

梨树干木质部液流速度径向分布特征

孙慧珍^{1,2}, 康绍忠^{2,3*}, 胡笑涛²

(¹东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; ²西北农林科技大学, 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; ³中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要: 采用热脉冲法对梨树干液流速度径向变化规律进行了系统研究。结果表明: ①梨树干木质部不同深度液流速度在生长旺盛的晴天、阴天和小雨天呈单峰或双峰曲线; 而在中到暴雨天、9月底小雨天和即将休眠的10月底晴天, 各深度液流速度日变化不规则。②树干同一深度液流速度日峰值、日均值、日变幅在晴天、阴天、小雨和中到暴雨天的比例相同, 约为5:4:3:2; 同一深度不同方向液流速度径向变幅在以上天气的比例为6:4:3:2, 而同一深度液流速度最小值在不同天气时差异不大。③梨树干不同深度白天液流速度和液流速度径向变幅分别在5—7月、8—9月相近, 8—9月、10月同一深度液流速度分别是5—7月的50%~60%和33%~50%; 5—7月、8—9月和10月液流速度径向变幅比约为5:2:1。液流速度峰值主要出现在形成层至髓心的0.12~0.29相对位置。④晚上液流速度径向季节变化趋势与相应的白天相似, 整个生长季晚上液流速度和径向变幅分别为白天的43%±1%和29%±7%。

关键词: 梨树; 热脉冲法; 液流速度; 径向变化

中图分类号: S 661.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2008) 07-0937-08

The Radial Distribution of Xylem Sap Flow Velocity in Trunks of Pear Trees

SUN Hui-zhen^{1,2}, KANG Shao-zhong^{2,3*}, and HU Xiao-tao²

(¹College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ²Key Laboratory of Agric Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid by Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shannxi 712100, China; ³The Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Daily and seasonal variability in the radial distribution of xylem sap flow velocity in trunks of pear trees were investigated by the heat pulse method. The results showed that sap flow velocity at different depths beneath the cambium exhibited one-, two-peak diurnal patterns in sunny, cloudy and light rainy days during the fully growing season, whereas diurnal sap flow velocity at different depths became irregular under different weather conditions at the end of growing season. The ratio of radial range of variation at different aspects, sap flow velocity in maximum, average and daily range of variation of the same depth in sunny, cloudy, light rain and moderate rain to storm days were 6:4:3:2 and 5:4:3:2, respectively, whereas minimum sap flow velocity was relatively similar under different weather conditions. The seasonal trends of daytime radial variation at the same aspect followed similar patterns, and showed three periods clearly from May to July, August to September and October. Sap flow velocity at the same depth in August to September and October were about 50%–60%, 33%–50% of that from May to July. The ratio of radial range of variation from May to July and from August to September and October was 5:2:1. The seasonal patterns of nighttime radial variation were similar to the corresponding daytime where radial variation was lower compared with the daytime. The ratio of nighttime to daytime sap flow velocity became higher and higher with the extension of growing season. Throughout the season, nighttime sap flow velocity and radial range of variation were 43%±1% and 29%±

收稿日期: 2008-01-07; 修回日期: 2008-07-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50339030); 国家自然科学基金项目 (50279043)

* 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: kangshaozhong@tom.com)

7% of those of the daytime, respectively. Diurnal radial profile could be grouped into four types: high – low – low, low – high – low, high – low – high and low – high – low – high, which the maximum sap flow velocity mostly occurred in the position of 0.12 – 0.29 from the cambium.

