

不同时间尺度上枣树树干液流的变异特性

马建鹏^{1,2} 汪有科^{1,3} 陈滇豫³ 靳姗姗^{1,2} 余檀³

(1. 中国科学院/教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探寻枣树树干液流在不同深度和不同方位的变异特性, 提高黄土丘陵区枣树蒸腾耗水量研究精度, 在陕西省米脂县远志山红枣试验示范基地采用热扩散式探针(TDP)分别研究了枣树不同方位和不同深度的树干液流速率。结果表明: (1) 不同方位探针监测结果间存在差异, 研究时间尺度不同, 各方位监测结果间的差异显著性不同, 差异显著性大小表现为时尺度 > 日尺度 > 月尺度。(2) 不同深度探针监测结果间存在差异, 随研究时间尺度的不同, 不同深度探针监测结果间的差异显著性不同, 差异显著性大小表现为时尺度 > 日尺度 > 月尺度。(3) 在树干北侧和深度为20 mm的TDP监测值计算生育期耗水量更准确。

关键词: 枣树; 树干液流; 不同方位; 不同深度; 径向分布
中图分类号: S665.1; S715.4 **文献标志码:** A

The variation characteristics of Jujube tree sap flow at different time scales

MA Jian-peng^{1,2}, WANG You-ke^{1,3}, CHEN Dian-yu³, JIN Shan-shan^{1,2}, SHE Tan³

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, CAS&ME, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the variation characteristics of jujube tree trunk sap flow at different depths and different directions, to improve the research precision of transpiration consumption of jujube trees in Loess Hilly Region, we utilized thermal dissipation probe (TDP) to study the trunk sap flow velocity of jujube trees at different directions and different depths respectively in the jujube experiment demonstration base of Yuanzhi mountain in Mizhi County of Shaanxi Province. The results showed that: (1) The difference of monitored results existed between different directions of the probe. The different research time scale, the monitored results in each direction was significant difference. The size of the significant difference expressed as: hourly scale > daily scale > monthly scale. (2) The monitored results at different probe depths existed difference, and with the different time scale, the significant difference was different between different probe depths. The size of the significant difference expressed as: hourly scale > daily scale > monthly scale. (3) The water consumption in growth stage calculated by the monitored value of TDP installed at the north and the depth of 20 mm was more accuracy.

Keywords: jujube tree; trunk sap flow; different directions; different depth; radial distribution

造林与林分经营的关键是林地水分环境容量问题, 即保证林分在整个生长发育阶段林地水量收支达到平衡^[1], 树木在发挥巨大生态效益的同时, 维持自身生长发育需要消耗大量水分, 树木整株耗水性的研究, 影响造林树种选择与林分结构配置^[2],

因此, 树木的水分传输规律特别是整株树的耗水量受到国内外树木水分生理学家、生态学家、林学家的共同关注^[3]。近年来, 通过测定树干液流来计算冠层蒸腾已经成为国际上研究整树蒸腾耗量最主要的方法^[4-6]。目前国际上运用的树干液流测定法主要

收稿日期: 2015-05-11

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201404709); 国家科技支撑计划课题(2011BAD29B04)

作者简介: 马建鹏(1989—), 男, 山东临沂人, 硕士生, 主要从事农业水资源高效利用方面的研究。E-mail: mjp08@126.com。

通信作者: 汪有科(1956—), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉及水资源高效利用研究。E-mail: gizwyk@vip.sina.com。

有三类:热脉冲法^[7]、组织热平衡法^[8]和热扩散式探针法^[9]。本次研究采用的是由法国科学家 Granier 发明的热扩散式探针法,Granier^[10]强调该方法在应用时有必要首先确定各方位液流密度是否存在差异。研究表明,大多数树种的液流速率沿树干边材的径向(横截面)、方位(圆周)和轴向(高度)存在较大的空间变异^[11]。但目前所了解到只有少数学者在应用时注意了这一问题^[12-13],孟秦倩^[14]、孙守家^[21]、刘超^[22]、李广德^[23]等都做过相应研究,但对于枣树的研究尤其是对于不同长度和不同方位的探针监测枣树树干液流的差异,即枣树树干液流沿不同径向深度、不同圆周方位是否存在变异以及对监测精度产生影响的因子的研究尚未见报道^[12]。

