

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.025

种植年限对黄土丘陵半干旱区山地枣树蒸腾的影响*

魏新光¹ 王铁良¹ 刘守阳² 李波¹ 聂真义^{3,4} 汪有科^{3,4}

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 法国国家农业科学研究院地中海气候与农业水利系统模拟实验室, 阿维尼翁 84914; 3. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了研究山地成年枣树的蒸腾特征以及不同种植年限枣树蒸腾耗水的差异性, 运用 TDP 液流监测系统对山地枣树的蒸腾进行了连续 3 年的动态监测。通过分析发现: 枣树蒸腾日内变化呈单峰变化趋势, 而且随着生育期变化呈窄峰-宽峰-窄峰变化。水汽压亏缺 (VPD) 和光合有效辐射量 (PAR) 对枣树的蒸腾存在明显的时滞现象和阈值特征, 蒸腾对 VPD 和 PAR 响应的上限阈值分别为 3.5 kPa 和 1 000 ~ 1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。枣树全生育期逐日蒸腾呈现明显的单峰现象, 夜间蒸腾约占全日蒸腾的 5% ~ 33%。2012—2014 年不同树龄枣树蒸腾量由小到大依次为 3 a、5 a、12 a, 不同树龄枣树蒸腾耗水之间存在极显著的差异性 ($p \leq 0.01$), 而且年际之间的蒸腾波动变化规律不同。由于采取了树体修剪调控措施, 12 a 生成年枣树年际之间蒸腾差异并不显著 ($p > 0.05$), 各年耗水量基本稳定在 293 ~ 334 mm 之间。由此可见, 通过控制树体规模可以调控树体的水分消耗。

关键词: 枣树 蒸腾量 树龄 差异性

中图分类号: Q945.17⁺2; S665.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)07-0171-10

Effect of Planting Years on Jujube Transpiration in Semi-arid Hilly Areas of Loess Plateau

Wei Xinguang¹ Wang Tieliang¹ Liu Shouyang² Li Bo¹ Nie Zhenyi^{3,4} Wang Youke^{3,4}

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2. Unite of Modelling Agricultural and Hydrological Systems in Mediterranean Environment, French National Institute of Agronomic Research (INRA), Avignon 84914, France

3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the transpiration characteristics of matured jujube tree and their transpiration difference of different tree-ages, the transpiration of jujube tree were monitored continuously for three years with TDP sap flow monitoring system. The results indicated that the change of daily jujube transpiration showed a single peak trend, and the trend of narrow peak - wide peak - narrow peak appeared with the change of growth periods. Time-lag phenomenon and threshold existed distinctly in jujube transpiration influenced by VPD and PAR. The upper thresholds of VPD and PAR responding to the transpiration were 3.5 kPa and 1 000 ~ 1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Daily jujube transpiration showed a single peak trend obviously during the whole growth period, the proportion of nighttime transpiration was about 5% ~ 33% of the full-day transpiration. The order of jujube transpiration from large to small was 3 a, 5 a and 12 a during 2012—2014. The significant differences were found between transpiration

收稿日期: 2015-04-27 修回日期: 2015-05-14

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B04、2013BAD20B03)、林业公益性行业科研专项资金资助项目(20140470)和陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2013KTZB02-03-02)

作者简介: 魏新光, 讲师, 博士, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: weixg_wi@163.com

通讯作者: 汪有科, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物高效用水和水土保持研究, E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

($p \ll 0.01$), and the interannual variations (C_v) of transpiration were different. The transpirations of 12 a jujube were not significantly different among years ($p > 0.05$), annual water consumption was basically stable at 293 ~ 334 mm. Thus, the jujube transpiration scale gradually expanded with the increase of ages, but it could remain stable relatively by taking reasonable pruning measures.

Key words: Jujube tree Transpiration Tree-age Divergence

引言

陕北黄土高原地区干旱少雨,生态脆弱,水土流失严重,极端气象(灾害)事件频发^[1]。由于农业生产条件制约,农业生产水平和效益都低下,可耕植物的种类和规模都受到了一定限制^[2]。枣树是黄土高原地区的传统经济生态树种,由于其具有良好的耐干旱、耐瘠薄、耐极端气候条件特性在陕北广泛种植,被誉为“铁杆庄稼”^[3]。长期以来,国家为了改善当地的生态环境,实施了一系列生态治理和修复工程,特别是1999年以来,以“退耕还林还草”为主要内容生态修复工程的大面积实施,使得陕北的植被覆盖率和生态环境有了明显的改善。以枣树为代表的生态经济林种植面积逐年扩大^[4],1999年不足 $5.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$,2008年发展到 $1.33 \times 10^5 \text{ hm}^2$,截止2014年底突破 $2.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[5-6]。随着枣树种植年限的增加,枣树从幼林发展为成年林,耗水规模逐渐扩大。同时不同种植年限枣树的蒸腾耗水过程也存在一定差异,这使得枣园水分消耗的时空变异性进一步增加。前期研究表明,长期的造林可能导致林地土壤水分出现干燥化现象,甚至出现土壤水分干层^[7]。这种现象的出现对于林木的生长发育是极为不利的,会造成树木结果能力下降,树木生产缓慢(小老头现象)^[8],在土壤水分长期严重亏缺情况下,甚至会导致成年林的大面积枯死,所以准确把握成年枣树的蒸腾耗水特征十分重要。传统研究树木水分消耗的方法主要通过取土烘干法测定土壤含

水率,结合降雨、入渗等资料运用水量平衡原理求得。但是该方法存在明显不足:一方面树木根系较深,计划湿润层深度和范围很难准确界定,同时土钻取土不能原位取样,土壤水分测点的随意性较大,由此计算结果的误差也较大;另一方面,由于不能动态取样,只能监测较大时间尺度(数天或旬)上的水分变化,不能捕捉树木动态水分消耗特征,无法在较小时间尺度上分析瞬时蒸腾和影响因子的作用关系^[9-10]。为了较为准确地掌握枣林的蒸腾耗水特征,从2012年开始,采用TDP树干液流监测系统对不同树龄枣树的液流状况(瞬时蒸腾)进行连续3a的动态监测,并对12a生成年枣林的蒸腾耗水特征进行重点研究,同时对不同种植年限枣树的蒸腾耗水差异性进行比较。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于陕西省榆林市米脂县($109^\circ 28' \text{ E}$ 、 $37^\circ 12' \text{ N}$),该区处于黄土高原腹地,沟壑纵横、水土流失严重,是典型的黄土丘陵沟壑区地貌,海拔高度870~990 m。气候属于中温带半干旱型气候区,气候干燥,蒸发强烈,年均日照时数2761 h,日照百分率为62%,年总辐射量 580.5 kJ/cm^2 ,年平均气温 8.4° C ,年均降水量451.6 mm,其中7—8月份降水量占全年降水量的49%^[11]。试验基地土壤为黄土母质上发育的黄绵土,较为贫瘠,理化性质如表1所示。

