

文章编号: 1672-3317(2023)11-0011-08

猕猴桃树液流变化特征及对环境因子的响应

李宗阳^{1,2}, 赵璐³, 邢立文³, 崔宁博³, 蔡焕杰^{1,2*}

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 中国旱区农业节水研究院, 陕西 杨凌 712100; 3.四川大学 水利水电学院, 成都 610000)

摘要: 【目的】探究猕猴桃树液流变化特征及对环境因子的响应。【方法】利用热扩散插针式液流计监测关中平原地区猕猴桃树液流规律, 分析猕猴桃树液流与环境因子间的关系。【结果】猕猴桃树日均液流速率在全生育期呈明显单峰型变化, 最大值出现在果实膨大期为 11.00 cm/h; 最小值出现在抽梢展叶期为 0.18 cm/h; 各生育期小时尺度液流速率峰值表现为: 果实膨大期>果实成熟期>开花坐果期>抽梢展叶期; 不同天气条件下液流速率峰值表现为: 晴天>阴天>雨天; 果树日均液流速率与空气温度、水汽压差亏缺和太阳净辐射极显著正相关; 太阳净辐射对猕猴桃树液流的直接作用最大, 土壤体积含水率主要是通过太阳净辐射、空气温度和土壤温度的共同作用影响植物液流; 气象因子与液流速率间存在明显的时滞效应, 液流速率与太阳净辐射的时滞为 -30 min, 与湿度的时滞为 60 min, 与空气温度和水汽压差亏缺的时滞均为 90 min。【结论】猕猴桃树在果实膨大期蒸腾最大, 消耗水分最多, 应注意在果实膨大期猕猴桃的土壤状况, 及时补水。晴朗天气下猕猴桃树在 12:00—16:00 液流最大, 此时果树蒸发较大, 应避免这个时间段进行灌水, 减少蒸腾造成的灌水损失。

关键词: 猕猴桃树; 液流; 环境因子; 通径分析; 时滞

中图分类号: S271

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023264

OSID:



李宗阳, 赵璐, 邢立文, 等. 猕猴桃树液流变化特征及对环境因子的响应[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 11-18.

LI Zongyang, ZHAO Lu, XING Liwen, et al. Sap Flow Characteristics of Kiwifruit Tree and Its Response to Environmental Factors[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 11-18.

0 引言

【研究意义】猕猴桃因富含多种营养元素和具有独特的风味逐渐成为大众喜爱的水果, 猕猴桃产业已发展为陕西省的主要农业产业^[1]。关中地区作为猕猴桃主要栽培区, 降水量不能满足猕猴桃树生长需求, 需要通过灌溉来满足果树耗水。树体蒸腾是果树耗水的主要方式, 因此, 研究猕猴桃树的蒸腾规律对指导其科学灌溉具有重要作用。

【研究进展】目前, 蒸腾作用的测定方法主要有涡度相关法、遥感技术和液流法, 其中, 液流法是估算蒸腾最精确的方法, 被普遍应用于树木蒸腾耗水研究^[2]。树干液流动态变化受生理生长因子、气象因子、土壤因子影响, 生理生长因子决定蒸腾的潜在能力, 气象因子决定液流的瞬时变率, 而土壤持水能力决定液流的总体水平^[3], 本文主要研究气象因子和土壤因子对树木蒸腾作用的影响。影响果树蒸腾的气象因子主要有水汽压差亏缺 (Vapor pressure deficit, VPD)、

太阳净辐射 (Solar radiation, R_n)、空气温度 (Air temperature, T_a) 等^[4], 土壤因子主要有土壤体积含水率 (Soil water content, SWC) 和土壤温度 (Soil temperature, T_s)^[5]。Jian 等^[6]在中国西北半干旱的黄土高原地区的研究表明, 蒸腾主要受 R_n 和 VPD 影响, SWC 对蒸腾的月变化影响较大。Oogathoo 等^[7]研究表明, 在潮湿的北方森林中, 香脂冷杉和黑云杉 2 种树木的日液流与 VPD、 R_n 相关性很强, 日最高气温 (Maximum air temperature, $T_{a_{max}}$) 和降水量 (Precipitation, P) 等变量对果树液流速率 (Sap flow velocity, SF) 影响较小, SWC 和风速 (Wind speed, W_s) 对 SF 几乎没有影响。Fang 等^[2]对祁连山青海云杉进行环境因子和液流同步监测, VPD、SWC、 T_{max} 是影响树干液流密度的重要变量, 同时环境因子与植物液流间一般存在明显的时滞关系^[7-9]。

【切入点】关中地区蒸腾研究主要集中在小麦、玉米等粮食作物^[10-12], 有关树木液流与生理和环境相互作用的研究已有大量报道, 但是由于树木种类、气候条件、管理措施、生长状况和土壤特性等不同, 影响树干液流的主要因子和调控方式存在着很大差异, 且现有研究对液流的启动时间、峰值、峰值持续时长等变化规律以及液流变化与环境因子之间的关系并未深入研究。【拟解决的关键问题】为此, 本文利用

收稿日期: 2023-06-13 修回日期: 2023-09-07 网络出版日期: 2023-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52109060)

作者简介: 李宗阳 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事农业资源高效利用研究。E-mail: zyangli@163.com