枣树作为黄土高原退耕还林的一种重要经济林木,经济和生态效益显著,在陕北种植面积已经达到 100 多万 hm^2 ^[15]。陕北属半干旱黄土丘陵沟壑区,水资源短缺,山地枣林耗水量精度的研究,对于提高水分利用效率和维持枣林可持续发展有重要意义。本文探索枣树不同方位以及不同深度的树干液流,以期能提高枣树蒸腾量的监测及计算精度,确立合理的植被需水耗水定额,为黄土高原半干旱区的植被恢复提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2014 年 5—10 月在陕西省米脂县远志山山地红枣试验示范基地进行。该基地处于典型的黄土丘陵沟壑区,该区土壤以黄土母质上发育的黄绵土为主,质地为粉壤土,土壤容重为 $1.2 \sim 1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量 28.1%。年平均降水量 451.6 mm,最大年降水量 704.8 mm,最小年降水量 186.1 mm,降水量少,蒸发量大,且降水年内分配不均匀,年内 60%~70% 的降雨集中在 7—9 月,属于中温带半干旱性气候。年平均温度 8.8°C ,日照时数 2 372.7 h,适宜枣树生长。

试验树种为 7 年生嫁接梨枣树,株行距为 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,栽植密度为 $111 \text{ 株} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 。

选取长势相近的 6 株树(树木生长状况见表 1) 3 株一组分为两组,其中一组在树干的东、西、南、北四个方位分别安装 20 mm 的 TDP(北京雨根科技有限公司生产),用于监测不同方位的树干液流;另一组在树干北侧沿径向分别安装 5 mm、10 mm 和 20 mm 的 TDP,用于监测不同深度的树干液流。

表 1 试验树概况

Table 1 The general situation of the test trees

组别 Group	树高 Height /cm	冠下树干高 Height of tree trunk under canopy/cm	距地面 20cm 处树干直径 The diameter of the trunk at 20cm above ground/cm
1	135	72	8
	134	68	7
	138	70	9
2	136	74	8
	135	66	8
	133	67	6

1.2 研究方法

1.2.1 数据获取 在试验地中部位置安装 BLJW-4 型自动气象站用于获取气象资料,监测的气象要素有空气温度($^\circ\text{C}$)、湿度(%)、降雨量(mm)、风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、总辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)和土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。气象站每 30 min 自动记录一次数据平均值,每 10 d 收集一次数据。

在树干距离地面 20 cm 高处刮掉长 10 cm、宽 3 cm 的树皮后,用配套钻头在该处钻上下垂直的两个孔,距离为 5 cm,插入探针后用防辐射铝箔塑纸包裹上下 30 cm,防止太阳照射引起探针测量误差。然后连接到北京雨根科技有限公司生产的 RR-2048 型数据采集器,监测系统每 10 min 自动记录一次数据平均值,每 10 d 收集一次数据。液流速率($F_s, \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)计算公式为:

$$F_s = 118.99 \times 10^{-6} \times [(\Delta T_m - \Delta T) / \Delta T]^{1.231}$$

式中 ΔT_m 为最大温差值, ΔT 为某时刻温差值。

1.2.2 数据处理 采用 Origin 8.0 绘图软件进行数据绘图,采用 SPSS16.0 数据统计软件进行差异显著性检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同方位 TDP 监测结果比较

2.1.1 不同方位 TDP 监测树干液流时尺度结果比较 由图 1 可以看出,不同方位 TDP 监测结果在时间尺度上的表现为,树干北向(T-N)液流速率变化呈双峰型,双峰间的谷值出现在 13:00;西向(T-W)和东向(T-E)液流速率变化呈相同的变化趋势,有明显的单峰,出现在 10:00 至 16:00 之间,其中液流速率的整体大小为 $T-W > T-N > T-E$ 。T-S 变化比较平缓,在中午 12:00 左右也有相对高值,但是相对于其它三个方位的变化不明显。根据图 1 可以将 24 h 内

的液流速率变化分为阶段 I(Stage I) 0:00~10:00、阶段 II(Stage II) 11:00~15:00 和阶段 III(Stage III) 16:00~23:00。由表 2 可知,在 24 个小时内,T-E 与 T-W 之间有显著差异 ($P < 0.05$);

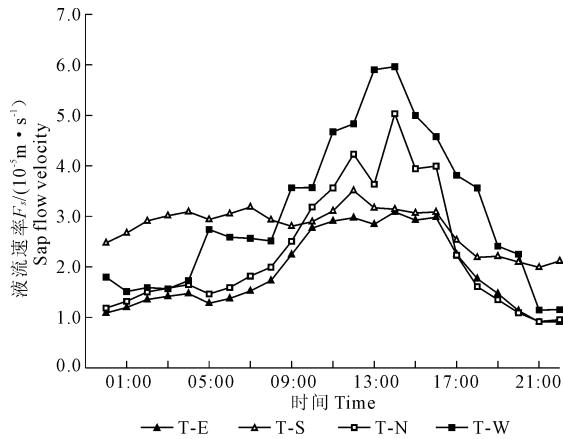


图 1 不同方位 TDP 监测值时尺度结果比较 (T-E/S/N/W 分别代表东、南、北、西向的 TDP 监测值)