表1 试验地土壤主要理化性质

Tab.1 Main soil physicochemical property on study plot

土壤类型	全氮质量比 $/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	全磷质量比 $/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	全钾质量比 $/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	有机质质量比 $/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	饱和含水率/%	田间持水率/%	0~1 m 土层容重 $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	pH 值
黄绵土	34.7	2.9	101.8	2.1	39.8	23.4	1.29~1.33	8.6

1.2 试验布设与指标测定

1.2.1 试验布设

试验在米脂县浩海枣业有限公司的种植基地内进行。该基地从2000年开始建设,主要种植梨枣树(*Ziziphus jujube* Mill.),采用矮化密植型修剪栽培模式,栽植密度为1666株/ hm^2 ,株行距为2 m × 3 m。由于基地每年都有新增植面积,本研究选取2000、

2007和2009年种植的树龄分别为12 a、5 a和3 a的枣树进行液流观测。在每个区域分别选取4株长势一致、树木基干顺直的梨枣树作为被试树木。试验布置如图1所示,样地林分特征如表2所示。

1.2.2 树干液流监测

采用TDP-20型热扩散式液流探针(Thermal diffuse probe-20, Rainroot Co., 中国)对枣树液流

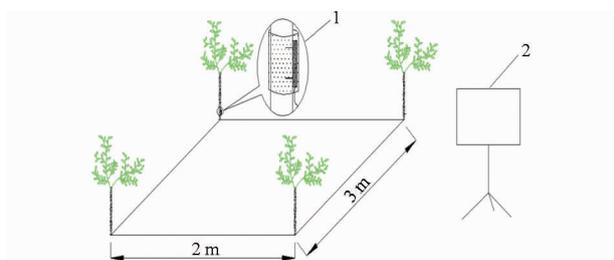


图1 试验布置图

Fig.1 Testing arrangement

1. TDP 液流监测探针 2. 气象站

表2 样地林分基本特征

Tab.2 Stand characteristics of study plot

树龄 /a	平均 树高/m	树干横截 面积/m ²	平均冠幅 直径/m	杂草	产量 /(kg·hm ⁻²)
3	1.72	0.138 5	1.26	无	14 550
5	2.15	0.331 8	1.72	无	15 300
12	2.26	0.567 4	1.96	无	16 500

注：由于均采用矮化密植栽培模式，平均树高和冠幅直径经过人为修剪控制，差异不大，树干横截面积为地表10 cm以上树木主干的横截面积。

状况进行动态监测，液流观测时间为2012年5月1日—2014年10月20日。为消除安装方位、高度等引起的监测误差，将TDP探针统一安装在离地10 cm高度的树干北侧，为防止环境温度对TDP测温探针的影响，用防晒膜对探针进行包裹，如图1所示。使用CR1000型数据采集器(Campbell Co., 美国)进行数据采集，采集频率为10 min/次。采用Granier经验公式^[12]计算树瞬时液流速率(SF)，即

$$v_i = 1.19 \times 10^{-4} (\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T^{1.231} \quad (1)$$

式中 v_i —— i 时刻的瞬时液流速率, m/s

i ——测定时序

ΔT ——TDP传感器两测温探针监测实时温差, °C

ΔT_{\max} ——在监测时间段内 ΔT 的最大值, °C

1.2.3 气象因子监测

气象因子监测采用布设在试验地附近的自动气象站(SQ2010, Grant Co., 英国)测得。监测要素包括：降雨量(P , mm)、总辐射(R , W/m²)、光合有效辐射量(R_{PAR} , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、风速(V , m/s)、温度(T , °C)、相对湿度(R_{RH} , %)和饱和水汽压亏缺(R_{VPD} , kPa)。 R_{VPD} 是当时温度下空气中饱和水汽压(e_s)和实际水汽压(e_a)之间的差值，计算式为^[13]