通信作者: 蔡焕杰 (1962-), 男, 博士生导师, 主要从事农业资源高效利用研究。E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

热扩散探针法对关中地区“徐香”猕猴桃树干液流速率进行动态监测,探究自然条件下猕猴桃树不同时间尺度的液流变化规律及其对环境因子的响应,进而为猕猴桃科学灌溉提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022年3—9月在陕西省武功县猕猴桃园进行(108°16' E, 34°24' N, 海拔400 m),试验区属于温带半湿润季风气候,光能资源丰富,年平均日照时间2 095 h,年平均气温12.9 °C,全年无霜期221 d。武功县降水季节性强,多集中在6—9月,多年平均降水量600 mm左右。

1.2 试验材料与方法

试验地猕猴桃果树品种为“徐香”,树龄8 a。果树株行距为2 m×4 m,果树高度约为180~200 cm,树干直径8~10 cm。试验地土壤为黄壤土,pH值为8,



图1 液流检测系统及剖面土壤水分测量系统

Fig.1 Liquid flow detection system and profile soil moisture measurement system

在果树四周布设剖面土壤水分测量系统(Trime-IPH),每棵果树四周布设3个测点,3棵果树共9个测点,测量深度为0~60 cm,分6层,每层间隔10 cm,每隔1 h采集1次SWC和土壤温度(Soil temperature, T_s)数据,每隔30 d用取土烘干法对Trime-IPH所测SWC数据进行校正,每棵果树SWC和 T_s 数据为其周围3个测点的各土层SWC和 T_s 的平均值,果园SWC和 T_s 数据为3棵果树SWC和 T_s 的平均值。

气温(T_a)、相对湿度(RH)、大气压强(P_a)、日照时间、平均风速(W_s)等气象数据来自园区气象站,气象站位于观测点100 m左右空旷处。太阳净辐射(R_n)由日照时间确定,VPD由 T_a 和RH计算。

1.3 数据处理及计算

1.3.1 液流数据计算

液流速率计算式^[9, 13-14]为:

$$SF=36 \times 118.99 \times 10^{-2} [(\Delta T_{\max} - \Delta T)]^{1.231}, \quad (1)$$

式中:SF为液流速率(cm/h); ΔT_{\max} 为植株无液流

有机质质量为12.5 g/kg,土壤体积质量为1.27~1.35 g/cm³,田间体积持水率为33.70%,凋萎系数为9.00%,果园灌溉方式为滴灌,灌水均匀。

猕猴桃生育期划分为:抽梢展叶期(3月下旬—4月上旬)、开花坐果期(4月中旬—5月上旬)、果实膨大期(5月中旬—8月中旬)、果实成熟期(8月下旬—9月下旬)。

在试验地自然条件下选择3棵长势良好的猕猴桃树,在树干上安装TDP(Thermal Dissipation Probe)热扩散插针式液流计(北京雨根科技有限公司生产的RR 8210 TDP植物茎秆液流自动监测系统)。探针安装在沿树干方向上的2个钻孔中,距离地面60 cm。为减少外界环境的影响,用锡箔纸包裹探针。利用英国Grant公司生产的SQ系列数采器自动监测和记录数据,每10 min采集1次数据,连续记录2个探针间的温度差。

时2个TDP探针间的温差,即24 h内TDP探针的最大温差数据(植株无液流或液流最小时,2个TDP探针之间的温差最大); ΔT 为植株有液流时,2个TDP探针间的温差;

1.3.2 数据分析

采用Excel 2021软件对各环境因子进行预处理,采用SPSS进行逐步回归分析,初步建立猕猴桃树液流速率与主要环境因子之间的回归方程,再利用通径分析探究各环境因子的综合效应,并用Origin 2023软件作图。

2 结果与分析

2.1 猕猴桃树液流变化规律

2.1.1 猕猴桃树日均液流速率变化规律

猕猴桃树全生育期日均液流速率变化见图2。日均液流速率(SF_{mean})在生育初期较小,抽梢展叶期日均液流速率均不超过2.00 cm/h。随着时间推移,日均液流速率在果实膨大期达到最大值为11.00 cm/h,降水时果树蒸腾速率较小,降水后果树蒸腾速率恢复

至较高状态，8月中下旬进入果实成熟期后蒸腾速率开始下降。日均液流速率在抽梢展叶期至果实膨大前期都保持增长趋势，在果实膨大期中后期维持较高液流速率，果实成熟期日均液流速率开始下降。猕猴桃生育期内降水集中分布在7—9月，即果实膨大期和果实成熟期降水天气下猕猴桃树日均液流速率均

较小，降水严重影响果树蒸腾。全生育期日均液流速率小于 0.35 cm/h 的情况共 9 次，其中 8 次是受降水影响，未发生降水且日均液流速率最小发生在 4 月 14 日，日均液流速率为 0.18 cm/h，全生育期日均液流速率最小值出现在抽梢展叶期。