Key words: pear trees; heat pulse method; sap flow velocity; radial distribution

梨树是耗水量较大的树种之一,我国西部地区由于常年干旱影响其产量和品质。如何根据梨树实时耗水量为其供应适时适量的水分是人们关心的问题。传统测定蒸腾耗水量的方法,如剪枝称重法、气孔计法、蒸渗仪法等均受到果树树体较大的限制。随着热脉冲技术日益成熟,直接监测单株耗水量成为可能(刘奉觉等,1993;Cohen & Naor,2002)。但由于不同树种(Cermak et al.,1992;Phillips et al.,1996;Jimenez et al.,2000)、不同生长方向和不同深度的木质部(Lassoie et al.,1977;Miller et al.,1980;Lu et al.,2000;Ford et al.,2004a;Hirose et al.,2005)输水格局存在明显差异,导致热脉冲法测定单株或由单株经尺度转换计算群体蒸腾量存在误差(Cermak & Nadezhdina,1998;Wullschlegler & King,2000;Ford et al.,2004b)。因此研究木质部液流速度分布格局对于准确计算单株和群体耗水量具有重要意义。

作者采用热脉冲法,在梨树生长季连续监测木质部液流速度,分析其水分运输格局,找出液流速度时空分布规律,从而为准确计算梨树单株和群体蒸腾耗水量提供实践指导和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2003年在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室节水灌溉试验站进行。该站位于北纬34°20′、东经108°24′、海拔521 m的渭河北三道台塬地区,地下水位较低,中壤土。多年平均气温12.5℃,年均降水量632 mm,年均蒸发量1500 mm。试验区四周较为开阔,站内设有气象站。

材料为田间生长的8年生酥梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.)。为了避免边缘效应,样树位置选在梨园中心。梨树株行距2.0 m×3.35 m,样地面积603 m²。用卷尺测量样地梨树距地面40 cm处干径,干径6~10 cm的频率达83%。故选取干径6~10 cm的生长良好的梨树作为样树。样树基本情况见表1。

表1 被测样树基本情况

Table 1 Basic properties of the sampled trees

树号 Tree No.	株高/m Height	直径/cm Diameter	测定方向 Measuration aspects	测定深度(距形成层)/mm Measuration depths beneath the cambium
T1	4.1	8.8	东西 East – West	5、10、20、25、30、35
T2	3.9	7.4	东西 East – West	5、10、20、25
T3	4.0	7.8	东西 East – West	5、10、20、25
T4	4.0	9.0	东西 East – West	5、10、20、25
T5	4.9	9.8	南北 South – North	5、10、20、25、30、35
T6	3.9	7.4	南北 South – North	5、10、20、25
T7	3.4	6.6	南北 South – North	5、10
T8	4.1	8.8	南北 South – North	5、10、20、25、30、35

1.2 试验方法

采用热脉冲法(SF100 Standard Probeset, Greenspan Technology Pty Ltd, Australia)从5月13日到

10 月 28 日连续测定树干液流。热脉冲系统包括 1 个数据采集器和两个液流传感器, 每个液流传感器可以同时测定间隔为 5 mm 的两个深度液流速度。该系统共 6 套, 同步测定 T1、T2、T5 ~ T8 号树相向方向两个深度液流速度。为了增加样树, 在生长季测定 T2 的热脉冲系统, 交替测定 T2、T3 和 T4, 时间间隔为 10 d。热脉冲加热时间为 1.6 s, 采样时间间隔 15 min。测定过程中发现同一样树不同深度液流速度、不同样树不同深度液流速度具有很好的相关性, 所以以 T7 号样树作为控制, 即采用同一组探头连续测定 T7 南北向树干 5 和 10 mm 深度液流速度, T1、T5、T6 和 T8 每两个相向(东西、南北)深度如 5 和 10 mm 测定 10 d, 后 10 d 测定 20、25 mm, 交替进行。T2 ~ T4 每两个相向深度测定周期为 5 d。

边材中液质比 $F_l = (W_f - W_d) / W_i$; 木质比 $F_m = W_d / 1.53W_i$ 。式中 W_f 为生长芯鲜质量; W_i 为与生长芯相同体积的蒸馏水质量; W_d 为生长芯干质量(孙慧珍等, 2006)。