$$R_{VPD} = e_s - e_a = (1 - R_{RH}) e_s \quad (2)$$

$$e_s = 0.610 8 e^{17.277 / (T + 273.3)} \quad (3)$$

1.2.4 枣树日蒸腾量确定

枣树日蒸腾量 T_{rj} 和月蒸腾量 T_r 计算公式为

$$T_{rj} = \int_0^{24} \frac{0.6 v_i t A}{L_{col} L_{row}} dt \quad (4)$$

$$T_r = \sum_{j=0}^k T_{rj} \quad (5)$$

式中 T_{rj} ——第 r 月 j 日的蒸腾量, mm

v_i —— t 时刻的液流速率, m/s

L_{col} ——株距, 取 3 m

L_{row} ——行距, 取 2 m

A ——边材面积, cm²

T_r ——第 r 月的月蒸腾量, mm

其中边材面积 A 的确定需根据边材面积和胸径关系转换而得到，具体确定步骤参照文献[13]，过程略。

2 结果与分析

2.1 典型日液流(瞬时蒸腾)动态

树体的蒸腾和气象因子关系密切，大量研究结果表明，辐射、气温、相对湿度、风速等的变化均会影响树体的蒸腾^[9-10, 12-15]，同时诸气象因子之间也存在较强的相关性，基于此，赵平等^[13]对气象因子进行整合，确定了2个综合气象因子：光合有效辐射量(PAR)和饱和水汽压亏缺(VPD)，前者反映了太阳辐射中能被植物吸收利用的能量，后者反映了叶片和大气之间的水汽压梯度。在2012年枣树的生育期内分别选取了5月13日、7月15日、9月13日和10月2日4个代表日(除10月2日为阴天外，均为晴天)，对12 a生成年枣树液流速率和VPD、PAR日内动态变化规律进行重点分析(图2)。发现液流速率和VPD、PAR在日内变化均呈单峰变化。除阴天(图2d)以外，三者均在早晨(06:00—07:00)开始上升，PAR在13:00达到峰值，然后开始下降，较大值维持时间很短，呈明显窄峰变化；VPD达到峰值以后会维持一段时间，直至18:00—20:00才开始显著下降，呈明显的宽峰现象；液流速率在生育期不同阶段的变化差异比较大，其在随VPD和PAR启动后，率先达到峰值，在生育初期的5月份迅速下降，呈明显的窄峰变化趋势，但是在生育旺盛的7—9月份，液流速率能够保持较长时间的旺盛蒸腾，下午液流速率下降的时间稍晚于PAR而略早于VPD。在阴天(图2d)三者的变化规律没有发生改变，但是峰值出现的时间推后，旺盛蒸腾持续的时间缩短。总体而言，虽然三者日内均呈单峰变化，但变化仍然存在一定差异。VPD呈宽峰变化趋势，PAR呈窄峰变化趋势，液流速率随着生育期的变化呈现窄峰—宽峰—窄峰变化趋势。

2.2 液流的时滞现象

由图2可知，液流速率和PAR、VPD 2因子日内均呈现单峰变化，但三者日内的变化并不同步，这种

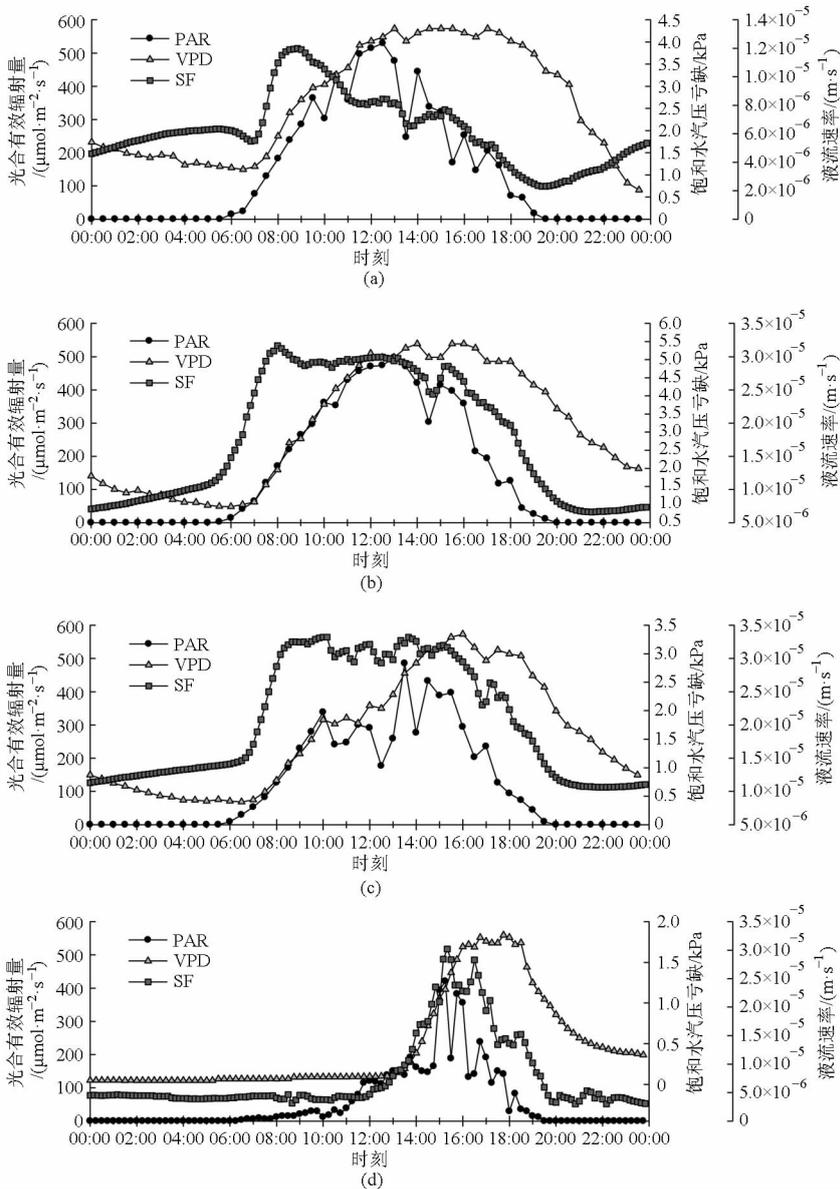


图2 典型日液流和驱动因子的关系

Fig.2 Relationship between classic sap flow and driving factors

(a) 5月13日 (b) 7月15日 (c) 9月13日 (d) 10月2日

液流和气象因子变化的不同步现象就是液流的“时滞”现象(Time-lag)^[14]。为了进一步研究气象因子和液流的时滞特征,将液流日内变化划分为:启动时间、到达峰值时间、开始下降时间和基本停滞时间4个重要的时间节点,在这4个时间节点上对VPD、PAR和液流速率的响应关系做重点分析。总体而言,三者启动时间几乎同步;达到峰值时间液流速率(SF)最早、PAR次之、VPD最后;开始下降时间PAR最早、液流速率次之、VPD最后,但不同代表日内其时滞时长仍存在差异(表3)。VPD对液流速率的时滞现象比较明显,其在启动时间上和液流速率几乎同步或略有滞后(时滞时间0~1h)。到达峰值时间、开始下降时间和基本停滞时间的时滞时间均为正值,且最大时滞时间达到5.5h(5月13日)。

PAR对液流速率的时滞效应比较复杂:首先,在启动时间上PAR的滞后时间为零或者负值,即液流速率同时启动或者略微滞后于VPD,液流速率启动时间比光照时间晚,说明要激发树体液流速率的启动,需要光合有效辐射量达到一定的阈值,换言之,较弱的光照强度不足以启动液流速率。其次,在到达峰值时间上PAR均为正值,而下降时间均为负值。即在PAR到达峰值之前液流速率已经提前停止上升,但是液流速率的下降要晚于PAR的下降,最后,在液流速率基本停滞时间上PAR有时滞后,有时提前。说明这一时间节点上影响因素较多,关系较复杂,还有待进一步研究。