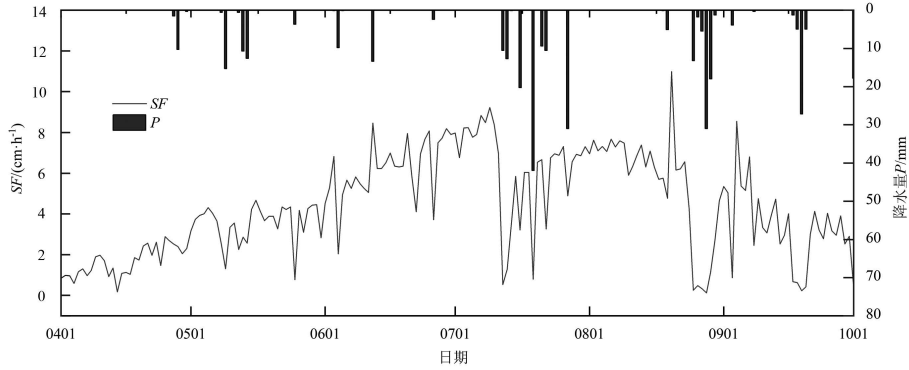


图 2 猕猴桃树全生育期日均液流速率变化规律

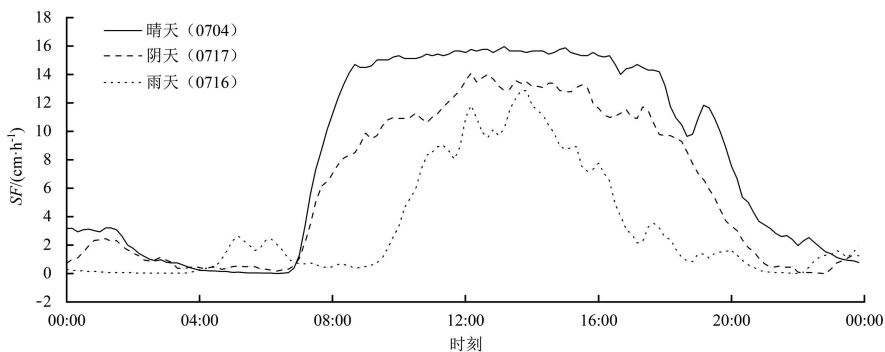
Fig.2 The variation law of daily average sap flow rate of kiwifruit tree during the whole growth period

2.1.2 猕猴桃树小时尺度液流速率变化规律

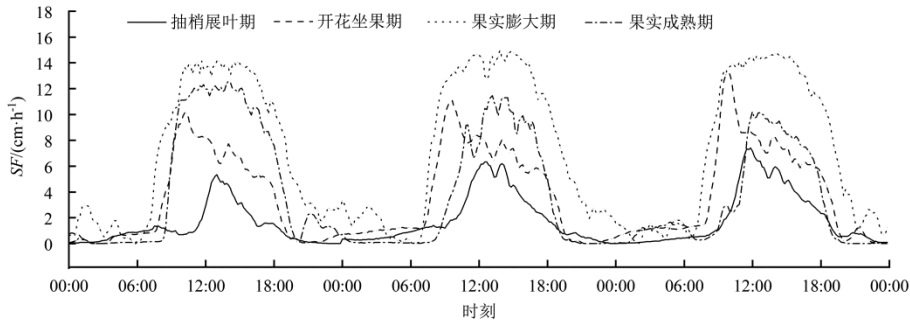
在液流较明显的（果实膨大期）7月选择3种典型天气，即晴天（7月4日）、阴天（7月17日）和雨天（7月16日）。图3（a）为3个典型日猕猴桃树液流速率的日变化。晴天液流07:00左右启动，在1 h后迅速上升至峰值且保持较长时间（约9.5 h），18:00左右开始下降，液流速率最大为15.97 cm/h，日均液流速率为8.24 cm/h；阴天液流启动时间和峰值下降时间与晴天相近，但液流速率峰值明显小于晴天且波动性大，阴天液流速率最大值为13.98 cm/h，日均液流速率为6.04 cm/h，阴天日均液流速率小于晴天日均液流速率；雨天液流启动时间比晴天和阴天晚2 h左右（09:30），峰值出现时间比晴天晚约2 h（10:40左右出现首个极大值），峰值最小，且24 h内液流速率波动最大，液流速率最大值为12.84 cm/h，日均液流速率为3.21 cm/h，仅为晴天日均液流速率的1/3。

猕猴桃树在抽梢展叶期（4月8—10日）、开花坐果期（5月1—3日）、果实膨大期（7月30日—8

月1日）和果实成熟期（9月9—11日）的液流速率连续3 d晴天变化规律见图3（b）。猕猴桃树单日液流速率整体呈昼高夜低的单峰“几”字型变化，在夏季（果实膨大期）高温天气下存在单峰和双峰2种变化曲线。果实膨大期液流启动时间最早（06:30—07:00）、峰值液流速率最大（峰值液流速率均在10 cm/h以上）、峰值持续时间最长（约为9 h），最大液流速率约为14.88 cm/h，日均液流速率最大（7.00 cm/h左右）；抽梢展叶期的液流速率启动时间最晚（09:00—11:00）、峰值最小（峰值液流速率均在8 cm/h以下）、持续时间最短（约为6 h），最大液流速率约为7.40 cm/h，日均液流速率最小（1.60 cm/h左右）。各生育期液流速率峰值表现为果实膨大期>果实成熟期>开花坐果期>抽梢展叶期，果实膨大期日均液流速率是抽梢展叶期的3倍左右。抽梢展叶期、开花坐果期、果实成熟期夜间液流基本停止，但果实膨大期夜间出现微弱液流，这是因为该时期处于夏季，受高温影响，白天强烈的蒸腾导致树体水分损失较大，所以夜间会出现微弱的液流。



