

DOI: 10.5846/stxb201302280324

桑玉强, 张劲松. 华北山区核桃液流变化特征及对不同时间尺度参考作物蒸散量的响应. 生态学报, 2014, 34(23): 6828-6836.

Sang Y Q, Zhang J S. Characteristics of *Juglans regia* L. sap flow and its response to reference evapotranspiration on different time scales in the rocky mountain of North China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 6828-6836.

华北山区核桃液流变化特征及对不同时间尺度 参考作物蒸散量的响应

桑玉强¹, 张劲松^{2,*}

(1. 河南农业大学林学院, 郑州 450002; 2. 中国林业科学研究院林业研究所/国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要:核桃是华北山区重要的经济树种,但该地区水资源紧缺,因此研究核桃液流耗水变化及其对气象因子的响应对于加强核桃水分管理、确定水分承载力具有指导意义。2008—2010 年连续 3 个生长季节观测分析了华北山区核桃单株液流变化特征,研究了不同时间尺度(日尺度、月尺度)核桃液流与气象因子、参考作物蒸散量(ET_0)的关系,并利用 2009—2010 年数据建立了拟合方程,在此基础上用拟合方程的估算值与 2008 年液流实测值进行了对比验证。结果表明:核桃液流具有明显的时间变化特征,最大液流量出现在 5、6 月份,2008—2010 年生长季节(4—9 月份)核桃液流量分别为 893.23 L、854.88 L 和 841.77 L,日平均液流量分别为 4.96 L、4.75 L 和 4.68 L。液流年际差异主要是由年降雨量引起。核桃液流与不同时间尺度下气象因子、 ET_0 均有较好的相关性,且随着时间尺度的增加,二者间的相关性变大。利用 2009—2010 年液流实测值与气象因子、 ET_0 建立的拟合方程,对 2008 年液流值进行了拟合,并与实测值进行了对比验证,发现不同时间尺度下液流拟合值与实测值均具有较好的一致性。在不能实现对液流进行连续观测的情况下,可以结合当地的气象资料、 ET_0 等因子,利用建立的拟合方程对树木液流进行估算,弥补缺失的数据,具有较高的精确性,可用于指导当地核桃水分管理。

关键词:核桃;液流;时间尺度;参考作物蒸散量 ET_0

Characteristics of *Juglans regia* L. sap flow and its response to reference evapotranspiration on different time scales in the rocky mountain of North China

SANG Yuqiang¹, ZHANG Jinsong^{2,*}

1 College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry/ Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Abstract: Walnut (*Juglans regia* L.) is an important economic tree species in rocky mountain of North China, which plays a key role in adjusting agricultural structure and promoting farmers' economic income. As a kind of hygrophilous tree species, irrigation is the main measure for the walnut water management in the region located in semi-arid zone with limited water resource. So it is necessary to accurately evaluate water consumption of walnut trees during the growing seasons to enhance water use efficiency. The main purpose of this paper is to observe and analyze the individual walnut water consumption and its response to meteorological factors during the growing seasons. Sap flow of walnut trees was measured by thermal dissipation probe (TDP) method and meteorological factors, reference crop evapotranspiration were acquired by automatic weather station and local astronomy data. The study measured, analyzed diurnal and monthly sap flow characteristics of individual trees of *Juglans regia* L. and the relationship with meteorological factors, reference crop

基金项目:国家自然科学基金(40871106);国家“十二五”科技支撑课题(2011BAD38B02)

收稿日期:2013-02-28; 网络出版日期:2014-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjs@caf.ac.cn

evapotranspiration on daily and monthly time scales in 3 consecutive growing seasons from 2008 to 2010. The fitted equations between sap flow and meteorological factors, reference crop evapotranspiration were established with the observed data from the year of 2009 to 2010. Finally, the simulated values derived from the fitted equation were compared with those measured in 2008. The results followed that diurnal variation of sap flow velocity showed broad-peak curve, which was consistent with that of solar radiation on typical sunny days, and narrow-peak curve was found during rainy days, which was mainly regulated by precipitation and vapor pressure deficit. Sap flow of walnut trees showed obviously seasonal variation, the maximum value occurred in May and June. The total sap flow of walnut during the growing season (April to September) from 2008 to 2010 was 893.23 L, 854.88 L, and 841.77 L, respectively. Average daily sap flow was 4.96 L, 4.75 L, and 4.68 L, respectively. The interannual difference of sap flow was mainly caused by rainfall. Sap flow of walnut trees had good correlation with meteorological factors, reference crop evapotranspiration on daily and monthly time scales. Moreover, the correlation on monthly time scale was better than that on daily time scale. The simulated values of walnut sap flow by fitted equation were good agreement with measured values in 2008 on daily and monthly time scales. The fitted equation could be used to evaluate walnut sap flow with the data of meteorological factors and reference crop evapotranspiration in the absence of long time sap flow measurements. The fitted equation was reliable to estimate walnut water consumption, and could be applied to guide the walnut tree water management in the local area.