2.3 液流速率和气象因子的关系

为了进一步研究液流速率和驱动因子的响应关

系。对液流速率上升、下降阶段和 2 驱动因子的关系分别进行研究,发现在上升阶段(图 3a、3c)液流速率和 VPD、PAR 之间存在极显著的正相关关系,决定系数 R^2 值分别达到了 0.80 和 0.76。当液流速率开始启动时,随着 VPD 和 PAR 的上升而逐步提高,但是当 PAR 达到 $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 或者 VPD 达到 3.5 kPa 时,液流速率开始保持基本恒定。同样在液流下降阶段(图 3b、3d),起初液流速率并未随着 PAR 和 VPD 的下降而显著下降,但当 PAR 下

降到 $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 或 VPD 下降到 3.5 kPa 以后,液流速率开始显著降低,而且其回归关系也十分显著,决定系数分别达到 0.81 和 0.43。总体而言,VPD、PAR 不论在上升阶段还是下降阶段均和液流速率有较为显著的相关性,然而和 PAR 回归的决定系数(R^2)高于 VPD,这说明 PAR 对蒸腾的影响更为显著,此外 VPD 的决定系数在下降阶段明显小于上升阶段,这主要由于“时滞”现象的存在,而且液流速率下降过程中更为显著^[14-15]。

表 3 水汽压亏缺、光合有效辐射量与液流速率的时滞时间比较

Tab.3 Time-lag comparison between VPD, PAR and SF

典型日	启动时间			达到峰值时间			开始下降时间			基本停滞时间		
	SF	与 SF 的时滞时间/h		SF	与 SF 的时滞时间/h		SF	与 SF 的时滞时间/h		SF	与 SF 的时滞时间/h	
		VPD	PAR		VPD	PAR		VPD	PAR		VPD	PAR
05-13	07:00	0	-0.5	08:30	3.0	4.0	15:30	5.5	-2.5	19:50	4.5	-0.3
07-15	06:00	0.5	0	08:00	4.0	5.0	15:30	2.5	-2.5	21:00	2.0	-1.0
09-13	07:00	0	-1.0	08:30	7.5	5.0	15:10	3.3	-2.0	20:30	3.5	0.5
10-02	12:00	1.0	0	13:20	2.8	3.0	18:00	0.5	-2.8	00:00	1.5	-4.5

注:表中与 SF 的时滞时间是以 SF 为参考,正数表示滞后于 SF 的时间,负数表示提前于 SF 的时间。

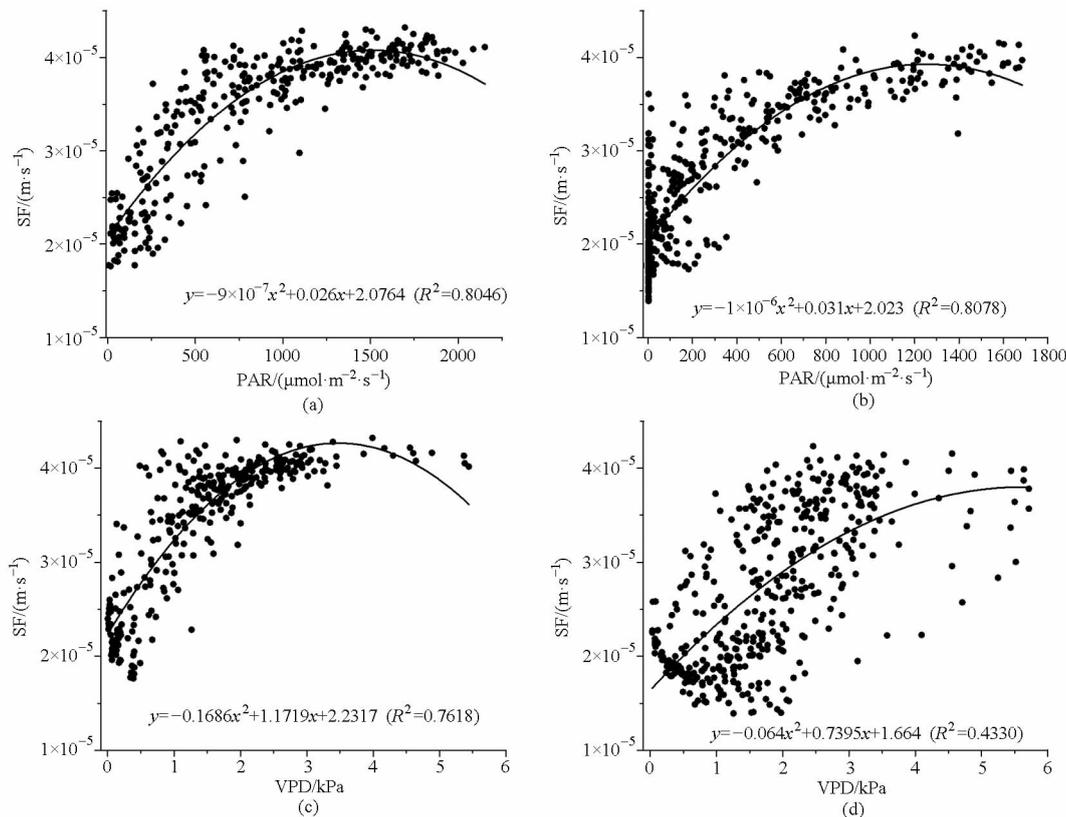


图 3 液流速率上升和下降阶段与主要驱动因子的关系

Fig.3 Relationship between main driving factors and sap flow during ascent and descent stage

(a) PAR 上升阶段 (b) PAR 下降阶段 (c) VPD 上升阶段 (d) VPD 下降阶段

2.4 全天蒸腾与夜间蒸腾

根据图 2 可知,枣树蒸腾全天都在进行,夜间虽然微弱但并未完全停止。为此选取枣树 2012 年全生育期逐日蒸腾数据进行重点分析(图 4),发现枣

树的全天蒸腾和夜间蒸腾的逐日变化规律并不一致,日蒸腾量在生育期内呈现一定的单峰变化趋势,生育初期和末期均较低(小于 1 mm),生育中后期较高(2~3 mm);而生育期的夜间蒸腾量总体在 0.1~

