomeria fortunei* on Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (6): 810 – 814.
- [7] 俞飞, 侯平, 宋琦, 等. 柳杉凋落物自毒作用研究[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27** (4): 494 – 500.
YU Fei, HOU Ping, SONG Qi, *et al.* Autotoxicity of *Cryptomeria fortunei* litter [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27** (4): 494 – 500.
- [8] 赵丽娟, 蒋文伟, 杨淑贞, 等. 天目山柳杉的茎干液流特征[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (2): 169 – 175.
ZHAO Lijuan, JIANG Wenwei, YANG Shuzhen, *et al.* Stem sap flow of *Cryptomeria fortunei* in National Nature Reserve of Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (2): 169 – 175.
- [9] 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.
JIANG Wenwei, GUO Yunxue, YANG Shuzhen, *et al.* Dynamics of stem sap flow of *Cryptomeria fortunei* and its relation to environmental factors in Mount Tianmu national nature reserve[J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2011, **33** (5): 899 – 905.
- [10] MOREN A S, LINDROTH A, FLOWER E J, *et al.* Branch transpiration of pine and spruce to tree and canopy using needle biomass distributions [J]. *Tree*, 2000, **14**: 384 – 397.
- [11] ALARCON J J, DORNINGO S R, NICOLAS E, *et al.* Estimation of hydraulic conductance within field-grown apricot using sap flow measurements [J]. *Plant Soil*, 2003, **251**: 125 – 135.
- [12] VERTESSY R A, HATTON T J, REECE P, *et al.* Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique [J]. *Tree Physiol*, 1997, **17** (12): 747 – 756.
- [13] WULLSCHLEGER S D, HANSON P J, TODD D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques [J]. *For Ecol Manage*, 2001, **143** (1/3): 205 – 213.
- [14] 赵文飞, 王迎, 王华田, 等. 不同季节麻栎树干储水量的动态变化[J]. 林业科学, 2007, **43** (4): 115 – 120.
ZHAO Wenfei, WANG Ying, WANG Huatian, *et al.* Change of *Quercus acutissima* trunk pondage in different season [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43** (4): 115 – 120.
- [15] 刘文国, 刘玲, 张旭东, 等. 杨树人工林树干液流特性及其与影响因子关系的研究[J]. 水土保持学报, 2010, **24** (2): 96 – 101.
LIU Wenguo, LIU Ling, ZHANG Xudong, *et al.* Characteristics of sap flow and its relation to influencing factors in poplar plantations [J]. *J Soil & Water Conserv*, 2010, **24** (2): 96 – 101.
- [16] 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.

- [17] 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 - 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 - 58.
- [18] 王瑞辉, 马履一, 李丽萍, 等. 元宝枫树干液流的时空变异性研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28** (增刊2): 12 - 18.
WANG Ruihui, MA Lüyi, LI Liping, *et al.* Temporal and special variations of stem sap flow of *Acer truncatum* Bunge [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28** (supp 2): 12 - 18.
- [19] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2005, **25** (9): 2145 - 2151.
MA Ling, ZHAO Ping, RAO Xingquan, *et al.* Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (9): 2145 - 2151.
- [20] 丁炳扬, 潘承文. 天目山植物学实习手册[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- [21] 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[J]. 生态学报, 2009, **29** (7): 3970 - 3976.
YU Zhanhui, CHEN Yunming, DU Sheng. The sapflow dynamics of *Platycladus orientalis* in the semiarid Loess Plateau Region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (7): 3970 - 3976.
- [22] 樊敏, 马履一, 王瑞辉. 刺槐春夏季树干液流变化规律[J]. 林业科学, 2008, **44** (1): 41 - 45.
FAN Min, MA Lüyi, WANG Ruihui. Variation of stem sap flow of *Robinia pseudoacacia* in spring and summer [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44** (1): 41 - 45.
- [23] 刘德良. 油松树干边材液流空间变化规律[J]. 东北林业大学学报, 2008, **36** (5): 15 - 18.
LIU Deliang. Spatial variation of sap flow of *Pinus tabulaeformis* [J]. *J Northeast For Univ*, 2008, **36** (5): 15 - 18.
- [24] 高照全, 王小伟, 魏钦平, 等. 桃树不同部位调节储存水的能力[J]. 植物生理学通讯, 2003, **39** (5): 429 - 432.
GAO Zhaoquan, WANG Xiaowei, WEI Qinqing, *et al.* Water storage adjustment for different parts of peach [J]. *Plant Physiol Commun*, 2003, **39** (5): 429 - 432.
- [25] 孙慧珍, 李夷平, 王翠, 等. 不同木材结构树干液流对比研究[J]. 生态学杂志, 2005, **24** (12): 1434 - 1439.
SUN Huizhen, LI Yiping, WANG Cui, *et al.* Comparative study on stem sap flow of non-and ring-porous tree species [J]. *Chin J Ecol*, 2005, **24** (12): 1434 - 1439.
- [26] 刘文国, 刘玲, 张旭东, 等. 杨树人工林树干液流特性及其与环境因子关系的研究[J]. 水土保持学报, 2010, **24** (2): 96 - 101.
LIU Wenguo, LIU Ling, ZHANG Xudong, *et al.* Characteristics of sap flow and its relation to influencing factors in poplar plantations [J]. *J Soil & Water Conserv*, 2010, **24** (2): 96 - 101.
- [27] 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.
- [28] 王瑞辉, 马履一, 李丽萍, 等. 元宝枫树干液流的时空变异性研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28** (增刊2): 12 - 18.
WANG Ruihui, MA Lüyi, LI Liping, *et al.* Temporal and special variations of stem sap flow of *Acer truncatum* Bunge [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28** (supp 2): 12 - 18.
- [29] JONES H G. *Plant and Microclimate—A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [30] 王华田, 马履一. 利用热扩式边材液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J]. 植物生态学报, 2002, **26** (6): 661 - 667.
WANG Huatian, MA Lüyi. Measurement of whole tree's consumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP) [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2002, **26** (6): 661 - 667.