Key Words: *Juglans regia* L.; sap flow; time scale; reference evapotranspiration

核桃(*Juglans regia* L.)为华北山区重要的经济树种,因其坚果具有极高的营养价值和良好的医疗保健功效,深受人们喜爱^[1]。核桃喜湿润,灌溉是该地区保证核桃高产、果园栽培管理的常见措施,研究核桃蒸腾耗水变化有助于提高水分利用效率,对于水资源紧缺的华北山区具有现实指导意义。

蒸腾是植物耗水的主要方式,主要通过木质部液流来实现。在日尺度以上,可用液流表示树木蒸腾量^[2]。近30年来,树木液流一直是树木生理生态学、森林水文学、林业气象学、森林生态学等相关学科及领域共同关注的重要研究内容。由于在测定液流的过程中连续加热观测(如1年以上)对树干产生热伤效应,不仅对树木造成伤害,而且会影响观测精度,再加上受人力、物力等影响,使得长期野外连续观测树干液流具有一定难度。因此国内不少学者分析了树木液流与气象因子的关系并建立了二者的经验模型^[3-8]。但由于各气象因子不是独立作用于液流,而且气象因子与液流的关系并不是表现为简单的线性关系,存在黑箱性。此外,液流与气象因子之间存在一定的时滞性^[9-12],故模型的精度和应用受到一定限制。鉴于此,如能建立一个可表达光、温、水、热等气象因子的综合变量并找出与液流变化间的关系表达式,将有助于提高液流估算模型的广泛应用。

参考作物蒸散量(Reference Evapotranspiration ET_0)是作物需水量预测的关键参数,反映了不同地区、不同时期大气的蒸散能力,与作物种类、土壤类型等无关^[13]。 ET_0 综合考虑了太阳辐射、水汽压亏缺、风速及气温等气象因子,对植物液流产生直接影响^[14],因此,比较研究不同时间尺度下液流对 ET_0 的响应机制,建立基于 ET_0 的液流预测模型对于精确估测植物耗水、确定土地水分承载力等具有重要科学意义。马长明等^[15-17]虽然研究了核桃液流变化及其与气象因子的关系,但仅基于单气象因子角度分析,并没有建立液流与 ET_0 二者的模型。胡琼娟^[18]虽然建立了液流与 ET_0 的关系模型,但仅观测了1个生长季节数据,并没有对模型进行验证。基于此,本文研究了华北低丘山地核桃3个主要生长季节的液流变化特征,试图建立不同时间尺度核桃液流与气象因子、 ET_0 的拟合模型,并对拟合模型进行验证,以期为当地核桃的长期水分管理提供理论依据。

1 试验地概况

试验地位于黄河小浪底森林生态系统定位研究站(35°01'N, 112°28'E)站区内。该定位研究站隶属于中国森林生态系统定位研究网络(China Forest Ecology Research Network CFERN),地处河南省济源市境内的太行山南段与黄河流域的交接处,属暖温

带大陆性季风气候,定位站中心地区海拔 410 m,以人工林为主。试验地全年日照时数为 2367.7 h,年日照率为 54%, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的年平均积温为 5282 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年平均积温达 4847 $^{\circ}\text{C}$ 。历年平均年降水量 641.7 mm,年蒸发量 1611.2 mm。由于受季风气候的影响,年内季节性分布不均匀。6—9 月多年平均降水量为 438.0 mm,占全年的 68.3%^[6]。

2 材料与方法

本研究选取的核桃人工林样地位于济源市克井镇半阳坡中部的退耕还林地,土壤类型为褐土,核桃人工林林龄为 5a,株行距为 3 m \times 4 m,平均株高 3.5 m,平均胸径 11 cm。核桃品种为中林 3 号。

在核桃林带中间选取长势较好、树干通直的 4 棵作为被测样株(表 1),在其基径部位南北两个方向分别安装 TDP 探针,具体安装方法见文献^[6]。为避免木质部栓塞化对液流速率的影响,来年开始测定前,将 TDP 探针适当移动位置。测定时间为 2008—2010 年的 4—9 月份。在被测木周围选择 6 棵与被测木胸径接近的树木,用生长锥测定其边材、心材大小,平均后确定边材面积。将每棵树南北两个方向平均作为该树液流值,用 4 棵样株的液流平均值作为最终值分析单株液流变化。

在样地附近 50 m 处采用小气候自动监测系统连续观测空气温度(T_a)、相对湿度(RH)、风速(V)、太阳总辐射(R_a)、降雨量(P)等气象要素。 R_a 、 V 、 T_a 、 RH 及 P 所采用的传感器(探头)分别为 LI200X、05103、HMP45C、TE525M。数据采集器为 CR10X,每 2 min 采集 1 次,每 10 min 输出 1 组平均值。观测时间与树干液流同步。

表 1 被测样株基本特征

Table 1 Main characteristics of sample trees

树木编号 Tree number	树高/m Height	基径/cm Basal diameter
1	5.2	12.4
2	4.4	11.7
3	4.1	11.0
4	4.8	12.2

参考作物蒸散量(ET_0)计算公式为^[13]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量(mm/d), Rn 为净辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), r 为干湿计常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), T 为日平均气温($^{\circ}\text{C}$), u_2 为 2 m 高度处风速(m/s), e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压(kPa), Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)。

3 结果与分析

3.1 核桃液流变化特征

3.1.1 核桃液流日变化特征

首先选取典型晴天(2010-05-10)和阴雨天气(2010-07-23),分析核桃液流速率与气象因子的变化关系(图 1)。其中 5 月 10 日太阳辐射为 23.8 MJ/m^2 ,7 月 23 日降雨量为 54.6 mm。