0.4 mm 之间变化,而且呈逐渐上升的趋势。通过对夜间蒸腾量占日蒸腾量的百分比进行统计分析(图4b),发现夜间蒸腾量占全天蒸腾量的百分比符

合二次曲线变化($R^2 = 0.6516$),夜间蒸腾量约占全天蒸腾量的百分比在生育中期较低(5%~10%),到生育末期最高(大于30%)。

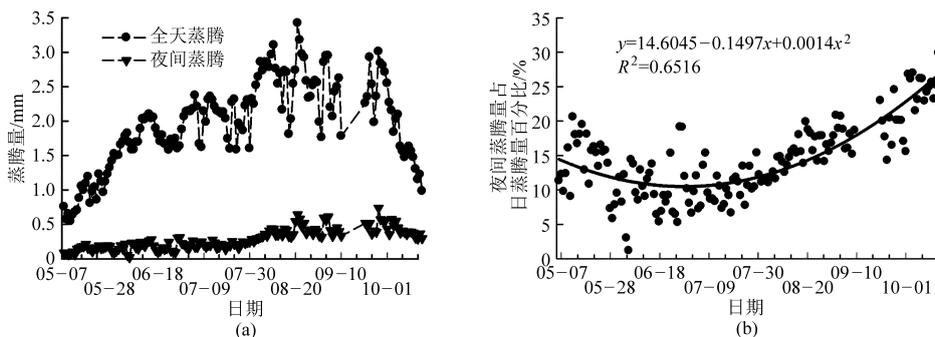


图4 2014年枣树日蒸腾量与夜间蒸腾量

Fig. 4 Daily transpiration and night transpiration of jujube tree in 2014

(a) 全天蒸腾和夜间蒸腾 (b) 夜间蒸腾占日蒸腾量的百分比

2.5 生育期逐月蒸腾量

对2012—2014年枣树逐月蒸腾量进行统计(图5),发现枣树逐月耗水量也呈现单峰变化趋势,在生育期始末的5月份和10月份蒸腾量较小,7—9月份蒸腾量较大,月平均蒸腾量达60~80 mm。2013年由于生育期较其他2年有所提前(表2、3),所以5月份蒸腾耗水量明显高于同期,而10月份蒸腾量明显低于同期。2012、2013和2014年生育期总耗水量分别为(307.27 ± 35.27) mm、(334.11 ± 34.17) mm和(293 ± 32.47) mm。通过对12 a生成年枣林逐月耗水的差异性分析发现, $F(a) = 0.13 < F_{0.05}(2, 15) < F_{0.01}(2, 15)$ (a 表示树龄),可见成年枣林蒸腾耗水年际差异不显著。虽然随着种植年限的增加,成年林的树龄也相应增加,但是成年林蒸腾耗水并未随着树林的增加而继续扩大,而是保持基本稳定。这主要是由于当地果园普遍采用了矮化密植技术,将树体株高控制在2.2 m左右,冠幅直径控制在2 m左右,每年树体规模和叶面积规模保持基本稳定,使得蒸腾耗水也保持基本稳定。这说明采用矮化密植技术对于枣树蒸腾调控和果园水分管理都是十分有意义的。

2.6 不同树龄枣树蒸腾的差异性

树龄也是影响枣树蒸腾的重要影响因子,枣树从定植到发育为成年树需要6~8 a,在试验地选取初植林、幼林和成年林蒸腾情况进行对比分析,由于新栽植的1~2 a树苗树干过细、生长较快,无法布设TDP插入式探针,所以选取2009年种植的3 a生树作为幼林枣树,将树体冠层并未完全闭合的5 a生枣树作为幼林和12 a生成年枣林蒸腾状况进行动态监测和对比分析(图6)。发现不同树龄枣树之间蒸腾规律基本相同,而且随着树龄的增加,枣树的耗水逐步增加。不论是2012、2013还是2014年,枣树的日蒸腾量均为3 a生枣树最小,5 a生枣树次之,12 a生枣树最大。

在生育期的不同阶段,各树龄枣树的蒸腾耗水规律也不同,在生育初期,不同树龄枣树之间都呈上升趋势而且差异不大,但是在枣树生长的中后期6—9月,不同树龄之间耗水均比较旺盛,而且差异也最为显著,在2012年的生育期,12 a、5 a、3 a生枣树的最大日蒸腾耗水量达到4.4、2.6、1.8 mm。2013年达到4.3、3.5、2.5 mm。2014年达到4.9、3.6、2.2 mm。在生育末期树体的蒸腾均有显著降低,在这一阶段树体果实已经成熟,树体开始落叶,树体的蒸腾下降迅速。

不论是2012、2013还是2014年,在枣树开始萌发的初期,不同树龄枣树之间的蒸腾差异均不十分显著,特别是2014年(图6c),整个5月份枣树的蒸腾耗水都比较微弱,而且没有显著差异,这主要是因为2014年5月5日陕北地区发生了一次的严重的冻害,最低气温-2℃,枣树的萌发受到严重的抑制,甚至停滞。而在7月份以后,随着夏季降雨的增多,土壤水分逐渐恢复,不同树龄枣树的蒸腾差异均开始加大。特别是到了8—9月份,降雨进一步增