1.3 数据处理及分析

各样树依据测量的树干直径、树皮厚度、探头深度、伤口尺寸及生长芯液质比、木质比等参数输入与液流传感器配套的分析软件, 自动经过损伤校正得到树干液流速度数据。在一定时间间隔内实测的各样树不同方向各深度液流速度分别与控制树 T7 建立回归关系式, 依据统计学原理筛选最优方程。依据最优方程和 T7 连续数据, 计算该样树该深度在此段时间内的液流速度。

测定期间依据气象站观测的日降雨量和日照时数划分天气类型。日照时数大于 0 为晴或多云天气; 日照时数为 0 且当天无雨为阴天; 降雨量 $< 10.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 为小雨, $10.0 \sim 24.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 为中雨, $25.0 \sim 49.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 为大雨, $50.0 \sim 99.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 为暴雨。采用某一深度液流速度日峰值、日均值、日最小值、日变幅(日最大值与最小值之差)、径向变幅(同一方向不同深度液流速度最大值与最小值之差)分析液流速度变化规律。

数据分析用 EXCEL2003 和 SPSS12.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 液流速度日变化

生长季晴天以 5 月 28 日、6 月 27 日、7 月 19 日、8 月 22 日、9 月 10 日和 10 月 6 日为例, 同时选取即将休眠的 10 月底晴天(10 月 26—28 日)为例; 阴天为 5 月 16 日、6 月 10 日、7 月 20 日、8 月 4 日、9 月 2 日和 10 月 14 日; 小雨、中雨、大雨和暴雨分别以 5 月 13 日(日照时数为 0.9 h, 降雨 $2.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、7 月 11 日(日照时数为 0, 降雨 $8.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、5 月 15 日(降雨 $22.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、7 月 13 日(降雨 $36.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、8 月 29 日(降雨 $65.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 和 9 月 27 日(降雨 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 为例, 观察树干液流速度的变化特征。

各样树树干液流速度在同一天气条件下昼夜变化趋势相似。图 1 为 T6 北向树干的例子, 距形成层不同深度液流速度在生长旺盛的晴天具有明显的昼夜变化, 表现为早晚低、白天高的单峰或在中午 12:00—14:00 偶有午降形成双峰曲线。不同深度液流速度出现峰值的时间基本相同, 未出现随着深度增加液流速度峰值滞后现象(图 1, A)。随着生长季的延伸, 各深度液流速度峰值、均值均呈下降趋势, 即将休眠的 10 月底, 不同深度液流速度变化极不规则, 且液流速度均值、峰值是生长季最高值的 25% ~ 33% (图 1, B)。

阴天不同深度液流速度也表现为早晚低, 中午高的变化曲线(图 1, C)。但各深度液流速度日峰值为相应月份该深度晴天日峰值的 67% 左右。

在生长旺盛期的小雨天气, 各深度液流速度日变化规则, 但随着降雨量增加, 液流速度峰值下降(图 1, D)。如 5 月 13 日降雨量为 $2.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 各深度液流速度峰值是当月晴天日峰值的 67%; 当降雨量为 $8.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 峰值为当月晴天的 50%。但在 9 月底以后, 各深度液流速度在小雨天气时