Fig. 1 The results comparison of monitored values with hourly scale of TDP at different direction (T-E/S/N/W represented the TDP values at east, south, north and west direction, respectively)

表 2 不同方位 TDP 监测时尺度结果差异显著性检验 P 值 Table 2 The P value of difference significance test of monitored values with hourly scale of TDP at different direction

监测尺度与时段 Monitoring scale and period	方位 Orientation	T-E	T-W	T-S	T-N
1 h 尺度 Hourly	T-E	—	0.013	0.441	0.000
	T-W	0.013	—	0.080	0.237
	T-S	0.441	0.080	—	0.004
	T-N	0.000	0.237	0.004	—
阶段 I Stage I	T-E	—	0.007	0.001	0.000
	T-W	0.007	—	0.000	0.327
	T-S	0.001	0.000	—	0.000
	T-N	0.000	0.327	0.000	—
阶段 II Stage II	T-E	—	0.000	0.000	0.000
	T-W	0.000	—	0.072	0.021
	T-S	0.000	0.072	—	0.537
	T-N	0.000	0.021	0.537	—
阶段 III Stage III	T-E	—	0.092	0.449	0.041
	T-W	0.092	—	0.339	0.695
	T-S	0.449	0.339	—	0.182
	T-N	0.041	0.695	0.182	—

注: $P < 0.05$ 表示有显著差异; $P < 0.01$ 表示有极显著差异。

Note: When $P < 0.05$ represents the significance difference, while $P < 0.01$ represents the extremely significance difference.

T-N 与 T-E、T-S 间有极显著差异 ($P < 0.01$); 其它方位各探针相互间没有显著差异。在 Stage I 内,T-N 与 T-W 间没有显著差异,其它各探针相互间均具有极显著差异 ($P < 0.01$)。在 Stage II 内,T-S 与 T-N、T-W 间均没有显著差异;T-W 与 T-N 之间有显著差异 ($P < 0.05$);其它各探针相互间均具有极显著差异 ($P < 0.01$)。在 Stage III 内,T-N 与 T-E 之间有显著差异 ($P < 0.05$),其它各探针相互间均没有显著差异。综合以上分析,从 Stage I 到 Stage III,探针相互间的差异显著性经历了由极显著差异向无显著差异的变化,即从启动到停止,液流在树干不同方位的分布是逐渐趋于均匀的。

2.1.2 不同方位 TDP 监测树干液流日尺度结果比较 由图 2 可知,不同方位探针监测液流速率日尺度上的变化情况可以分为三个阶段: Stage I 5 月 1 日至 7 月 4 日; Stage II 7 月 5 日至 9 月 26 日; Stage III 9 月 27 日至 10 月 31 日,分别对应着枣树耗水量不同的生育期。整个生育期内,不同方位探针监测液流速率的整体变化为随生育期呈上升趋势, Stage I 内,T-N、T-W 和 T-E 变化都比较平稳,T-S 有较大波动,但总体没有明显的上升或下降趋势,不同方位监测值的大小为 $T-S > T-W > T-N > T-E$ 其中 T-N 与 T-W 之间无显著差异 ($P > 0.05$, 见表 3),其它不同方位监测值相互间都具有极显著差异 ($P < 0.01$); Stage II 内,T-N、T-W 和 T-S 上升趋势明显,上升幅度较 T-E 大,T-N 与 T-W 之间无显著差异 ($P > 0.05$),其它不同方位监测值相互间具有极显著差异 ($P < 0.01$); Stage III 内,T-N、T-W 和 T-E 急剧下降,T-S 仍有上升趋势,不同方位监测值相互间均具有极显著差异 ($P < 0.01$)。从 Stage I 到 Stage III,不同方位探针相互间的差异显著性发生变化的只有 T-N 和 T-W,由无显著差异变化为极显著差异,其它探针相互间的差异显著性没有发生变化,始终是极显著。在随生育期耗水量增加、树干液流速率增大的过程中,T-N 与 T-W 之间始终无显著差异,而在液流速率减小时出现极显著差异,说明枣树耗水量的变化对树干液流在不同方位的分布有显著影响。其中,在 Stage I,由于枣树嫁接萌芽展叶较晚,此阶段内枣树基本没有叶片,同时该阶段内降雨量较小,占整个生育期降雨量的 29.2%,此阶段内枣树蒸腾耗水量较小,因此 Stage I 内监测值较大且与其它方位 TDP 监测值有显著差异的 T-S 监测值不能采用;在 Stage II,枣树进行萌芽、展叶并开花,树体生物量也达到最大,同时该期降雨量占整个生育期降雨量的 64.5%,此阶段内枣