从图 1 可以发现,典型晴天核桃液流速率峰值较宽(8:00—16:00),液流速率日变化曲线与太阳辐射基本一致,但波峰宽于太阳辐射(图 1)。气温与饱和水汽压亏缺变化趋势相似,液流速率达到峰值后,二者呈继续上升趋势,峰值出现在 16:30(图 1)。说明液流速率受到多个气象因子的相互影响,与单个气象因子并不存在完全的同步性。7 月 23 日为典型降雨天气,降雨从 14:20 开始,一直持续到第 2 天。当日气温、饱和水汽压亏缺及太阳辐射较 5 月 10 日均有不同程度下降(图 1),液流速率也随之发生变化。当日核桃液流速率峰值出现在 12:30,最大液流速率为 0.478 L/h,低于晴天日最大液流速率(0.629 L/h),而且波峰很窄,达到峰值后迅速下降。

3.1.2 核桃液流月变化特征

对于核桃田间水分管理而言,开展日尺度以上水分变化研究更具有实践意义,能为核桃节水灌溉提供指导和参考。为此,本文着重分析月尺度水平核桃液流变化,以期与当地核桃水分管理提供理论参考。图 2 显示了连续 3 个观测季节核桃液流(SF)月变化特征及其与气温(T_a)、饱和水汽压亏缺(VPD)、太阳辐射(R_a)及风速(V)的关系。

从图 2 可以看出,随着气温的升高,核桃叶片逐渐展开,核桃液流量逐渐增大,进入 5 月份后,液流急剧增加,6 月份达到峰值,随着雨季的到来,降雨量和降雨日增加,7、8 月份核桃液流量逐步下降,至 9 月份基本降至最低值。月尺度上 SF 与 T_a 、 R_a 、 VPD 变化趋势具有很好的一致性。以 2010 年为例,4—