(a) 不同天气条件下小时尺度液流速率



(b) 不同生育期连续3d晴天小时尺度液流速率

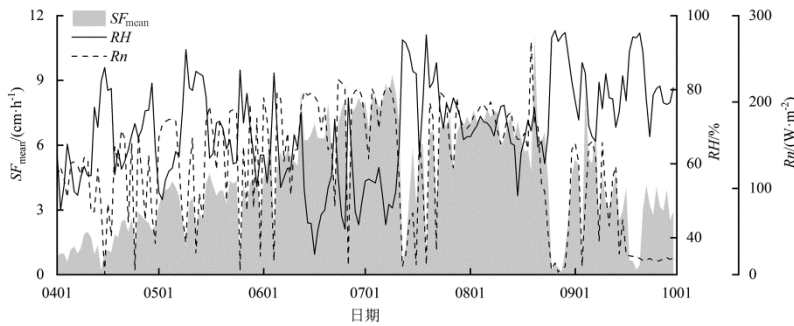
图3 猕猴桃树液流小时尺度变化规律

Fig.3 Day variation of kiwifruit sap flow

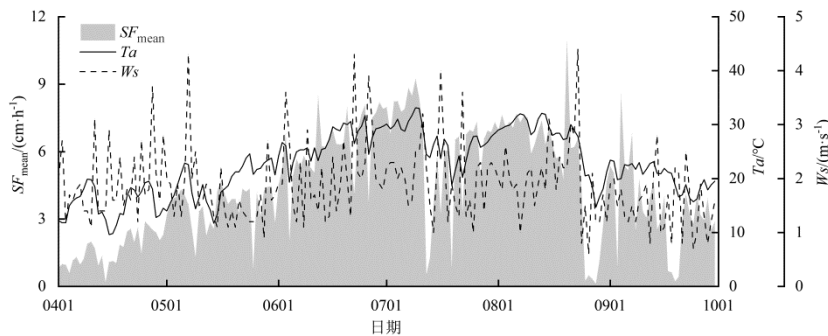
2.2 猕猴桃树日尺度液流变化对环境因子的响应

不同生育期猕猴桃树液流差异较大,除与果树自身的生长特征有关外,与外界环境的气象因子和土壤因子密切相关。整个生育期内猕猴桃树日均液流速率与各环境因子的变化曲线见图4。由图4可知,日均液流速率与 T_a 、 R_n 、 VPD 的变化均一致, SWC 在降水后一段时间内达到极大值,之后逐渐下降。

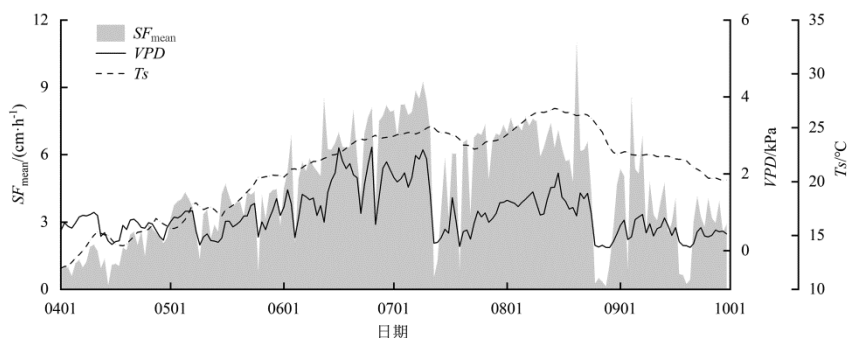
表1为日均液流速率与环境因子相关性分析结果。由表1可知,猕猴桃树日均液流速率与 R_n 、 T_a 、 W_s 、 VPD 均极显著正相关,与 RH 极显著负相关;其中, T_a 、 VPD 与 SF 的相关性最强,相关系数 >0.75 。日均液流速率与各气象因子相关系数表现为: $T_a > VPD > R_n > T_s > RH > SWC > W_s$ 。各环境因子间也具有明显的相关关系,相关分析仅为单因素效应研究,不能反应环境因子对日均液流速率的实际综合效应。



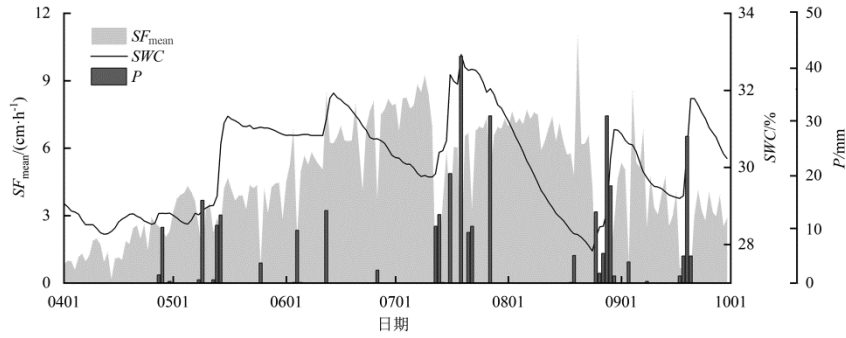
(a) 液流速率与相对湿度、太阳净辐射变化



(b) 液流速率与空气温度、风速变化



(c) 液流速率与水汽压差亏缺、土壤温度变化



(d) 液流速率与土壤体积含水率、降水量变化

图 4 猕猴桃树全生育期日均液流速率与气象因子变化曲线

Fig.4 Change curves of daily average sap flow rate and meteorological factors during the whole growth period of kiwifruit tree