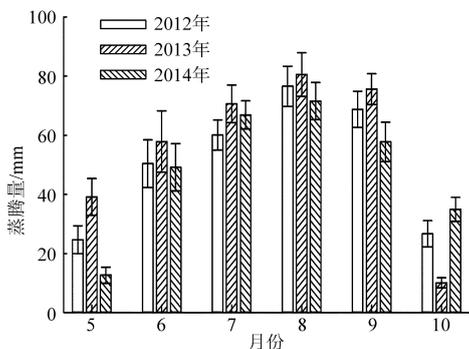


图5 枣树逐月蒸腾量

Fig. 5 Monthly transpiration of jujube tree

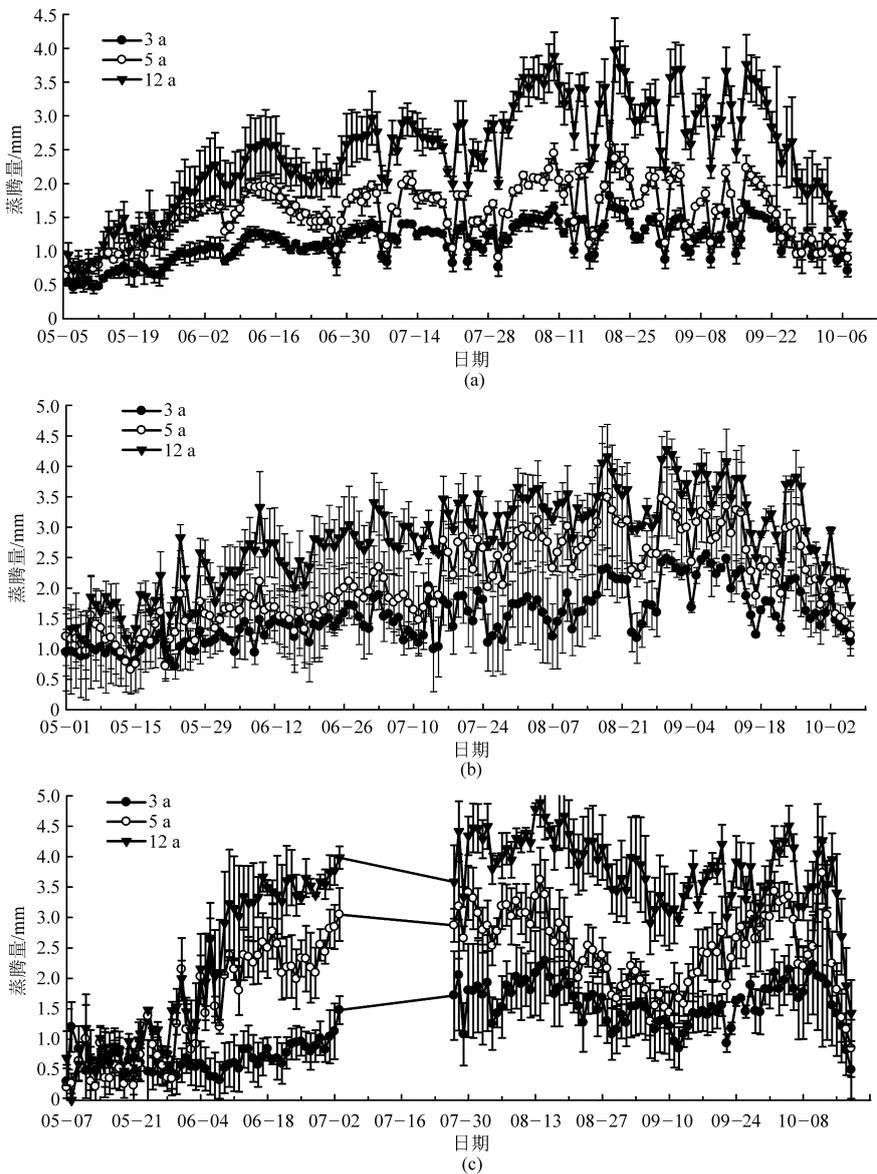


图6 不同树龄枣树生育期逐日蒸腾耗水动态曲线

Fig. 6 Dynamics curves of transpiration during growth of jujube tree at different tree ages

(a) 2012年 (b) 2013年 (c) 2014年

加,不同树龄枣树蒸腾耗水的梯度进一步增大。在生育期末,随着果实的成熟,树体开始落叶,生命活动迅速减弱,不同树龄枣树的蒸腾都迅速下降,树体开始转入冬季休眠。

从表4可以看出,在 $\alpha = 0.01$ 水平下,不论是2012、2013、2014年还是3年的综合统计,其 F 值均大于对应的 $F_{0.01}$ 临界值,且显著性水平 $p < 0.01$ 。由此可见3 a、5 a和12 a不同树龄枣树的蒸腾耗水存在极其显著的差异性。

2.7 不同树龄枣树蒸腾的变异规律

不同树龄枣树蒸腾耗水存在显著的差异性,通过对不同树龄枣树日蒸腾的变异系数(C_v)的变化规律进行统计(图7),发现其变异系数的变化规律年际之间存在差异(表5)。在2012年和2014年,其变异系数均为生育期始末比较小(C_v 值为20%~

30%),而在生育中期较大(C_v 值为40%~60%),变化规律符合二次曲线变化($R^2_{2012} = 0.6061, R^2_{2014} = 0.3196$)。而在2013年由于生育初期和生育中后期其变异系数都比较低,所以符合三次曲线变化($R^2_{2013} = 0.3438$),本年后期变异系数偏低,可能与当年生育后期降雨偏多和阴天较多导致辐射偏低有关。

3 讨论

VPD和PAR对蒸腾有明显的促进作用,但是这种促进作用存在明显的时滞现象和阈值现象。蒸腾会先于气象因子变化达到峰值,从而使得气象因子变化达到峰值的时间滞后。树体的液流速率对气象因子变化的响应存在阈值的现象,可以有效地避免树体的过量蒸腾。已有研究表明,当蒸腾驱动因子

表4 不同树龄枣树蒸腾差异显著性分析

Tab.4 Significant analysis of jujube transpiration at different tree ages

年份	差异源	离差平方和	自由度	均方差	显著性水平		
		SS	df	MS	F 值	p	F _{0.01}
2012	组间	142.149 4	2	71.074 7	244.583 8	3.59 × 10 ⁻⁷³	4.651 381
	组内	134.254 7	462	0.290 594			
	总计	276.404 1	464				
2013	组间	132.252 6	2	66.126 3	153.679 7	3.58 × 10 ⁻⁵²	4.650 203
	组内	203.955 8	474	0.430 287			
	总计	336.208 4	476				
2014	组间	256.578 3	2	128.289 1	149.348 9	1.02 × 10 ⁻⁴⁹	4.656 036
	组内	360.775 6	420	0.858 989			
	总计	617.353 9	422				
3年综合	组间	444.857 8	2	222.428 9	359.818 5	3.5 × 10 ⁻¹²⁶	4.620 776
	组内	841.947 2	1362	0.618 17			
	总计	1286.805	1364				

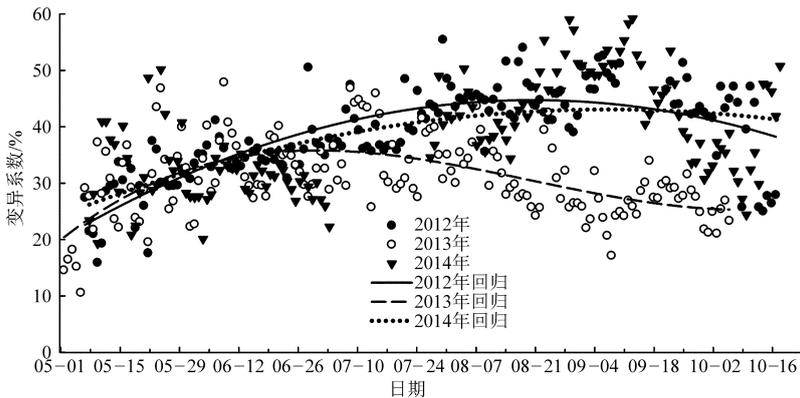


图7 不同树龄枣树生育期蒸腾耗水的变异系数

Fig.7 C_v of transpiration in different growth periods of jujube tree

表5 不同树龄枣树生育期蒸腾耗水的变异系数回归方程

Tab.5 Regression equation of C_v on transpiration of jujube at different tree ages