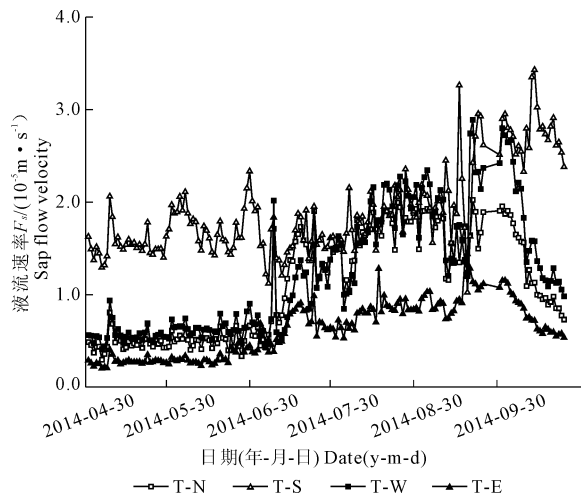


图 2 不同方位 TDP 监测日尺度结果比较

Fig. 2 The comparison of monitored results on daily scale of TDP at different direction

表 3 不同方位 TDP 监测日尺度结果差异显著性检验 P 值

Table 3 The P value of difference significance test for monitored results on daily scale of TDP at different direction

监测尺度与时段 Monitoring scale and period	方位 Orientation	T - E	T - W	T - S	T - N
日 Day	T - E	—	0.013	0.000	0.000
	T - W	0.013	—	0.000	0.022
	T - S	0.000	0.000	—	0.000
	T - N	0.000	0.022	0.000	—
阶段 I Stage I	T - E	—	0.000	0.000	0.000
	T - W	0.000	—	0.000	0.206
	T - S	0.000	0.000	—	0.000
	T - N	0.000	0.206	0.000	—
阶段 II Stage II	T - E	—	0.000	0.000	0.000
	T - W	0.000	—	0.003	0.058
	T - S	0.000	0.003	—	0.000
	T - N	0.000	0.058	0.000	—
阶段 III Stage III	T - E	—	0.000	0.000	0.000
	T - W	0.000	—	0.000	0.000
	T - S	0.000	0.000	—	0.000
	T - N	0.000	0.000	0.000	—

树蒸腾耗水量较大,因此 Stage II 内监测值较小且与其它方位 TDP 监测值有显著差异的 T - E 监测值不能采用;在 Stage III,进入枣树生育末期,树叶凋落,树体生物量减小,同时该期降雨量占整个生育期降雨量的 6.32%,此阶段枣树蒸腾耗水量较小,树干液流速率应该处于下降状态,因此 Stage III 内监测值表现为先上升后下降的 T - W 监测值不能采用,

而整个生育期 T - N 监测值始终与枣树生长耗水规律一致,能较好地反映枣树蒸腾耗水的真实情况,因此应该采用树干北侧探针的监测值。

2.1.3 不同方位 TDP 监测树干液流月尺度结果比较 由不同方位探针监测树干液流月尺度结果差异显著性检验 P 值(见表 4)可知,在 1 个月内的不同方位树干液流监测结果相互之间没有显著差异。与不同方位液流速率探针监测值在时尺度和日尺度对比可以发现,随着研究尺度的增大,不同方位探针监测树干液流速率的差异显著性在降低,因此,小尺度树干液流监测精度的提高对于准确估算枣树蒸腾耗水量具有重要意义。

表 4 不同方位 TDP 监测月尺度结果差异显著性检验 P 值
Table 4 The P value of difference significance test for monthly scale monitored results of TDP at different directions