表 1 猕猴桃树日均液流速率与气象因子相关系数

Table 1 Correlation coefficient between daily average sap flow rate of kiwifruit tree and meteorological factors

指标	SF_{mean}	Ta	RH	Ws	VPD	Rn	SWC	Ts
SF_{mean}	1							
Ta	0.842**	1						
RH	-0.437**	-0.351**	1					
Ws	0.128*	0.177**	-0.120	1				
VPD	0.749**	0.767**	-0.825**	0.177**	1			
Rn	0.713**	0.527**	-0.650**	-0.157*	0.679**	1		
SWC	0.298**	0.237**	0.032	-0.096	0.134	0.214**	1	
Ts	0.695**	0.874**	0.037	0.166*	0.474**	0.232**	0.220**	1

注 **表示在 $P<0.01$ 水平下显著相关; *表示在 $P<0.05$ 水平下显著相关。

以猕猴桃树日均液流速率为因变量，各环境因子为自变量，对日均液流速率和环境因子进行逐步回归分析并建立回归模型。猕猴桃树日均液流速率与环境因子的逐步回归方程中， Rn 、 Ta 、 Ws 、 SWC 、 Ts 为主要因子，其余 2 个环境因子 (VPD 、 RH) 被排除。逐步回归分析表明环境因子对猕猴桃树液流影响的最优模型为： $SF = -7.773 + 0.118Ta + 0.019Rn + 0.397Ws + 0.090SWC + 0.178Ts$ ， $R^2 = 0.835$ ，调整后的 $R^2 = 0.830$ ，达到极显著水平，剩余因子 (VPD 、 RH) 决定系数为 0.406，说明仍有其他因素对猕猴桃树蒸腾产生一定影响，如叶面积指数、气孔导度等。

由表 2 可知，各环境因子对日均液流速率的直接作用表现为： $Rn > Ts > Ta > Ws > SWC$ ，说明 Rn 对果树液流的直接作用最大， SWC 的直接作用最小。 SWC 的间接途径系数之和远大于直接途径系数， SWC 主要是通过 Rn 、 Ta 、 Ts 的共同作用影响植物液流。

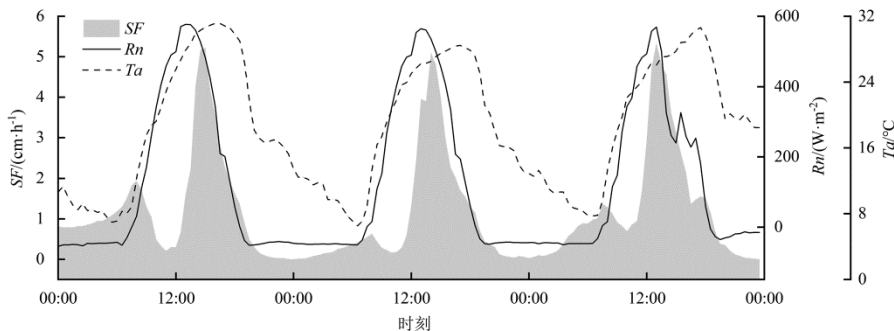
表 2 环境因子对日均液流速率的通路分析

Table 2 Path analysis of environmental factors on daily average sap flow rate

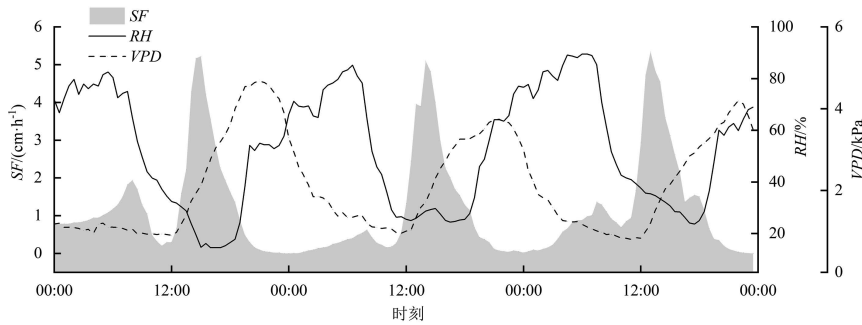
指标	直接途径系数	间接途径系数					总计
		Ta	Ws	Rn	SWC	Ts	
Ta	0.281	-	0.020	0.262	0.017	0.262	0.561
Ws	0.113	0.050	-	-0.078	-0.007	0.050	0.015
Rn	0.498	0.148	-0.018	-	0.015	0.070	0.215
SWC	0.070	0.067	-0.011	0.106	-	0.066	0.228
Ts	0.300	0.246	0.019	0.115	0.015	-	0.395