年份	线型	方程	决定系数	显著性水平	样本数
2012	二次曲线	$y = 20.0725 + 0.4391x - 0.002x^2$	0.606 1	$p < 0.01$	155
2013	三次曲线	$y = 19.8311 + 0.6004x - 0.0068x^2 + 2.025 \times 10^{-5}x^3$	0.343 8	$p < 0.01$	159
2014	二次曲线	$y = 24.2609 + 0.2891x - 0.0011x^2$	0.319 6	$p < 0.01$	143

过于强烈,特别是 PAR 过高时,树体会启动“午休”机制,通过部分或全部关闭叶片的气孔,减缓蒸腾作用,从而使得植物免受过分失水带来的危害,前人对葡萄^[16]、苹果^[17]和柠檬树^[18]液流的研究也得到了类似的结果。

VPD 和 PAR 因子在上升和下降阶段对 SF 响应的阈值也存在差异。VPD 阈值在液流速率上升和下降阶段基本相同,约为 3.5 kPa,但是 PAR 阈值却不相同。PAR 在上升阶段阈值 1 200 μmol/(m²·s)略高于下降阶段的阈值 1 000 μmol/(m²·s),这可能是由于达到下降阈值时的环境温度高于达到上升阈值时候的环境温度。前人研究表明,较高的环境温度能够降低 PAR 的阈值^[19]。VPD 的阈值比较稳定,但是不同树种间仍然有差异显著。Liu 等^[17]通

过对苹果树的研究发现,当 VPD 降低到 4.0 kPa 以下时,VPD 和液流速率呈现良好的线性相关关系,但当 VPD 继续增加,液流速率将不再增大,而保持稳定。研究区域的不同也会带来阈值的差异,Hogg 等^[20]和 Hernandez-Santana 等^[21]在对美国山杨和河岸混交防护林的研究中,VPD 的阈值变为 1 kPa。PAR 的阈值在成熟山毛榉^[22]是 900 μmol/(m²·s),亚洲温带落叶混交林^[23]中是 55 mol/(m²·d)。然而其他研究人员的研究结果未明确给出 VPD 线性响应的阈值点^[24-25]。枣树是黄土高原地区种植的传统耐旱型树种,这使得其阈值比观察到的其他耐旱型要低。

枣树的蒸腾主要受到 PAR 和 VPD 的影响,因此任何一个因子数值的增加,均有导致树体蒸腾出现加剧的趋势。而较高的蒸腾强度往往降低了树体

的水势^[26]。当树体蒸腾的需求超过树体根系吸水能力的时候,必然导致树体水分的亏缺^[27-28],严重的树体水分亏缺还能导致树体的凋萎甚至死亡^[29-30]。一般情况下,树体的蒸腾可以通过 PAR 或者 VPD 进行估算,但是当这些驱动因子的数值超过了蒸腾强度的阈值,叶片的气孔开度会有所降低,甚至关闭。从而限制树体的蒸腾强度,避免了树体的过分失水,实现了对水分的保守型利用^[31],同时这也是生长在广大干旱半干旱地区地区植物的一种节水抗旱机制。在陕北的黄土高原地区,气候干燥,高时滞时间是当地植物的共有特性^[15,32-33]。

4 结论

(1) 枣树蒸腾日内呈现明显的单峰变化趋势,而且在整个生育期的不同阶段分别呈现窄峰-宽峰-窄峰变化。VPD 和 PAR 两大综合气象因子对蒸腾变化存在极为显著的正相关关系,而且存在明显的阈值现象,当气象因子达到阈值上限,蒸腾将不增加而保持基本稳定,从而有效降低蒸腾,实现对土壤水分的保守型利用。

(2) 枣树生育期蒸腾呈现明显的单峰变化趋势,在生育中期蒸腾量较大(2~3 mm),生育初期和末期蒸腾量较小(小于 1 mm)。生育期夜间蒸腾在 0.1~0.4 mm 之间波动,夜间蒸腾占全天蒸腾的百分比在生育末期最大(大于 30%),而在生育中期最小(5%~10%)。

(3) 不同树龄枣树蒸腾耗水规律基本一致,在生育期始末不同树龄枣树蒸腾耗水强度差异不大,而在生育中期随着树龄增加,日蒸腾耗水强度明显增加。由于采取了矮化密植修剪措施,成年枣树(12 a)的蒸腾耗水规模不再随着树龄的增加而增加,而基本稳定在 293~334 mm 之间。

(4) 不论是 2012、2013、2014 年还是 3 年综合数值,不同树龄枣树之间的蒸腾耗水存在极为显著的差异性,但是在不同年份,各树龄枣树蒸腾的波动系数变化规律不同,2012 年和 2014 年,其变异系数在生育期始末比较小(C_v 值为 20%~30%),而在生育中期较大(C_v 值为 40%~60%),呈现二次曲线变化。而 2013 年生育初期和中后期的 C_v 都比较低,呈现三次曲线变化。