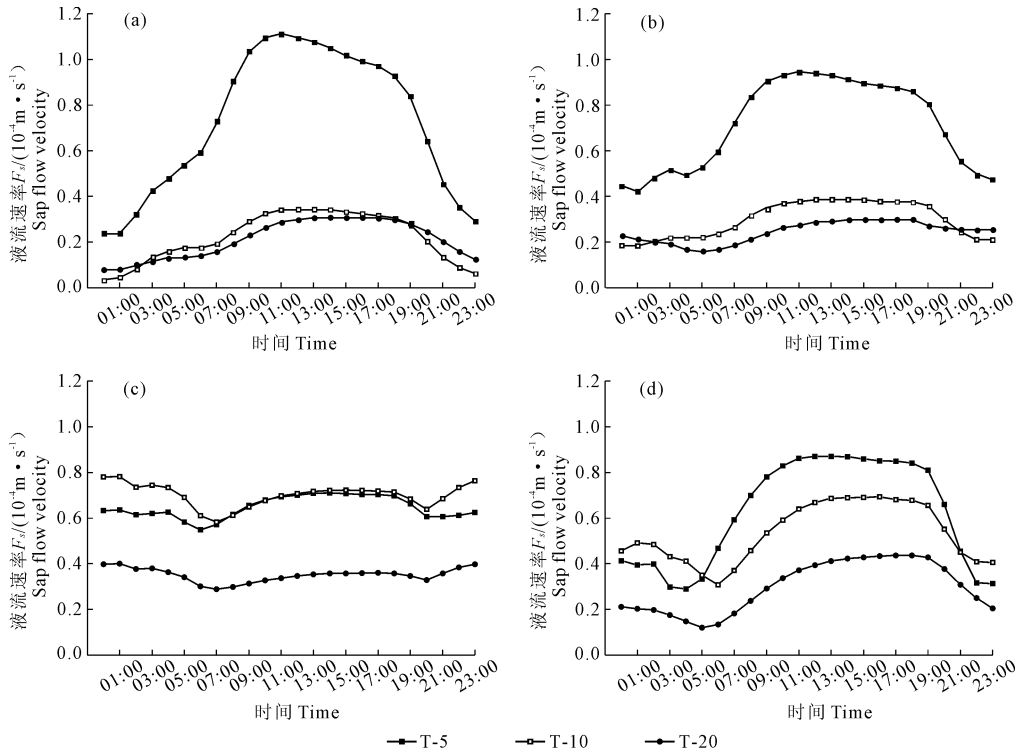
监测尺度 Monitoring scale	方位 Orientation	T - E	T - W	T - S	T - N
月 Month	T - E	—	0.711	0.432	0.933
	T - W	0.711	—	0.674	0.774
	T - S	0.432	0.674	—	0.482
	T - N	0.933	0.774	0.482	—
耗水量/mm Water consumption		124.28	183.93	148.20	370.63

2.2 不同深度 TDP 监测结果比较

2.2.1 不同深度 TDP 监测树干液流时尺度结果比较 由图 3 可知,在生育期的不同阶段,24 h 内不同深度探针监测值的变化规律基本相同。其中萌芽展叶期、开花坐果期和果实成熟期内不同深度探针监测值都有一个单峰,5 mm 探针(T - 5)的单峰持续时间最长,相对明显;10 mm 探针(T - 10)的单峰持续时间较 T - 5 短,明显程度较弱;20 mm 探针(T - 20)的单峰持续时间最短,且不明显,呈缓坡状。萌芽展叶期和开花坐果期内,不同深度探针监测值的大小为 T - 5 > T - 10 > T - 20,其中 T - 10 与 T - 20 之间无显著差异(P > 0.05,见表 5),其它不同深度探针监测值相互间均具有极显著差异(P < 0.01);果实膨大期内,不同深度探针监测值的大小为 T - 10 > T - 5 > T - 20,不同深度探针监测值相互间均具有极显著差异(P < 0.01);果实成熟期内,不同深度探针监测值的大小为 T - 5 > T - 10 > T - 20,其中 T - 5 与 T - 10 之间无显著差异(P > 0.05),其它不同深度探针监测值相互间均具有极显著差异(P < 0.01)。分析知,随生育期推进,T - 5 与 T - 10 监测值间的差异显著性由极显著逐渐变为无显著差异,说明随着生育期进行树干液流沿径向的分布是

从形成层向树心方向运移,且逐渐均匀,可能至枣树果实成熟还尚未达到 20 mm 深处,或有少量分布,还

不能显著影响 T-20 与 T-5 和 T-10 监测值间的差异。



注: (a) 萌芽展叶期 (M) (b) 开花坐果期 (K) (c) 果实膨大期 (P) (d) 果实成熟期 (C)

Note: (a) germination - frondescence stage (M) , (b) Flowering and fruit setting stage (K) , (c) Fruit expanding stage (P) , (d) Fruit ripening stage (C)

图 3 不同深度 TDP 监测时尺度结果比较

Fig. 3 The comparison of monitored results on hourly scale of TDP at different depth