变化不规则。在中到暴雨时，各深度液流速度昼夜变化平缓，液流速度峰值为相应月份晴天的 25% 左右；且不同深度的液流速度差异变小。

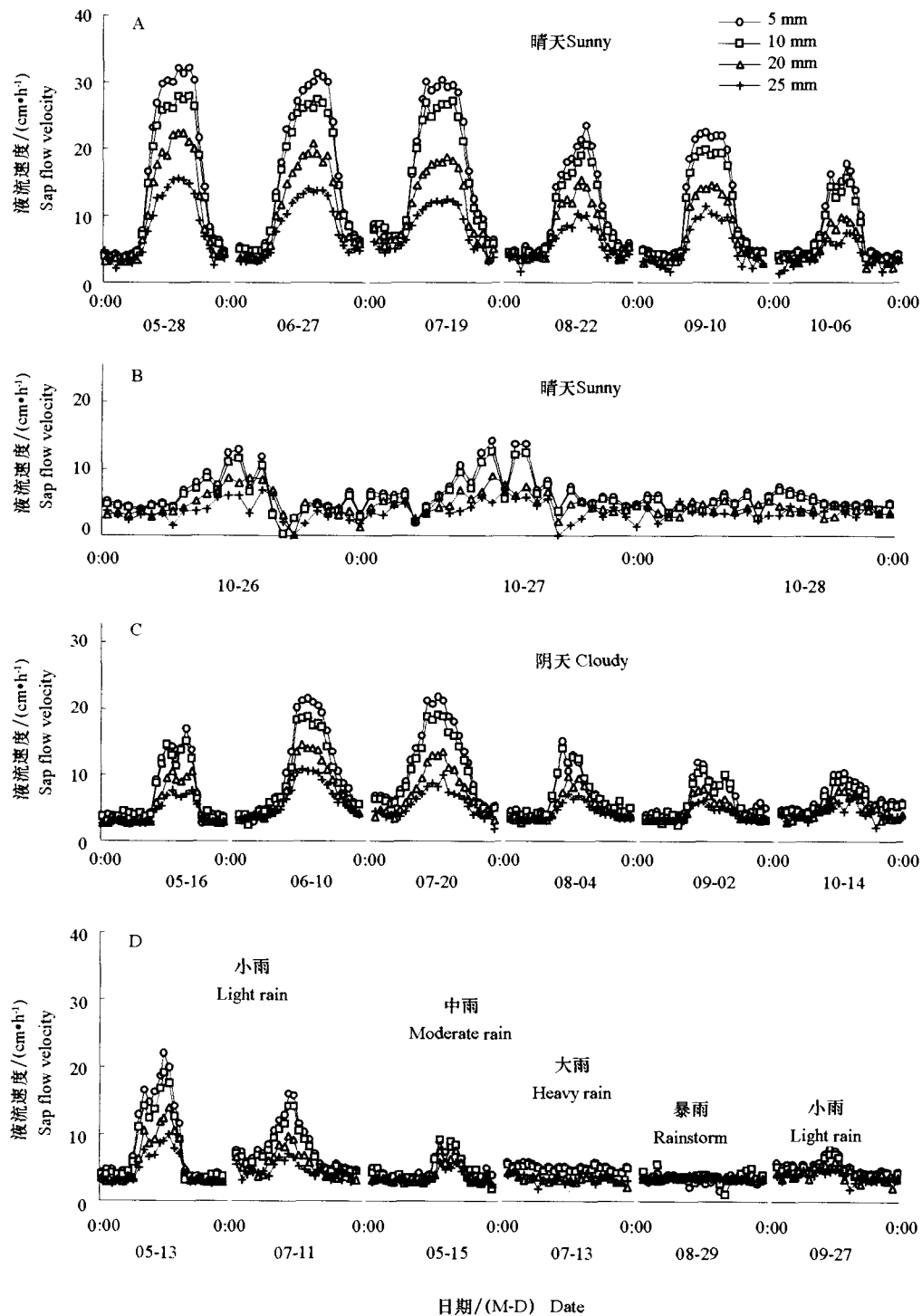


图 1 不同天气条件下树干木质部 5、10、20、25 mm 深处液流速度昼夜变化
 Fig. 1 Diurnal sap flow velocity under different weather conditions in the growing seasons

各样树不同深度液流速度峰值在晴天、阴天、小雨和中到暴雨天气, 出现在 10:00—16:00 的百分比平均依次为 98.61%、98.11%、84.49% 和 55.82%。