9 月份单株核桃液流量为 841.77 L,6 月份液流量最大,为 217.95 L,9 月份液流最小,为 86.08 L,液流最

大月与最小月相差 131.88 L,4—9 月份平均日液流量和月液流量分别为 4.68 L 和 140.29 L。

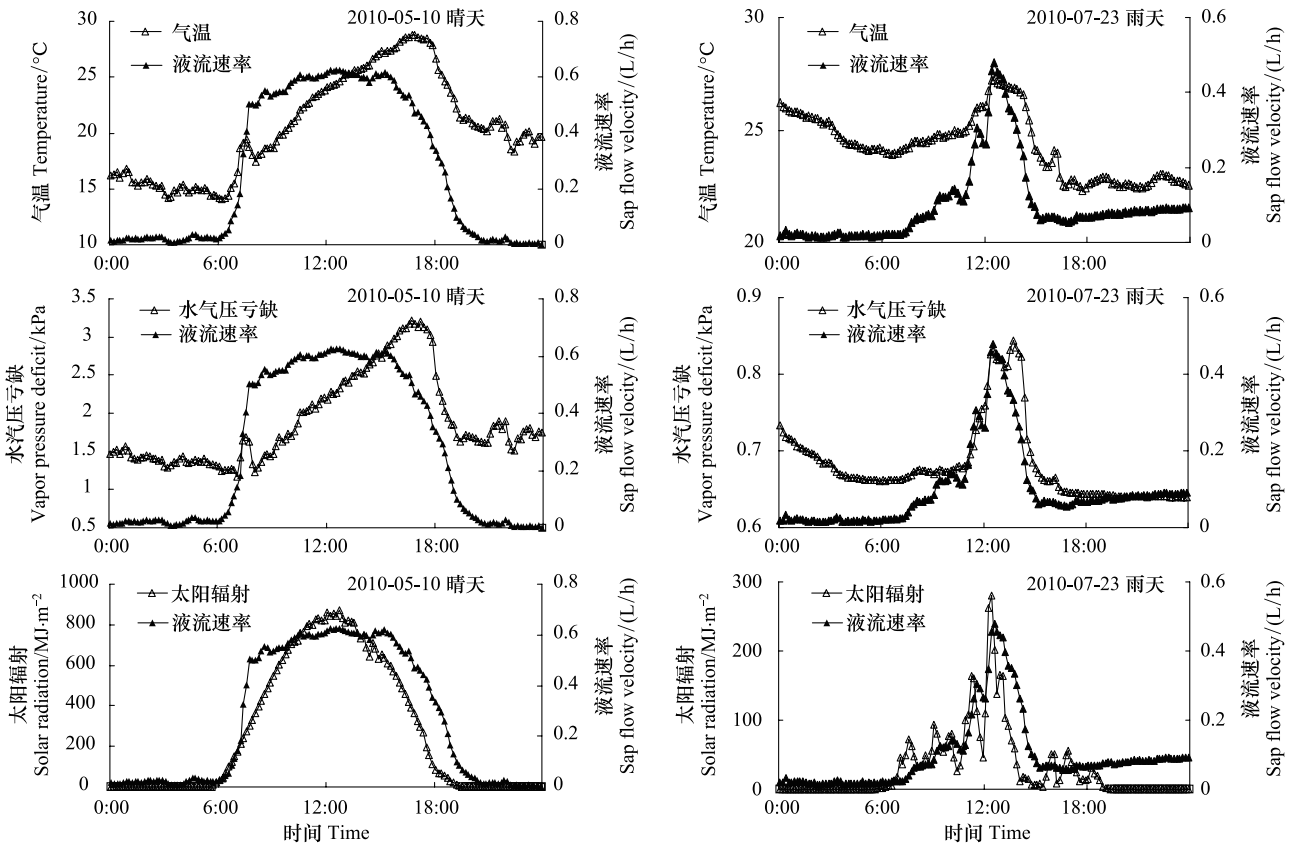


图 1 典型天气日核桃液流速率与气象因子变化

Fig.1 Diurnal variations of sap flow velocity and meteorological factors on typical days in 2010

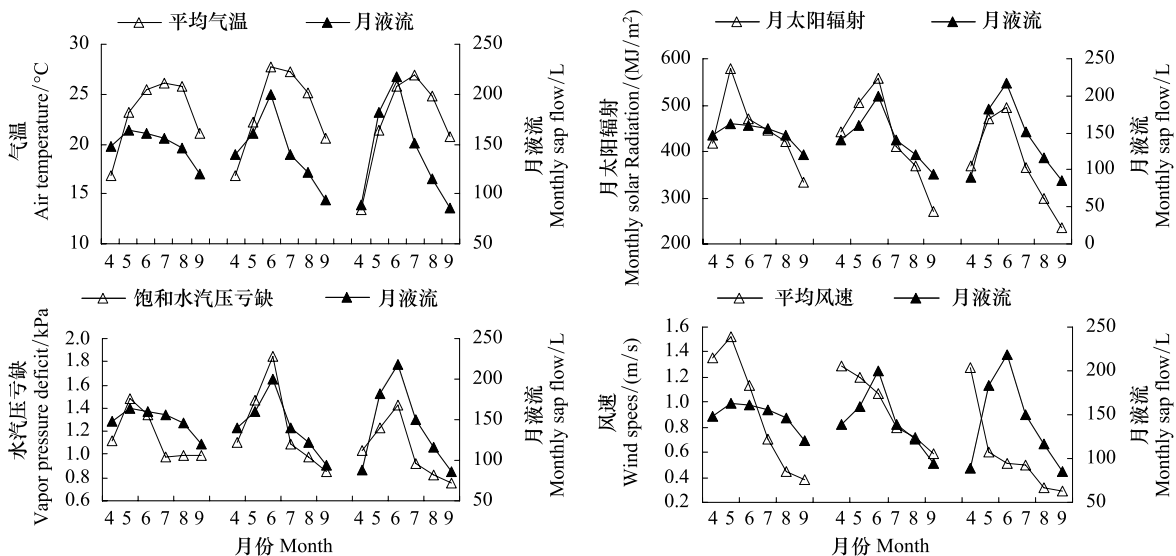


图 2 核桃月液流量与气象因子变化曲线(2008—2010 年)

Fig.2 Monthly variation of walnut sap flow and meteorological factors from 2008 to 2010

由于核桃液流与太阳辐射、饱和水汽压亏缺等气象因子密切相关,饱和水汽压亏缺又与气温、空气相对湿度有关。为此,本文进一步分析了月尺度水平核桃液流量与降雨量的关系(图3),以进一步明确降雨量等气象因子对核桃液流的影响。

从图3中可以发现:试验期间4—6月份降雨量相对较少,一直维持在较低水平,这个阶段核桃主要消耗土壤水分以满足其蒸腾需求。进入7月份以后,降雨量急剧增加,降雨天气和降雨强度均有所增加,土壤水分得到有效补充。以2010年为例,7月份降雨量为205.4 mm,远超过4—6月份降雨总和(104.0 mm),其中7月24日当日降雨量为61.9 mm。与7月份相比,8、9月份降雨有所减少,分别为132.5 mm和75.5 mm。比较核桃月液流量与月降雨量发现,核桃最大液流量出现在6月,最大降雨量则出现

在7月,并不完全一致,其主要原因在于6月份虽然降雨少,但树木生长旺盛,气温高,空气相对湿度小,强大的蒸腾拉力使核桃从土壤中吸收大量的水分(月平均土壤含水量为20.29%),满足其蒸腾需求。虽然7月份降雨量最多,土壤水分相对充足(月平均土壤含水量为23.24%),但7月份降雨日为14d,较6月份(降雨日9d)增加了5d,且日降雨强度大。阴雨天气条件下,空气相对湿度几乎达到饱和,液流较小,使得7月份的核桃液流量少于6月份。说明月尺度水平液流除了受降雨影响外,还与气象因子如太阳辐射等因素有关。同时说明在核桃耗水较多的5、6月份,核桃地土壤水分很有可能出现水分亏缺,需加强田间水分管理工作,以免对核桃挂果量和品质造成影响。