2.3 猕猴桃树小时尺度液流变化对环境因子的响应

植物的蒸腾作用与环境因子密切相关，但由于根系水分传输、气孔开闭、果树储水等多种因素影响，植物液流与环境因子的动态变化之间存在一定的时间差异。图 5 为小时尺度猕猴桃树液流与气象因子变化曲线。由图 5 可知，小时尺度植物液流与 Rn 、 Ta 、 RH 、 VPD 之间变化趋势一致，但并不完全同步，有明显时滞效应。



(a) 液流速率与太阳净辐射、空气温度变化



(b) 液流速率与相对湿度、水汽压差亏缺变化

图5 猕猴桃树小时尺度液流速率与气象因子变化曲线

Fig.5 Change curve of hourly sap flow rate and meteorological factors of kiwifruit tree

选取生育期内半小时尺度 R_n 、 T_a 、 RH 、 VPD 数据与猕猴桃树液流速率数据,探究气象因子与果树液流间的时滞效应,进行 (-120~+120) min 的错位分

析(表3)。由表3可知,生育期内液流对 R_n 的时滞为-30 min,对 RH 的时滞为60 min,对 T_a 、 VPD 的时滞均为90 min。

表3 小时尺度液流与气象因子间的时滞相关系数

Table 3 Time-lag correlation coefficient between hourly sap flow and meteorological factors

指标	时间/min									
	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	
R_n	0.677**	0.716**	0.742**	0.757**	0.156**	0.735**	0.695**	0.645**	0.586**	
T_a	0.490**	0.543**	0.592**	0.634**	0.320**	0.690**	0.700**	0.701**	0.695**	
RH	-0.359**	-0.424**	-0.485**	-0.540**	0.156**	-0.608**	-0.615**	-0.611**	-0.597**	
VPD	0.464**	0.498**	0.526**	0.549**	0.320**	0.580**	0.585**	0.588**	0.586**	

3 讨论

本研究表明,猕猴桃树在4—9月日均液流速率表现出单峰型变化规律。抽梢展叶期果树处于生长发育前期,叶面积较小,枝条较短,蒸腾面积较小,空气温度和土壤温度较低,果树生长活动较弱,所需水分也较少,因此果树日均液流速率一直处于较低水平,日均液流速率为全生育期最小(0.18 cm/h);果实膨大期处于生长发育旺盛时期,叶片发育完全,叶面积达到最大值,枝条发育完全,蒸腾面积最大,果实需要消耗大量水分,空气温度和土壤温度达到1 a内最大值,树木生命活动旺盛,所需水分很大,因此果树日均液流速率为全生育期最大(11.00 cm/h)。

猕猴桃树生育期内液流小时尺度变化规律与其他树木一致^[7,9,15-17],均呈单峰型曲线,夜间液流速率较慢,而06:00—07:00会接近于0,可能是由于根系压力导致水分在夜间主动进入,补充白天的蒸腾失水从而维持植物水分平衡^[18];08:00左右,随着太阳辐射、气温等环境因子的变化,液流速率迅速升高至峰值,并在太阳辐射和气温较高时维持一段时间,随着太阳辐射和气温下降,液流速率也很快下降。本研究中不同天气条件下小时尺度果树液流速率规律相同,晴天的液流速率峰值大于阴天,阴天的液流速率峰值又明显大于雨天;从日均液流速率来看,抽梢展叶期和果实成熟期在晴天相差不大,但抽梢展叶期整体降

水较少,而10月初降水仍较多,对果实成熟期果树蒸腾产生很大影响。本研究只选取典型晴天研究不同生育期液流速率变化,没有考虑降水对果树蒸腾的影响,只能代表各生育期晴天条件下的果树蒸腾状况。

日尺度上 VPD 和 R_n 是影响蒸腾作用的重要因素^[2,7,9,19], VPD 反应了大气的干旱程度和植物的蒸腾压力, R_n 为蒸腾提供了能量,此外较低的气温也可能导致树木蒸腾作用减弱。本研究表明, T_a 、 R_n 、 VPD 与果树液流相关性最强,是对果树液流直接影响最大的环境因子,与前人^[8]研究结果一致。Zhao等^[18]研究表明,胡杨夜间蒸腾作用与其物候期关系密切,且胡杨在不同物候期夜间蒸腾的主要调节因子不同,开花期和初叶期 T_a 对夜间蒸腾的影响比 VPD 更显著;叶片完全成叶期、叶片着色期和落叶期, VPD 对夜间蒸腾作用的影响比 T_a 更显著。Fang等^[2]研究表明,干旱地区的日均液流速率在不同地点和不同年份均不同,2016年降水偏少, VPD 和 SWC 为影响蒸腾作用的重要因子,2017年 VPD 和 T_{max} 为重要变量;高海拔站点最重要的变量是 VPD ,2017年最重要的变量是 T_{max} ,低海拔站点则相反。Lyu等^[14]研究表明,在非生长期,树木的液流速率日变化趋势与生长期相反,表现为夜间高、白天低。故液流与气象因子间的关系与植物生育期、时间尺度、测定年份和地点都有很大关系,且小时尺度研究^[7-9]表明,液流和气象因子间存在时滞现象,使得气象因子和植物液流间的关系更