在阴天、小雨和中到暴雨天气时, 各样树同一深度液流速度日峰值、日均值和日变幅, 同一方向液流速度径向变幅与晴天相应参数比见表 2。

在阴天、小雨和中到暴雨天, 各深度液流速度日峰值、日均值和日变幅平均约为晴天相应深度的 81%、63% 和 34% 左右。而同一深度液流速度最小值在不同天气下差异不大。东西南北向液流速度径向变幅在阴天、小雨和中到暴雨平均为晴天的 67%、50% 和 25%。

表 2 不同天气条件下液流速度参数相对值变化

Table 2 Relative values of sap flow velocity parameters under different weather conditions

天气类型 Weather types	同一深度液流速度 Sap flow velocity of the measurement depth				液流速度径向变幅 Radial variation of sap flow velocity			
	日峰值 Daily max.	日均值 Daily aver.	日变幅 Daily range	日最小值 Daily min.	东 East	西 West	南 South	北 North
晴 Sunny	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
阴 Cloudy	0.84	0.76	0.82	0.94	0.64	0.70	0.65	0.67
小雨 Light rain	0.66	0.62	0.62	0.89	0.45	0.59	0.47	0.49
中到暴雨 Moderate rain to rainstorm	0.35	0.40	0.28	0.78	0.23	0.31	0.24	0.22

2.2 径向液流速度季节变化

以 T1 西向树干为例说明白天 (6:00—19:00) 和晚上 (0—5:00, 20:00—23:00) 液流速度 (图 2)、晚上与白天液流速度比 (图 3) 及液流速度径向变幅的季节变化 (图 4)。

白天液流速度径向季节变化趋势 (图 2) 在各月相似, 但径向变幅随月份 (5—10 月) 增加而逐渐减小, 7 月径向变幅最高 ($11.44 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$), 8—9 月、10 月分别为最高值的 50% 和 20%。8—9 月、10 月液流速度分别为 5—7 月的 54% ~ 61% 和 34% ~ 40%。晚上液流速度径向变化趋势与白天相似, 但晚上液流速度和径向变幅只是白天的 29% ~ 79%、18% ~ 66%。

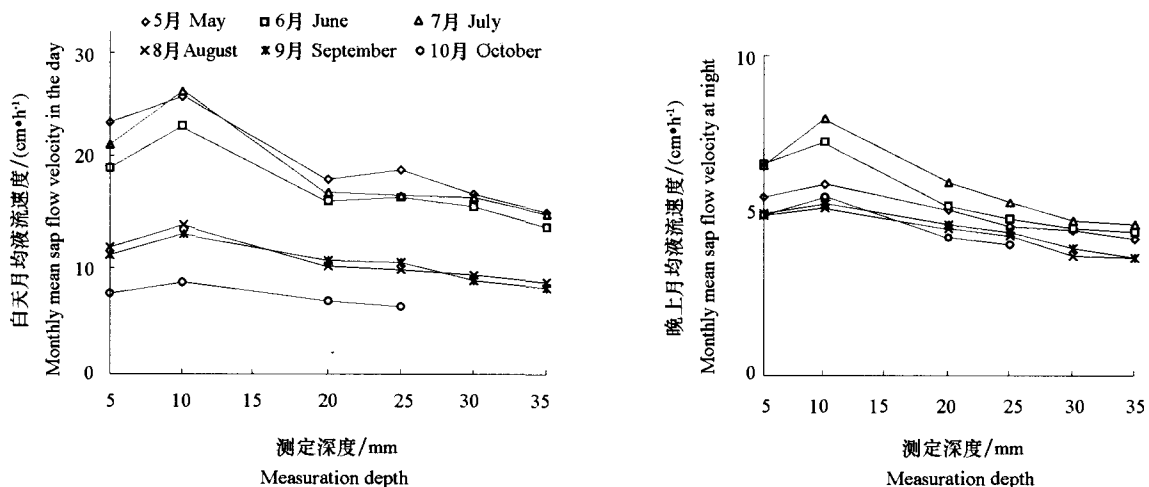


图 2 径向液流速度季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of radial sap flow velocity