表 5 不同深度 TDP 监测时尺度结果差异显著性检验 P 值
Table 5 The P value of difference significance test for monitored results on hourly scale of TDP at different depth

生育时期 Growth stage	探针 Probe	T-5	T-10	T-20
M	T-5	—	0.000	0.000
	T-10	0.000	—	0.923
	T-20	0.000	0.923	—
K	T-5	—	0.000	0.000
	T-10	0.000	—	0.196
	T-20	0.000	0.196	—
P	T-5	—	0.000	0.000
	T-10	0.000	—	0.000
	T-20	0.000	0.000	—
C	T-5	—	0.145	0.000
	T-10	0.145	—	0.000
	T-20	0.000	0.000	—

2.2.2 不同深度 TDP 监测树干液流日尺度结果比较 由图 4 可知,在整个生育期内,不同深度探针监测值的变化趋势为: T-5 监测值在整个生育期内的

变化趋势呈“M”型,两个峰值分别出现在 6 月 7 日和 9 月 20 日前后,谷值出现在 7 月 30 日前后; T-10 监测值在整个生育期内的变化趋势呈“S”型,在 7 月 23 号前日上升趋势明显,此后一直维持较高的水平,直至 10 月 23 日前后; T-20 监测值在此期间呈缓坡型先上升后下降,峰值出现在 9 月 23 日前后。7 月 28 日即 T-5 监测值谷值出现前, T-5 监测值远高于 T-10 和 T-20 监测值, T-5 谷值出现后 T-10 监测值上升至高于 T-5 监测值,两个深度探针的监测值远高于 T-20 监测值。结合在不同深度探针时尺度的研究可知,生育期初,枣树耗水量较小时,水分的运移主要在靠近形成层的外层木质部,随着枣树耗水增加,水分沿径向的分布范围逐渐向树心扩大, T-10 监测值逐渐增大,说明此时 10 mm 左右范围内的木质部为主要导水部分,耗水量减小后,水分运移的主要部分又向形成层靠近,表现为 T-5 监测值的增大,这与 Dragoni 等^[16]对糖枫的研究结果一致。在此期间 T-20 监测值虽然也在增大,但始终远低于 T-5 和 T-10 监测值,说明枣树耗水量增大时,水分运移沿径向的分布也影响到了 20 mm 左右范围内的木质部,由于试验树是今年新

嫁接枣树,后期并没有形成果实,耗水量还不能显著影响 20 mm 左右范围内的木质部。但是从树干液流速率的变化趋势来看,只有 T-20 监测值符合枣树生育期耗水量的变化,随枣树生物量和降雨量增大,耗水量也呈增大趋势,且由 T-20 监测值计算所得枣树耗水量与之前研究结果一致^[17-18]。因此,在计算枣树生育期耗水量时应采用 20mm 探针的监测值。

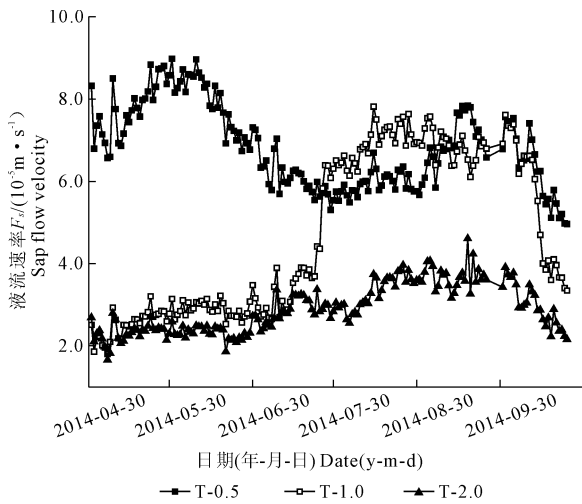


图 4 不同深度 TDP 监测日尺度结果比较

Fig. 4 The comparison of monitored results on daily scale of TDP at different depth

2.2.3 不同深度 TDP 监测树干液流月尺度结果比较 由图 5 可知,全生育期内不同深度 TDP 监测月尺度结果各不相同,其中 T-10 与 T-5、T-20 监测值之间无显著差异 ($P > 0.05$,见表 6),T-5 与 T-20 监测值之间具有显著差异 ($P < 0.05$)。同前面对不同方位探针监测值月尺度上的结果分析一样,当研究尺度放大以后,受误差的影响,监测值间的差异显著性发生变化,因此,小尺度树干液流监测值的准确获得对于提高整树蒸腾耗水量的监测精度有重要意义。