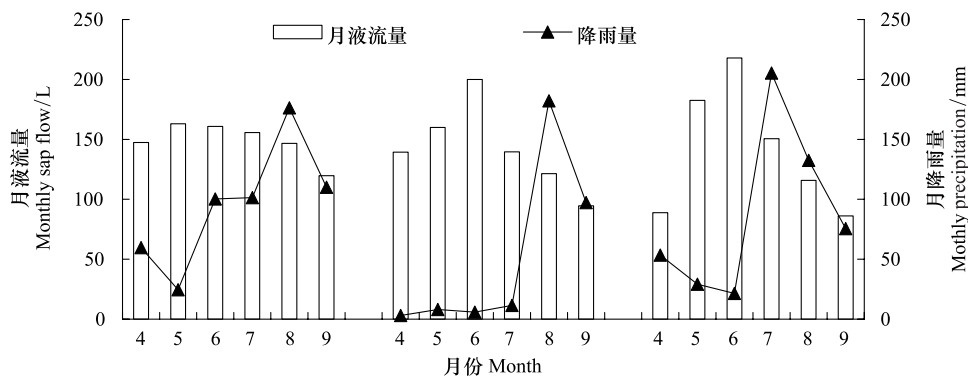


图3 核桃月液流与降雨量的关系(2008—2010年)

Fig.3 Relationship between monthly variation of walnut sap flow and rainfall from 2008 to 2010

3.2 核桃液流对不同时间尺度气象因子及 ET_0 的响应

影响植被液流变化的因素有很多,如植被自身生长状况、土壤水分、气象因子等。其中 ET_0 是表征大气蒸散发能力,评价气候干旱程度、植被需水量、农作物生产潜力以及水资源供需平衡最重要的指标

之一。本文主要选取气象因子和 ET_0 ,分析不同时间尺度下上述因素对核桃液流量的影响。

3.2.1 核桃液流与气象因子的关系

表2列出了不同时间尺度下(日尺度、月尺度水平)核桃液流量与气象因子的拟合方程。从表中可以看出,2种时间尺度下,核桃液流与各气象因子存

表2 核桃液流与不同时间尺度气象因子的拟合方程(2009—2010年)

Table 2 Fitted equation of walnut sap flow to meteorological factors on different time scales (2009—2010)

尺度 Scale	拟合方程 Fitted equation	R^2	F	N	偏相关系数			
					气温 Temperature	水汽压亏缺 Vapor pressure deficit	太阳辐射 Solar radiation	风速 Wind speed
日 Day	$SF = -0.049 + 0.067Ta + 0.353VPD + 0.233Ra - 0.332V$	0.682	183.53	344	0.225	0.091	0.654	-0.108
月 Month	$SF = -6.287 - 0.420Ta - 8.900VPD + 0.559Ra - 73.641V$	0.975	67.71	8	-0.173	-0.141	0.935	-0.908

SF 、 Ta 、 VPD 、 Ra 、 V 单位分别为 L、 $^{\circ}C$ 、Kpa、 MJ/m^2 、 m/s

在较好的相关性,其中太阳辐射是影响液流的主要气象因素。日尺度、月尺度下相关系数分别为 0.682 和 0.975,月尺度的相关性要高于日尺度。表明时间尺度越大,拟合方程精度越高,在较大尺度水平下利用气象因子拟合求算液流具有更大的精度。这与王文杰等^[8]研究结果相一致。

3.2.2 核桃液流与 ET_0 的关系

图 4 分析了日尺度及月尺度下核桃液流量与 ET_0 的关系。从图 4 中可以发现,在不同时间尺度

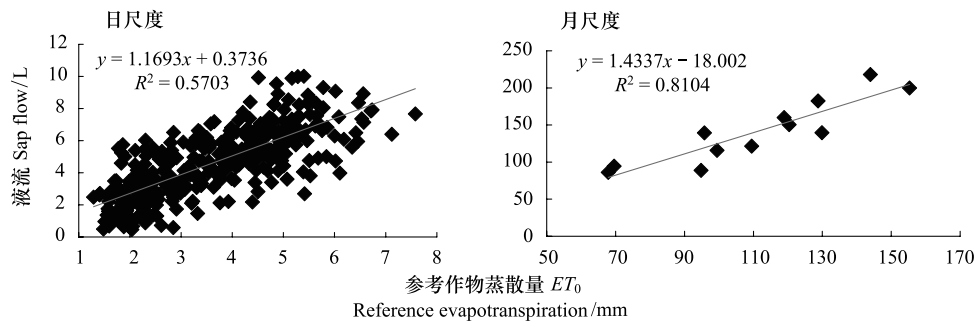


图 4 不同时间尺度下核桃液流量与参考作物蒸散量(ET_0)的关系(2009—2010 年)

Fig.4 Relationship between sap flow of walnut and ET_0 on different time scales from 2009 to 2010

3.3 核桃液流拟合值与实测值对比验证

为了验证不同时间尺度、不同因素建立的液流拟合方程的精确性,结合 2008 年气象数据和 ET_0 ,采用上述 2 种拟合方程估算 2008 年数据,并用 2008 年实测数据进行比对,以验证拟合方程的精确性。

表 3 列出了利用不同时间尺度气象因子与核桃液流的拟合方程估算出液流模拟值与实测值的对

下,核桃液流量与 ET_0 均有较好的相关性,日和月尺度下的相关系数分别为 0.5703 和 0.8104,后者的相关性大于前者,表明随着时间尺度的增加,二者的相关性越高,核桃液流与 ET_0 一致性较好。鉴于 ET_0 是某一地区气象因素的综合反映,且数据相对容易获取。因此利用建立的树木液流与气象因子的关系,结合相对容易获取的 ET_0 等数据,可用于估算大尺度下树木液流量。