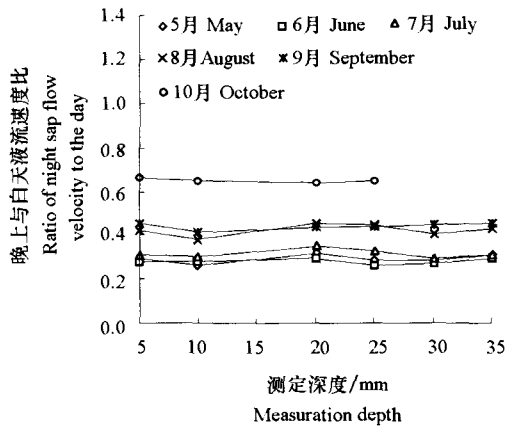


图3 晚上与白天液流速度比径向变化

Fig. 3 Seasonal changes of radial ratio of night sap flow velocity to the day

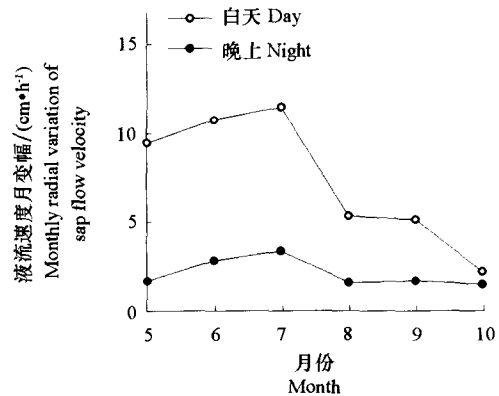


图4 液流速度径向变幅季节变化

Fig. 4 Seasonal changes of radial variation of sap flow velocity

晚上与白天同一深度液流速度比从5月到10月逐渐升高,在10月该参数是5月相应深度的180%~250% (图3)。

总体来讲,不同方向树干白天和晚上径向液流速度具有明显的季节变化。同一方向树干白天液流速度径向变化趋势在各月份相似,径向变幅随月份增加而减小,并明显分出3个阶段:5—7月、8—9月和10月。同一深度液流速度在5—7月、8—9月数值相似。8—9月、10月某深度液流速度分别是5—7月的50%~60%、33%~50%。8—9月和10月不同方向液流速度径向变幅分别为5—7月的38%、18%。各方向晚上液流速度径向变化与相应的白天相似,但不同方向各深度晚上液流速度和径向变幅分别为白天的15%~82%、7%~83%。

各样树晚上与白天液流速度比也呈明显的季节变化,表现为随着生长季的延伸逐渐增加,在10月最高。10月各深度晚上与白天液流速度比是5月相应深度的180%~350%。晚上与白天液流速度比的径向格局主要表现为从形成层到髓,随着深度增加,逐渐升高、逐渐降低和保持不变3种变化趋势,偶见高一低—高一低波浪形。

2.3 生长季液流速度均值径向变化规律

计算各样树在生长季白天、晚上液流速度均值,总结液流速度径向变化规律(图5)。

生长季样树不同方向树干晚上液流速度较低,东、西、南、北向树干晚上与白天液流速度比平均为 $43\% \pm 1\%$,并且夜间液流速度均值随木质部深度变化不大,以上各向晚上液流速度径向变幅是相应方向白天的 $29\% \pm 7\%$ 。而白天各样树不同方向液流速度随深度变化较大,东、西、南、北向径向变幅分别为 (6.80 ± 3.91) 、 (5.74 ± 2.05) 、 (5.18 ± 6.47) 、 $(6.89 \pm 3.17) \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$,平均为 $(6.15 \pm 0.83) \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

液流速度径向格局分别为高低高、低高低高、低高低和高低低。液流速度峰值在距形成层一定深度出现。如果将形成层规定为0,形成层到髓为1,峰值主要在形成层至髓心的0.12~0.29位置出现,偶尔出现在0.60位置。