表 6 不同深度 TDP 监测月尺度结果差异显著性检验 P 值

Table 6 The P value of difference significance test for monitored results on monthly scale of TDP at different depth

监测尺度 Monitoring scale	探针 Probe	T-5	T-10	T-20
月 Month	T-5	—	0.207	0.043
	T-10	0.207	—	0.388
	T-20	0.043	0.388	—
耗水量/mm Water consumption		581.53	436.72	330.17

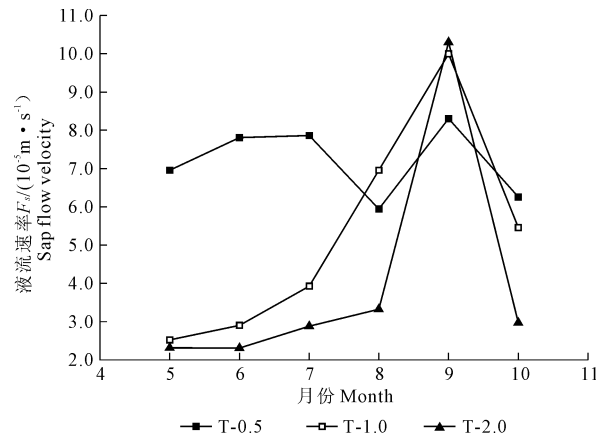


图 5 不同深度 TDP 监测月尺度结果比较

Fig. 5 The comparison of monitored results on monthly scale of TDP at different depth

3 讨论

关于不同方位 TDP 监测树干液流的研究, Fiora 等^[19]对银杉和 Ping Lu 等^[20]对挪威杉的研究中分别提出了这个问题,但并未做深入研究,孙守家等^[21]分别研究了银杏树干南侧、西侧和北侧的茎液流速率,比较了不同方位树干液流速率的大小;刘超等^[22]在对大叶女贞的研究中涉及到树干南北两个方位的树干液流速率,但他的研究主要针对树干液流的季节变化;李广德等^[23]在对三倍体毛白杨树干边材液流特性的研究中采用了在树干东、西、南、北 4 个方位安装 TDP 的方法,揭示了不同方位三倍体毛白杨边材液流的差异性、相互关系及其对环境因子的响应;孟秦倩等^[14]对苹果树树体不同方位液流速率分析的研究是目前见到唯一研究北方果树的报道,研究中采用了与李广德相同的方法,分析了不同方位探针测定结果的差异,研究了不同方位探针测定边材液流量与参考作物蒸散量的线性模型,并用水量平衡法计算耗水量来检验试验结果。以上研究只是得出了不同方位树干液流的分布与变化规律及其相关关系,并没有提出提高整树蒸腾估算量精度的方法,对于枣树的相关研究还未见报道。本次研究分别在树干东、西、南、北 4 个方位安装 TDP 用于监测树干液流,研究主要对比分析了时、日、月尺度上不同方位探针监测结果间的差异性,为今后研究中进一步探讨生育期不同阶段内不同方位监测结果与对应枣树蒸腾耗水量真实值之间的相关关系,挑选出计算不同阶段蒸腾耗水量所需方位的探针监测值,同时将不同方位的监测结果统一换算到常用方位,提高只在在一个方位安装了探针的枣树的蒸腾耗水量的计算精度提供依据。

关于不同深度 TDP 监测树干液流的研究, Drag-

oni^[16]等人在对糖枫的研究中虽然涉及到不同深度的TDP,但是其主要研究目的并不是比较不同深度TDP的监测结果,所以也并未提出不同深度TDP监测对于提高树干液流监测精度的作用。孙守家等^[21]在对银杏树的研究中采用了10 mm和20 mm两种长度的探针来监测银杏树不同深度的树干液流速率,比较了两种测量深度监测结果的大小;刘超等^[22]在对大叶女贞的研究中采用了10 mm、20 mm和30 mm三种长度的热扩散探针,比较了不同季节三个深度测量结果的大小变化,分析了径向液流的启动和停滞时间。上述研究以及孙慧珍等^[24]、王华等^[25]、张小由等^[26]、孙鹏森等^[27]都探索了树干液流密度沿径向分布的不均匀性,而对枣树不同深度树干液流的研究目前也未见报道,本次研究中采用了5 mm、10 mm和20 mm三种长度的热扩散探针,对比分析了不同深度探针监测结果在不同时间尺度和枣树不同生育期阶段的差异性,得到了枣树树干液流沿径向的分布规律。但是不同深度探针在生育期不同阶段与枣树蒸腾耗水量真实值的相关关系还有待进一步确定,以便根据不同时期枣树耗水量的变化采用不同深度的监测结果。鉴于之前只安装了20 mm探针,所以还应找出不同深度探针监测值在不同阶段的相关关系,统一换算到20 mm探针,从而将误差降到最低,这是在今后的研究中要解决的问题。

