

# 井式节水灌溉下干旱区灰枣树干液流动态 及其对气象因子的响应

程平<sup>1</sup>, 李宏<sup>1</sup>, 李长城<sup>2</sup>, 张志刚<sup>2</sup>, 刘帮<sup>2</sup>, 孙明森<sup>2</sup>

(1. 新疆林业科学院, 新疆乌鲁木齐 830000; 2. 新疆农业大学林学与园艺学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 在干旱区采用热扩散式液流仪(TDP)、HOBO 小气候仪连续监测井式节水灌溉方式下盛果期枣树干液流及气象因子, 探讨井式灌溉条件下盛果期枣树干液流变化对气象因子的响应。结果表明: 枣树整个生育期树干液流总量为 3 935 kg, 夏季液流累积量为 2 387 kg, 约占整个生育期液流总量的 61%, 蒸腾耗水量夏季最为严重。影响各月枣树干液流的主导气象因子不同, 而太阳辐射占各月比例较多。太阳辐射、水汽压亏缺值越大并不代表液流速率越大, 液流速率的大小取决于时间、气象及枣树生理状态。

**关键词:** 井式灌溉; 盛果期灰枣; 液流量; 气象因子

**中图分类号:** S718.43 **文献标志码:** A

## Stem sap flow dynamic of jujube and its response to meteorological factors in the arid area under pit irrigation

CHENG Ping<sup>1</sup>, LI Hong<sup>1</sup>, LI Chang-cheng<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-gang<sup>2</sup>, LIU Bang<sup>2</sup>, SUN Ming-sen<sup>2</sup>

(1. Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi, Xinjiang 830000, China;

2. Forestry and Horticulture College, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** Stem sap meter (TDP) and HOBO microclimate were used to continuously monitor the stem sap flow rate and meteorological factors of jujube in full fruit period under the condition of pit irrigation in the arid area. The results showed that the total amount of sap flow in the whole growth period of jujube was 3 935 kg, and the accumulation of sap flow in summer was 2 387 kg, which accounted for 61% of the whole growth period. The transpiration water consumption in summer was the most serious(severe). The main meteorological factors affecting the stem sap flow of each month were different, and the proportion of solar radiation accounted for more months. Higher solar radiation and value of water vapor pressure deficit don't indicate higher flow rate, the flow rate depends on the time, meteorological and jujube's physiological state.

**Keywords:** pit irrigation; jujube in full fruit period; sap flow; meteorological factor

节水灌溉工程技术是指减少灌溉渠系(管道)输水过程中的水量蒸发与渗漏损失, 提高农田灌溉水利用率的技术<sup>[1]</sup>。目前我国节水灌溉技术包括滴灌、喷灌、渗灌, 但由于灌溉不合理依然存在水资源浪费或影响植物正常生长的现象。例如滴灌、喷灌灌水量过大容易形成地表积水, 造成水分蒸发; 渗灌水量过大则会形成深层渗漏, 更有可能影响地下水质量<sup>[2-4]</sup>。为了更好的减少水资源浪费同时不影响植物的正常生长, 需结合节水灌溉的工程技术及农艺技术以减少水资源浪费并促进植物正常生长。林

木井式灌溉采用合理灌水技术要素<sup>[5-7]</sup>克服地表积水及深层渗漏, 减少水资源浪费以达到节水目的, 使植物能够正常生长。

蒸腾是植物重要的生理生态过程之一, 而植物体内 90% 以上茎秆液流用以蒸腾<sup>[8-9]</sup>。因此, 了解植物的液流变化是掌握植物蒸腾耗水的前提<sup>[10]</sup>。近年来, 利用茎流计测量植物蒸腾量的方法应用越来越广, 根据茎流计的使用方法和原理主要分为热脉冲速率法(HPV)、茎干热平衡法(SHB)、热扩散法(TDP)及激光热脉冲法(LHPG)<sup>[11]</sup>。热扩散法(TDP)