为复杂, 在研究中应考虑多种因素对果树蒸腾的影响。

本研究中日均液流速率与 *VPD*、*Rn* 相关关系较强, 这与 Oogathoo 等^[7]研究一致, 而 Oogathoo 等^[7]研究表明, 日尺度 *SWC*、*Ws* 对液流速率几乎无影响, 但在本研究中 *SWC*、*Ws* 与液流速率显著相关。Tie 等^[19]研究表明, 在降水量较多的地区, 土壤水分与液流之间没有明显的相关性, 这与 Oogathoo 等^[7]研究结果一致, 这主要是因为以上研究均位于水资源较为丰富的地区, 而本试验中果树生长受水分供应的限制, 这可能是导致研究结果出现差异的重要原因。在缺水地区, 无论大气干旱程度如何, 植物的水分利用在很大程度上受到土壤水分的限制^[16-17,20-29], 过量灌溉会导致环境湿度过高, 进一步降低果实品质, 增加病虫害侵袭^[23], 因此有必要进行水分亏缺处理。

4 结论

1) 猕猴桃树日均液流速率在 4—9 月呈明显单峰型变化, 在果实膨大期升至峰值 (11.00 cm/h), 全生育期晴天日均液流速率最小值出现在抽梢展叶期, 为 0.18 cm/h; 小时尺度液流速率单日整体呈单峰型变化, 各生育期液流峰值表现为: 果实膨大期 > 果实成熟期 > 开花坐果期 > 抽梢展叶期, 不同天气条件下果树液流速率峰值表现为: 晴天 > 阴天 > 雨天。

2) 影响果树日均液流速率的影响因素主要是空气温度、水汽压差亏缺、太阳净辐射, 相关系数分别为 0.842、0.749、0.713, 这些气象因子与液流速率均极显著正相关, 土壤体积含水率主要是通过太阳净辐射、空气温度、土壤温度的共同作用影响植物液流。

3) 液流速率对太阳净辐射的时滞为 30 min, 对相对湿度的时滞为 60 min, 对空气温度和水汽压差亏缺的时滞均为 90 min。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

[1] ZHU Shidan, CUI Ningbo, ZHOU Ji, et al. Digital mapping of root-zone soil moisture using UAV-based multispectral data in a kiwifruit orchard of Northwest China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(3): 646.

[2] FANG Jing, TIAN Quanyan, HE Zhibin, et al. Response of sap flow in Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) to environmental variables in the Qilian Mountains of China[J]. *Trees*, 2022, 36(4): 1 261-1 272.

[3] 李广德, 张亚雄, 邓坦, 等. 树干液流及其主要影响因子对摘芽强度的响应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 131-139.

LI Guangde, ZHANG Yaxiong, DENG Tan, et al. Responses of tree stem sap flow and its main influencing factors to bud pruning[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(5): 131-139.

[4] XING Liwen, CUI Ningbo, LIU Chunwei, et al. Estimation of daily apple tree transpiration in the Loess Plateau region of China using

deep learning models[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 273: 107 889.

[5] PAUL-LIMOGES E, WOLF S, SCHNEIDER F D, et al. Partitioning evapotranspiration with concurrent eddy covariance measurements in a mixed forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 280: 107 786.

[6] JIAN Shengqi, WU Zening, HU Caihong. Estimation of water use of *Pinus tabulaeformis* Carr. in Loess Plateau of Northwest China[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2019, 67(3): 271-279.

[7] OOGATHOO S, HOULE D, DUCHESNE L, et al. Vapour pressure deficit and solar radiation are the major drivers of transpiration of balsam fir and black spruce tree species in humid boreal regions, even during a short-term drought[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 291: 108 063.

[8] WEI Xinguang, FU Shining, CHEN Dianyu, et al. Grapevine sap flow in response to physio-environmental factors under solar greenhouse conditions[J]. *Water*, 2020, 12(11): 3 081.

[9] 孙嘉星, 王丽娟, 韩卫华, 等. 不同灌溉水平对酿酒葡萄茎秆液流特征和产量、品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(10): 18-24.

SUN Jiaying, WANG Lijuan, HAN Weihua, et al. The effects of irrigation amount on sap flow in stems of wine grape and its consequence for grape yield and quality[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(10): 18-24.

[10] WANG Xiaowen, CAI Huanjie, LI Liang, et al. Estimating soil water content and evapotranspiration of winter wheat under deficit irrigation based on SWAP model[J]. *Sustainability*, 2020, 12(22): 9 451.

[11] WANG Yunfei, CAI Huanjie, YU Lianyu, et al. Evapotranspiration partitioning and crop coefficient of maize in dry semi-humid climate regime[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 236: 106 164.

[12] WANG Yunfei, ZOU Yufeng, CAI Huanjie, et al. Seasonal variation and controlling factors of evapotranspiration over dry semi-humid cropland in Guanzhong Plain, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 259: 107 242.

[13] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.

[14] LYU Jinlin, HE Qiuyue, YANG Jie, et al. Sap flow characteristics in growing and non-growing seasons in three tree species in the semiarid Loess Plateau region of China[J]. *Trees*, 2020, 34(4): 943-955.

[15] 刘云洁, 张含含, 常胜朝, 等. 臭椿夜间树干液流变化特征及环境驱动因素分析[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(2): 9-15.