参 考 文 献

- 1 韩永伟,高吉喜,王宝良,等. 黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值[J]. 农业工程学报,2012, 28(17):78-85, 294.
Han Yongwei, Gao Jixi, Wang Baoliang, et al. Evaluation of soil conservation function and its values in majoreco-function areas of Loess Plateau in Eastern Gansu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 78-85, 294. (in Chinese)
- 2 易浪,任志远,张翀,等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学,2014, 36(1):166-174.
Yi Lang, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2014, 36(1):166-174. (in Chinese)
- 3 冯宝春,陈学森,何天明,等. 枣树抗旱性研究初报[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2004, 22(5):397-400.
Feng Baochun, Chen Xuesen, He Tianming, et al. Preliminary study on drought resistance of jujube [J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2004, 22(5):397-400. (in Chinese)
- 4 吴普特,汪有科,韩宇平,等. 孟岔生态型现代农业发展模式创建与启示[J]. 中国发展观察,2008(11): 53-55.
Wu Pute, Wang Youke, Han Yuping, et al. Create and insprate the modern of ecological agriculture development in Mengcha [J]. China Development Observation, 2008(11): 53-55. (in Chinese)
- 5 郭鹏,李新岗. 陕北红枣产业发展现状和对策[J]. 陕西林业科技,2000, 11(4):1-3.
- 6 新华网. 红枣产业成为黄河沿岸脱贫致富的“铁杆庄稼”[EB/OL]. [2014-10-26]. http://news.xinhuanet.com/fortune/2014-10/26/c_1112980371.htm.
- 7 王力,邵明安,王全九,等. 黄土区土壤干化研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5):27-31.
Wang Li, Shao Ming'an, Wang Quanjiu, et al. Review of research on soil desiccation in the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5):27-31. (in Chinese)
- 8 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
Guo Zhongsheng, Shao Ming'an. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1640-1647. (in Chinese)
- 9 Trcala M, Čermák J. Improvement of the trunk heat balance method including measurement of zero and reverse sap flows[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 166(15):120-126.
- 10 Bleby T M, Pfautsch S, 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, 2015, 259(6): 1190-1199.
- 11 赵英,汪有科,韩立新,等. 山地枣树茎直径对不同生态因子的响应[J]. 生态学报,2012, 32(17):5476-5483.
Zhao Ying, Wang Youke, Han Lixin, et al. Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17):5476-5483. (in Chinese)

- 12 Granier A. Evaluation of transpiration in adouglas-first and bymeans of sap flow measurements[J]. *Tree Physiol*, 1987, 3(4): 309 – 320.
- 13 赵平,邹绿柳,饶兴权,等. 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 6038 – 6048.
Zhao Ping, Zou Lüliu, Rao Xingquan, et al. Water consumption and annual variation of transpiration in mature acacia mangium plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6038 – 6048. (in Chinese)
- 14 Chen Lixin, Zhang Zhiqiang, Li Zhandong, et al. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in northern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 402(3): 388 – 400.
- 15 Yin L H, Hou G C, Huang J T, et al. Timelag between sap flow and climatic factors in arid environments[J]. *Advances in Environmental Science & Engineering*, 2012, 518 – 523: 1647 – 1651.
- 16 Zhang Y, Kang S, Ward E J, et al. Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in Northwest China: dynamics and influential factors[J]. *Agricultural Water Manage*, 2011, 98(8): 1207 – 1214.
- 17 Liu C, Du T, Li F, et al. Trunk sap flow characteristics during two growth stages of apple tree and its relationships with affecting factors in an arid region of Northwest China[J]. *Agricultural Water Manage*, 2012, 104(2): 193 – 202.
- 18 Alarcón J, Ortuño M, Nicolás E, et al. Compensation heat-pulse measurements of sap flow for estimating transpiration in young lemon trees[J]. *Biologia Plantarum*, 2005, 49(4): 527 – 532.
- 19 Zhao X, Nishimura Y, Fukumoto Y, et al. Effect of high temperature on active oxygen species, senescence and photosynthetic properties in cucumber leaves[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2011, 70(2): 212 – 216.
- 20 Hogg E H, Hurdle P. Sap flow in trembling aspen: implications for stomatal responses to vapor pressure deficit [J]. *Tree Physiology*, 1997, 17(8): 501 – 509.
- 21 Hernandez-Santana V, Asbjornsen H, Sauer T, et al. Enhanced transpiration by riparian buffer trees in response to advection in a humid temperate agricultural landscape[J]. *Forest Ecology & Management*, 2011, 261(8): 1415 – 1427.
- 22 Braun S, Schindler C, Leuzinger S. Use of sap flow measurements to validate stomatal functions for mature beech (*Fagussylvatica*) in view of ozone uptake calculations[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(9): 2954 – 2963.
- 23 Jung E, Otiño D, Lee B, et al. Up-scaling to stand transpiration of an Asian temperate mixed-deciduous forest from single tree sapflow measurements[J]. *Plant Ecology*, 2011, 212(3): 383 – 395.
- 24 Hall R L, Allen S J, Rosier P T, et al. Transpiration from coppiced poplar and willow measured using sap-flow methods[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90(4): 275 – 290.
- 25 Meiresonne L, Nadezhdin N, Cermak J, et al. Measured sap flow and simulated transpiration from a poplar stand in Flanders (*Belgium*) [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 96(4): 165 – 179.
- 26 de Swaef T, Steppe K. Linking stem diameter variations to sap flow, turgor and water potential in tomato[J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(5): 429 – 438.
- 27 Steppe K, Cochard H, Lacoite A, et al. Could rapid diameter changes be facilitated by a variable hydraulic conductance[J]. *Plant & Cell Environment*, 2012, 35(1): 150 – 157.
- 28 Steppe K, De Pauw D J, Lemeur R, et al. A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem diameter fluctuations and radial stem growth. [J]. *Tree Physiology*, 2006, 26(3): 257 – 273.
- 29 Intrigliolo D, Castel J. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations[J]. *Irrigation Science*, 2007, 26(1): 49 – 59.
- 30 Baert A, Villez K, Steppe K. Automatic drought stress detection in grapevines without using conventional threshold values[J]. *Plant & Soil*, 2013, 369(1): 1 – 14.
- 31 Pataki D, Oren R. Species differences in stomatal control of water loss at the canopy scale in a mature bottomland deciduous forest [J]. *Advances in Water Resources*, 2003, 26(12): 1267 – 1278.
- 32 Phillips N G, Scholz F G, Bucci S J, et al. Using branch and basal trunk sap flow measurements to estimate whole-plant water capacitance: comment on Burgess and Dawson [J]. *Plant & Soil*, 2009, 315(1): 315 – 324.
- 33 Wang Y L, Liu G B, Kume T, et al. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China[J]. *Journal of Forest Research*, 2010, 15(4): 241 – 251.
- 34 卫新东,刘守阳,陈滇豫,等. Shuttleworth – Wallace 模型模拟陕北枣林蒸散适用性分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 142 – 151.
Wei Xindong, Liu Shouyang, Chen Dianyu, et al. Applicability of Shuttleworth – Wallace model for evapotranspiration estimation of jujube forests in loess hilly-gully region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 142 – 151. (in Chinese)