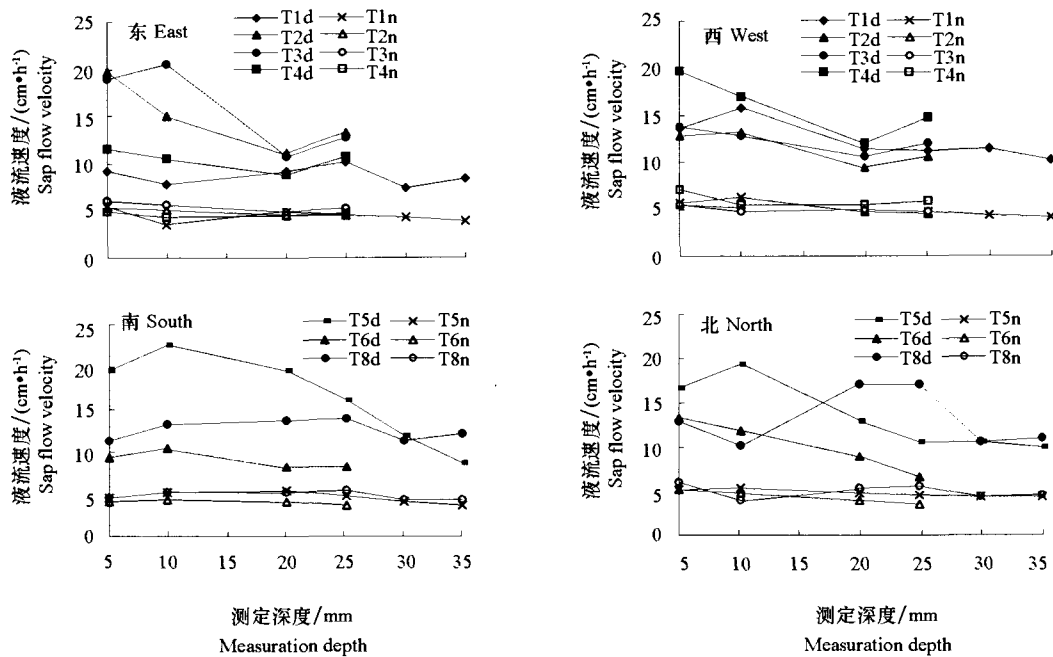


图 5 生长季不同方向液流速度径向变化

d、n 分别为树干白天、晚上液流速度。

Fig. 5 Seasonal changes of radial sap flow velocity of different aspects

d and n are the day and night sap flow velocity for the tree, respectively.

3 讨论

散孔材液流速度径向分布研究结果为从形成层至髓心呈下降或均匀分布趋势 (Phillips et al., 1996)。而 Lu 等 (2000) 研究散孔材的芒果液流速度在 0~2 cm 最高, 然后呈下降趋势。本研究结果为: 梨树白天液流速度径向格局主要为高低低、低高低、高低高和低高低高等形式, 液流速度峰值出现在形成层至髓心的 0.12~0.29 位置, 偶尔在 0.60 位置。

采用热脉冲法或热扩散法研究树木耗水量, 应考虑树木木质部不同方向、不同深度, 不同直径的个体之间液流速度变化格局 (Lu et al., 2000; Wullschlegel & King, 2000; Ford et al., 2004a)。这种格局变化导致了由测定位点计算单株耗水量的误差 (Cermak & Nadezhkina, 1998; Ford et al., 2004b; 孙慧珍等, 2006)。Ford 等 (2004b) 通过 1 个测定位点的液流速度计算松树单株日液流量的误差高达 154%; 相邻两个测点的计算结果并没有改善, 然而间隔一定距离的两个测点计算结果显著提高精度。孙慧珍等 (2006) 发现由相对于形成层的外面、内面两个测点液流速度计算的液流量平均低估 48% 和 72%; 外面、内面 4 个测点平均低估 9.9% 和 49%。对于直径在 6~10 cm 的梨树, 测定距形成层 0~0.64 个位点的液流量基本可以代表整树耗水量。