比。从表中可以发现,不同时间尺度下核桃液流拟合值与实测值之间吻合性较好。其中日尺度下液流拟合值为 995.37 L,与实测值相差 102.14 L,误差为 11.4%;月尺度下液流拟合值为 972.56 L,与实测值相差 79.33 L,误差为 8.9%,说明在一定范围内,尺度越大,拟合误差越小,其主要原因在于大尺度水平下各个气象因子的波动性降低,变化趋势更趋于稳定。

表 3 不同时间尺度核桃液流拟合值与实测值的比较(2008 年)

Table 3 Comparison of fitted and measured value of walnut sap flow on the different time scales in 2008

时间尺度 Time scale	拟合值 Fitted value/L	实测值 Measured value/L	误差 Error/%
日 Day	995.37	893.23	11.4
月 Month	972.56	893.23	8.9

图 5 列出了日尺度水平下利用 ET_0 为变量对核桃液流的拟合值及与实测值的比较。从图中发现,利用 ET_0 估算出的拟合值与实测值具有较好的一致性。其中,4—9 月份液流实测值为 893.23 L, ET_0 拟合值为 992.98 L,二者误差为 10.4%。

图 6 列出了月尺度水平下利用 ET_0 为变量对核桃液流的拟合值及与实测值的比较。从图中可以看出,月尺度下利用 ET_0 估算出的拟合值与实测值具有

较好的一致性。其中,4—9 月份液流实测值为 893.23 L, ET_0 拟合值为 974.17 L,二者误差为 9.0%。月尺度下利用 ET_0 拟合液流误差小于日尺度,与不同尺度气象因子拟合结果吻合。利用气象因子和 ET_0 拟合液流二者差别不大,总体上 ET_0 拟合效果略高于气象因子。因此在缺乏对树木液流进行连续观测的情况,利用相对容易获得的 ET_0 对液流进行拟合不失为较好的办法。

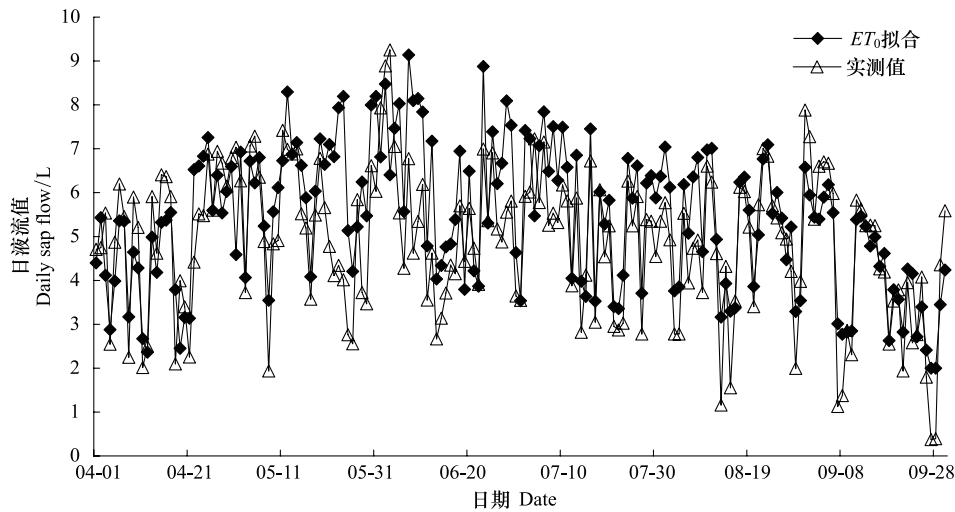


图5 日尺度水平核桃液流值与实测值的比较(2008年)

Fig.5 Comparison of fitted and measured value of walnut sap flow on daily time scale in 2008

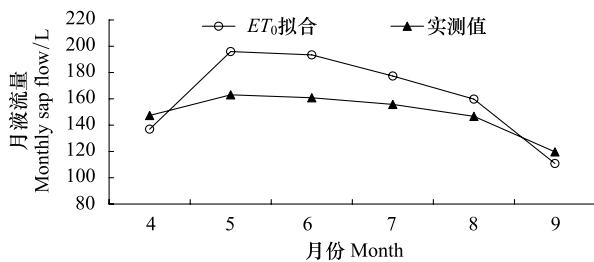


图6 月尺度水平核桃液流值与实测值的比较(2008年)

Fig.6 Comparison of fitted and measured values of walnut sap flow on monthly time scale in 2008

4 结论与讨论

4.1 结论

在主要生长季节,核桃液流具有明显的时间变化特征,月液流最大出现在5、6月份,随着雨季的到来,7、8月份液流有所下降。核桃液流年际变化主要由于年际降水差异引起。核桃液流与不同时间尺度下气象因子、 ET_0 均有较好的相关性,且随着时间尺度的增加,二者间的相关性变大。其中,影响核桃液流的主要气象因子为太阳辐射。不同时间尺度下液流拟合值与实测值均具有较好的相关性。在缺乏对液流进行连续测定的情况下,可以结合当地的气象资料及 ET_0 等因子,利用建立的拟合方程对树木液流进行估算,具有较高的精确性。