对于研究的不同时间尺度,时尺度和日尺度都可以较好地反映不同方位和不同深度探针监测值之间的差异,月尺度不能较好地反映出这种差异。今后在生育期内尺度上研究枣树蒸腾耗水量时可以采用日尺度,在能充分反映不同方位和不同深度探针监测值差异的同时,还能有效避免研究尺度扩大时产生的较大误差积累。

参考文献:

- [1] 王华田,张光灿,刘 霞. 论黄土丘陵区造林树种选择的原则[J]. 世界林业研究, 2001, 14(5): 74-78.
- [2] Wullschlegel S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole plant water use studies in trees [J]. Tree Physiology, 1998, 18: 499-512.
- [3] 马履一,王华田,林 平. 北京地区几个树种耗水性比较的研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 1-7.
- [4] Green S R, Clothier B E. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree [J]. Plant and Soil, 1998, 206(1): 61-77.
- [5] Green S R, Clothier B E, McLeod D J. The response of sap flow in apple roots to localized irrigation [J]. Agricultural Water Management, 1997, 33(1): 63-78.
- [6] 张 雷,孙鹏森,刘世荣. 树干液流对环境变化响应研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5600-5610.
- [7] Huber B. Beobachtung und messung pflanzlicher saftströme [J]. Ber Dtsch Bot Ges, 1932, 50: 89-109.
- [8] Cermak J, Deml M, Penka M. A new method of sap flow rate determination in trees [J]. Biol Plant, 1973, 15: 171-178.
- [9] Granier A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres [J]. Annales des Sciences Forestières, 1985, 42: 193-200.
- [10] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiology, 1987, 3: 309-320.
- [11] 刘庆新,孟 平,张劲松,等. 基于热扩散方法测定树木蒸腾的潜在误差分析[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3343-3350.
- [12] Infante J M, Mauchamp A, Fernandez Ales R, et al. Within tree variation in transpiration in isolated evergreen oak trees, evidence in support of the pipe model theory [J]. Tree Physiology, 2001, 21(6): 409-414.
- [13] 徐 飞,杨风亭,王辉民,等. 树干液流径向分布格局研究进展[J]. 植物生态学报, 2012, 36(9): 1004-1014.
- [14] 孟秦倩,王 健,张青峰,等. 黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析[J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3555-3561.
- [15] 吴普特,汪有科,韩宇平,等. 孟盆生态型现代农业发展模式创建与启示[J]. 中国发展观察, 2008, 2(11): 53-55.
- [16] Dragoni D, Caylor K K, Schmid H P. Decoupling structural and environmental determinants of sap velocity Part II. Observational application [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149: 570-581.
- [17] 辛小桂,吴普特,汪有科,等. 山地梨枣树耗水特征及模型[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7473-7482.
- [18] 刘守阳. 黄土丘陵沟壑区旱作山地枣林耗水规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [19] Fiora A, Cescatti A. Diurnal and seasonal variability in radial distribution of sap flux density: implications for estimating stand transpiration [J]. Tree Physiology, 2006, 26(9): 1217-1225.
- [20] Ping Lu, Warren J. Muller, Elias K. Chacko. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions [J]. Tree Physiology, 2000, 20(10): 683-692.
- [21] 孙守家,古润泽,丛日晨,等. 银杏树干茎流变化及其对抑制蒸腾措施的响应[J]. 林业科学, 2006, 42(5): 22-28.
- [22] 刘 超,李春友,张劲松,等. 生长季大叶女贞树干液流的径向分布特征[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 196-202.
- [23] 李广德,贾黎明,富丰珍,等. 三倍体毛白杨不同方位树干材液流特征研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(6): 1209-1218.
- [24] 孙慧珍,孙 龙,王传宽,等. 东北东部山区主要树种树干液流研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 36-42.
- [25] 王 华,欧阳志云,郑 华,等. 北京绿化树种油松、雪松和刺槐树干液流的空间变异特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(8): 924-937.
- [26] 张小由,龚家栋,周茅先,等. 胡杨树干液流的时空变异性研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 489-492.
- [27] 孙鹏森,马履一,王小平,等. 油松树干液流的时空变异性研究[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 1-6.