立地条件、树龄和品种均相同的梨树, 不同个体的树干不同方向同一深度、同一方向不同深度液流速度变化格局多样, 可能与幼苗嫁接, 幼树控制顶端生长, 促进侧枝生长, 去除不必要的营养枝等经营措施有关。这些措施改变了梨树原有的液流格局, 而呈现多种多样的变化形式。所以对于外貌看

似整齐一致、环境异质性小、均匀分布的果园, 由于人为因素改变了原有的液流变化特征而产生极大的变异性。因此采用热脉冲法计算单株或梨园耗水量时, 首要任务是确定不同单株液流速度变化格局。

References

- Cermak J, Cienciala E, Kucera J, Hallgren J E. 1992. Radial velocity profiles of water flow in trunks of Norway spruce and oak and the response of spruce to severing. *Tree Physiology*, 10 (4): 367–380.
- Cermak J, Nadezhdina N. 1998. Sapwood as the scaling parameter-defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? *Ann Sci For*, 55: 509–521.
- Cohen S, Naor A. 2002. The effect of three rootstocks on water use, canopy conductance and hydraulic parameters of apple trees and predicting canopy from hydraulic conductance. *Plant and Soil*, 25: 17–28.
- Ford C R, Goranson C E, Mitchell R J, Will R, Teskey R O. 2004a. Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: Predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees. *Tree Physiology*, 24: 941–950.
- Ford C R, McGuire M A, Mitchell R J, Teskey R O. 2004b. Assessing variation in the radial profile of sap flux density in *Pinus* species and its effect on daily water use. *Tree Physiology*, 24: 241–249.
- Hirose S, Kume A, Takeuchi S, Utsumi Y, Otsuki K, Ogawa S. 2005. Stem water transport of *Lithocarpus edulis*, an evergreen oak with radial-porous wood. *Tree Physiology*, 25: 221–228.
- Jimenez S, Nadezhdina N, Cermak J. 2000. Radial variation in sap flow in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. *Tree Physiology*, 20: 1149–1156.
- Lassoie J P, Scott D R M, Fritschen L J. 1977. Transpiration studies in douglas fir using the heat pulse technique. *Forest Science*, 23 (3): 377–390.
- Liu Feng-jue, Zheng Shi-kai, Ju Guan-sheng, Edwards W R N. A measurement of sap flow in poplar by HPVR. *Plant Physiology Communications*, 29 (2): 110–115. (in Chinese)
- 刘奉觉, 郑世楷, 巨关升, Edwards W R N. 1993. 用热脉冲速度记录仪 (HPVR) 测定树干液流. *植物生理学通讯*, 29 (2): 110–115.
- Lu P, Warrem J M, Elias Chacko K. 2000. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiology*, 20: 683–692.
- Miller D R, Vavrina C R, Christensen T W. 1980. Measurement of sap flow and transpiration in ring-porous oaks using a heat pulse velocity technique. *Forest Science*, 26 (3): 485–494.
- Phillips N, Oren R, Zimmermann R. 1996. Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring-porous tree species. *Plant, Cell and Environment*, 19 (8): 983–990.
- Sun Hui-zhen, Kang Shao-zhong, Gong Dao-zhi. 2006. Influence of measurement position on calculating pear tree stem sap flow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17 (11): 2024–2028. (in Chinese)
- 孙慧珍, 康绍忠, 龚道枝. 2006. 测定位点对计算梨树树干液流影响的研究. *应用生态学报*, 17 (11): 2024–2028.
- Wullschlegel S D, King A W. 2000. Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow-poplar trees. *Tree Physiology*, 20: 511–518.