LIU Yunjie, ZHANG Hanhan, CHANG Shengzhao, et al. Sap flow at night in the stems of *Ailanthus altissima* and its determinants[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(2): 9-15.

[16] HÖLSCHER D, KOCH O, KORN S, et al. Sap flux of five co-occurring tree species in a temperate broad-leaved forest during seasonal soil drought[J]. *Trees*, 2005, 19(6): 628-637.

[17] O'BRIEN J J, OBERBAUER S F, CLARK D B. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2004, 27(5): 551-567.

[18] ZHAO Chunyan, SI Jianhua, FENG Qi, et al. Nighttime transpiration of *Populus euphratica* during different phenophases[J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(2): 435-444.

[19] TIE Q, HU H C, TIAN F Q, et al. Environmental and physiological controls on sap flow in a subhumid mountainous catchment in North China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 240/241: 46-57.

[20] MENDES K R, GRANJA J A A, OMETTO J P, et al. *Croton blanchetianus* modulates its morphophysiological responses to tolerate drought in a tropical dry forest[J]. *Functional Plant Biology*, 2017, 44(10): 1 039.

[21] HÚRSULA NEVES L, NUNES SANTOS R I, DOS SANTOS

- TEIXEIRA G I, et al. Leaf gas exchange, photochemical responses and oxidative damages in assai (*Euterpe oleracea* Mart.) seedlings subjected to high temperature stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 257: 108-123.
- [22] CHEN Dianyu, WANG Xing, LIU Shouyang, et al. Using Bayesian analysis to compare the performance of three evapotranspiration models for rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in the Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 341-357.
- [23] GIRONA J, MATA M, ARBONÈS A, et al. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2003, 128(3): 432-440.
- [24] PETOUSI I, DASKALAKIS G, FOUNTOULAKIS M S, et al. Effects of treated wastewater irrigation on the establishment of young grapevines[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 658: 485-492.
- [25] MUTTI P R, DA SILVA L L, DE S MEDEIROS S, et al. Basin scale rainfall-evapotranspiration dynamics in a tropical semiarid environment during dry and wet years[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 75: 29-43.
- [26] WILSON T G, KUSTAS W P, ALFIERI J G, et al. Relationships between soil water content, evapotranspiration, and irrigation measurements in a California drip-irrigated Pinot noir vineyard[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 237: 106-186.
- [27] MACKAY D S, EWERS B E, COOK B D, et al. Environmental drivers of evapotranspiration in a shrub wetland and an upland forest in Northern Wisconsin[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(3): W03442.
- [28] BROWN S M, PETRONE R M, CHASMER L, et al. Atmospheric and soil moisture controls on evapotranspiration from above and within a Western Boreal Plain aspen forest[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(15): 4449-4462.
- [29] DEPANTE M, MORISON M Q, PETRONE R M, et al. Hydraulic redistribution and hydrological controls on aspen transpiration and establishment in peatlands following wildfire[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(21): 2714-2728.

Sap Flow Characteristics of Kiwifruit Tree and Its Response to Environmental Factors

LI Zongyang^{1,2}, ZHAO Lu³, XING Liwen³, CUI Ningbo³, CAI Huanjie^{1,2*}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

Abstract: 【Objective】 To explore the variation characteristics of kiwifruit sap flow and its response to environmental factors. 【Method】 The thermal diffusion pin-type sap flow meter was used to monitor the sap flow law of kiwifruit trees in Guanzhong Plain, and the relationship between the sap flow of kiwifruit tree and environmental factors was analyzed. 【Result】 The daily-scale sap flow of kiwifruit tree showed a significant single-peak change during the whole growth period. The maximum value was 11.00 cm/h, which appeared in the fruit expansion period, and the minimum value was 0.18 cm/h, which appeared in the leaf expansion period. The peak value of hourly-scale sap flow rate in each growth period was: fruit expansion period > fruit maturity period > flowering and fruit setting period > shoot expansion period. The peak value of sap flow rate under different weather conditions was: sunny day > cloudy day > rainy day. The daily average sap flow rate of fruit tree was significantly positively correlated with air temperature, water vapor pressure deficit and net solar radiation, and the correlation coefficients were 0.842, 0.749 and 0.713, respectively. The results of path analysis showed that the net solar radiation had the greatest direct effect on the sap flow of kiwifruit tree, and the soil volumetric water content mainly affected the plant sap flow through the combined effect of net solar radiation, air temperature and soil temperature. There is an obvious time lag effect between meteorological factors and liquid flow rate. The time lag between liquid flow rate and solar net radiation is -30 min, the time lag between liquid flow rate and humidity is 60 min, and the time lag between liquid flow rate and air temperature and water vapor pressure deficit is 90 min. 【Conclusion】 The transpiration and water consumption of kiwifruit tree during fruit expansion period were the largest, so attention should be paid to the soil water status of kiwifruit tree during this period. In sunny weather, the sap flow of kiwifruit tree is the largest from 12:00 to 16:00, and the evaporation is also large, so irrigation should be avoided in this time to reduce the irrigation loss caused by transpiration.

Key words: kiwifruit tree; sap flow; environmental factors; path analysis; time delay

责任编辑: 白芳芳