4.2 讨论

深入研究核桃液流动态变化及其影响机制对于加强核桃田间水分管理、提高水资源利用率具有重

要意义。马长明等^[15-17]研究了河北省平山县核桃不同物候期液流变化特征,对不同物候期核桃水分消耗具有指导作用,并就核桃液流与气象因子的关系进行了分析,但没有涉及到参考作物蒸散量。陈杰等^[19]分析了新疆阿克苏地区核桃液流变化,分析了液流与气象因子的关系,并将液流量与基于Penman-Monteith的参考作物蒸散量进行了比较,但并没有利用拟合方程对估算值与实测值进行验证。本文连续3个生长季节测算分析了不同时间尺度下核桃液流与气象因子及 ET_0 的关系,并利用建立的拟合方程对树木液流进行估算,具有一定的科学性和操作性。

鉴于 ET_0 是多个气象因子的综合反映,研究液流与 ET_0 的关系有助于揭示液流对气象因子的响应机制。Er-Raki^[14]分析了地中海地区摩洛哥果园橄榄(*Olea europaea* L.)蒸腾与 ET_0 的关系,发现基于液流测定值获得的蒸腾受 ET_0 影响较大,蒸腾与 ET_0 变化趋势相似,尤其在水分不受限制条件下一致性更好,并建立了日尺度下二者的线性拟合方程(决定系数 $R^2=0.84$)。胡琼娟^[18]分别建立了核桃生育期内液流与气象因子、 ET_0 的关系模型,发现液流与 ET_0 具有很好的线性相关性,但仅观测了一个生长季节数据,并没有对模型进行验证。Pereira等^[20]利用Penman-Monteith公式计算了核桃的耗水量,并与热技术法进行了比较,发现在日尺度和充分灌溉条件下,可用Penman-Monteith公式估算耗水量,并建立了液流、 ET_0 及叶面积之间的关系模型。Cammalleri等^[21]比较分析了橄榄树(*cv. Nocellara del Belice*)蒸

腾与 ET_0 的相似性,并计算了蒸腾在 ET_0 总量中所占的比例。以上研究均表明 ET_0 与树木液流密切相关。本文分别利用日尺度、月尺度下气象因子和 ET_0 对核桃液流进行了拟合,发现月尺度水平拟合性好于日尺度,相对而言, ET_0 的拟合效果略高于气象因子,再次证实了将 ET_0 用于分析气象因子对液流影响的科学性和可行性。

研究不同时间尺度下液流与气象因子的关系主要目的有:一是分析不同时间尺度下环境因子对树干液流影响的精度,二是确定不同时间尺度下影响树干液流的主要影响因子。有研究栓皮栎人工林树干液流对不同时间尺度气象因子及水面蒸发的响应^[6],发现随着时间尺度的增加,液流与上述因子相关性越强;在不同时间尺度下,影响树干液流的最主要气象因子均为太阳辐射。同一时期,液流与水面蒸发的相关性大于气象因子。王文杰等^[8]研究了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,发现时间尺度不同,对树干液流影响最大的因子有从地下土壤环境因子向地上直接影响叶片蒸腾的环境因子转换的趋势。本文通过分析日尺度、月尺度下核桃液流与气象因子及 ET_0 的关系,证实随着时间尺度的增加,液流与上述因子相关性越强。这与之前对栓皮栎的研究结果一致^[6]。同时证明, ET_0 与水面蒸发一样,二者均作为气象条件的综合反映,与树干液流量具有较好的相关性,在树木液流不能实现连续观测的地区,可利用能综合反映气象因子的 ET_0 、水面蒸发等指标估算液流,不但精度高,而且容易实现,具有一定的科学性和可行性。

本文主要分析了单株核桃液流变化特征及其影响机制,在今后的研究中应侧重单株到果园进行耗水尺度扩展,结合土壤水分变化从水分供求关系分析核桃耗水变化,更有利于指导当地的核桃水分管理。

References:

- [1] Wu G L, Zhang Z H, Hou L Q. Cultivar resources of Chinese Juglans with special characteristics. *Economic Forest Research*, 2009, 27(1): 61-64.
- [2] Lagergren F, Lindroth A. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112: 67-85.
- [3] Xiong W, Wang Y H, Xu D Y. Regulations of water use for transpiration of *Larix Principi-Rupprechtii* plantation and its response on environmental factors in southern Ningxia hilly area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(2): 1-7.
- [4] Wang H S, Meng P, Zhang J S, Gao J, Jia C R. Transpiration variation and relationship between supply and demand of water for *Eucommia ulmoides* plantations in the rocky mountainous area of North China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(10): 14-18.
- [5] Ma J X, Chen Y N, Li W H, Huang X. Characteristics of sap flow of 4 typical shelter-belt tree species and it's relationships with environmental factors in the desert region of Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 579-586.
- [6] Sang Y Q, Zhang J S, Meng P, Dang H Z, Gao J, Jia C R, Ren Y F. Responses of stem sap flow to meteorological factors and water evaporation at different time scales over *Quercus variabilis* plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6661-6668.
- [7] Ding F J, Wang B, Zhao G D. Sap flow changes of *Phyllostachys edulis* and their relationships with meteorological factors. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(7): 73-81.
- [8] Wang W J, Sun W, Qiu L, Zu Y G, Liu W. Relations between stem sap flow density of *Larix gmelinii* and environmental factors under different temporal scale. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(1): 77-85.
- [9] Ma L, Zhao P, Rao X Q, Cai X A, Zeng X P, Lu P. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium*. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2145-2151.
- [10] Xie H X, Zhang Z H, Yang R Y, Liu J L, Cai H J. Analysis on trunk sap flow time lag effect of *Sophora japonica f. pendula* compared to meteorological factors. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(5): 106-110.
- [11] Wang H, Zhao P, Cai X A, Ma L, Rao X Q, Zeng X P. Time lag effect between stem sap flow and photosynthetically active radiation, vapor pressure deficit of *Acacia mangium*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 225-230.
- [12] Xu J L, Zhang Y P, Ma L Y. Time lag effect of *pinus tabulaeformis* and *platycladus orientalis* sap flow compared to air temperature. *Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science*, 2012, 33(4): 61-64.
- [13] Allen R G, Perreira L S, Raes D. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements // FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 1998.
- [14] Er-Raki S, Chehbouni A, Ezzahar J, Khabba S, Boulet G, Hanich L. Evapotranspiration partitioning from sap flow and eddy covariance techniques for Olive orchards in semi-arid region. *Acta Horticulturae*, 2009, 846: 201-208.
- [15] Ma C M, Yuan Y X, Zhai M P. Sap flow in *Juglans regia* during different phenophases. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36(1): 4-9.
- [16] Ma C M, Zhai M P. Stock sap flow characters of *Juglans regia*

- and relationship with meteorological factors in dry season. *Forestry Research*, 2007, 20(6): 883-886.
- [17] Ma C M, Liu G Y, Zhang Y H, Liu C P. Stock sap flow characters of *Juglans regia*. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 25(2): 25-29.
- [18] Hu Q J. Study on Transpiration of Walnut Tree and Irrigation Schedule Under Drip Irrigation [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2010.
- [19] Chen J, He J W, Ma Y J, Hu Q J. Study on rule of walnut trees sap flow under the conditions of drip irrigation. *Yellow River*, 2011, 33(11): 114-116.
- [20] Pereira A R, Green S, Nova N A V. Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. *Agricultural Water Management*, 2006, 83: 153-161.
- [21] Cammalleri C, Rallo G, Agnese C, Ciralo G, Minacapilli M, provenzano G. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 89-97.
- [6] 桑玉强, 张劲松, 孟平, 党宏忠, 高峻, 贾长荣, 任迎丰. 栓皮栎人工林树干液流对不同时间尺度气象因子及水面蒸发的响应. *生态学报*, 2010, 30(23): 6661-6668.
- [7] 丁访军, 王兵, 赵广东. 毛竹树干液流变化及其与气象因子的关系. *林业科学*, 2011, 47(7): 73-81.
- [8] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 祖元刚, 刘伟. 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. *林业科学*, 2012, 48(1): 77-85.
- [9] 马玲, 赵平, 饶兴权, 蔡锡安, 曾小平, 陆平. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2005, 25(9): 2145-2151.
- [10] 谢恒星, 张振华, 杨润亚, 刘继龙, 蔡焕杰. 龙爪槐树干液流相对于气象因子的滞后效应分析. *林业科学*, 2007, 43(5): 106-110.
- [11] 王华, 赵平, 蔡锡安, 马玲, 饶兴权, 曾小平. 马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺间的时滞效应. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 225-230.
- [12] 徐军亮, 章异平, 马履一. 油松和侧柏边材液流相对于空气温度的滞后效应. *河南科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(4): 61-64.
- [15] 马长明, 袁玉欣, 翟明普. 基于物候期的核桃树干液流特征. *东北林业大学学报*, 2008, 36(1): 4-9.
- [16] 马长明, 翟明普. 干季核桃树干液流特征及其与气象因子的关系. *林业科学研究*, 2007, 20(6): 883-886.
- [17] 马长明, 刘广营, 张艳华, 刘春鹏. 核桃树干液流特征研究. *西北林学院学报*, 2010, 25(2): 25-29.
- [18] 胡琼娟. 滴灌条件下核桃灌溉制度和蒸腾规律的研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010.
- [19] 陈杰, 何纪武, 马英杰, 胡琼娟. 滴灌条件下核桃树液流规律研究. *人民黄河*, 2011, 33(11): 114-116.

参考文献:

- [1] 吴国良, 张志华, 侯立群. 中国核桃属具特异性状的品种资源. *经济林研究*, 2009, 27(1): 61-64.
- [3] 熊伟, 王彦辉, 徐德应. 宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应. *林业科学*, 2003, 39(2): 1-7.
- [4] 王鹤松, 孟平, 张劲松, 高峻, 贾长荣. 华北石质山区山茱萸人工林蒸腾特征及水分供求关系. *林业科学*, 2007, 43(10): 14-18.
- [5] 马建新, 陈亚宁, 李卫红, 黄湘. 荒漠防护林典型树种液流特征及其对环境因子的响应. *生态学报*, 2010, 30(3): 579-586.