被认为是当前测算植物蒸腾速率稳定的技术<sup>[12-15]</sup>,多被用来测定干性较强的乔木,其中包括马占相思、胡杨、山杨、油松等非经济林树种<sup>[16-19]</sup>,以及梨、芒果、核桃、枣、苹果等经济林树种<sup>[20-25]</sup>。新疆地理位置处于干旱区,其林果业发展蓬勃,大部分果园已进入盛果期,而水资源短缺是一个现实问题,本试验以新疆阿克苏地区主栽经济树种灰枣(盛果期)为研究对象,采用井式节水灌溉,用热扩散式茎流仪及HOBO小气候站连续测定样株液流量、周边各气象因子,分析液流量变化特征及其对气象因子的响应,旨

在为干旱区盛果期枣树的精准灌溉提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地选择在新疆温宿县境内的新疆林科院佳木试验站,海拔 1 103 m,浅层地下水位 3.3 m;属于温带大陆性气候,年降雨量少,蒸发量大;年日照时数 2 747 h,年平均总辐射量 6 000 MJ·m<sup>-2</sup>,年均气温为 10.1℃,≥10℃积温 2 916.8℃~3 198.6℃,无霜期 195 d,土壤理化性质如表 1。

表 1 样地土壤的主要理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of test soil

深度 Depth /cm	土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	田间 持水量 Field capacity/%	饱和含水率 Saturated moisture content/%	电导率 Conductivity /(S·cm <sup>-1</sup> )	有机质含量 Organic matter content /(g·kg <sup>-1</sup> )	pH	速效氮 Available N /(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P /(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K /(mg·kg <sup>-1</sup> )
0~20	砂壤土 Sandy loam	1.35	31.51	32.13	0.25	14.67	8.42	74.68	19.49	468.5
20~50	砂壤土 Sandy loam	1.40	26.77	28.11	0.31	14.44	8.44	71.87	12.31	312.5
50~80	砂壤土 Sandy loam	1.40	28.77	30.80	0.46	9.84	8.09	46.53	33.15	273.5

试验地为盛果期枣园,树行南北走向,树形为主干疏散分层型,树间距 4 m×4 m,枣园品种是灰枣。树龄 10~15 a,地径(距离地面 30 cm)范围 11~13 cm,冠幅:东西方向 3~4 m,南北方向 3~4 m;枝下高度 1.0~1.5 m,树高 4~5 m。管理措施:施肥:春季施基肥油渣 200 kg·667 m<sup>-2</sup>、二铵 50 kg·667 m<sup>-2</sup>、尿素 100 kg·667 m<sup>-2</sup>、复合肥 100 kg·667 m<sup>-2</sup>,8月施滴灌追肥 10 kg·667 m<sup>-2</sup>,共施 4次;除草:4、5、6、7月底进行除草;打药:4月底喷施石硫合剂,6月底喷施保花坐果药剂;抹芽:6、7、8月对树体进行抹芽。

样地大小 15 m×25 m,采用井式节水灌溉,当土壤含水率达到田间持水量 60%开始灌水,灌水定额为 320 L·株<sup>-1</sup>;随机选 3株健康的盛果期灰枣为样株。

### 1.2 试验方法

根据枣树的生物学特性,结合 2013 年和 2014 年观察记录情况,把枣树生育期划分为 6 个时期:休眠期、萌芽展叶期、开花坐果期、果实膨大期、成熟期、落叶期,其时间分隔为上年 11 月初—次年 4 月底、5 月初—6 月底、6 月初—8 月中旬、8 月初—9 月中旬、9 月中旬—10 月中旬、10 月初—10 月底。

井式灌溉,即建立在滴灌基础上的新型灌溉方法,本试验田采用一行两带,距离样树东、南、西、北四个方向 70 cm 处安装一个内径 10 cm 和高 60 cm 的带孔垂直井管,孔圆形,1 孔/cm<sup>2</sup>,孔径 0.5 cm。用长约 10 cm 的盲管将水引入井管内,水分在管中横向渗漏直接灌溉到地下林木根系分布区,使地表仍保持较干燥、干燥状态,造成灌溉湿润区土壤和地

表土壤毛细管处于断裂状态,极大的阻止和减少灌溉后的地表蒸发,使得水分有效供给林木根系,从而提高水的利用效率达到节水目的<sup>[26]</sup>。灌水定额 320 L·株<sup>-1</sup>,全年灌水 23 次,冬灌(年底最后一次灌水)定额为 640 L·株<sup>-1</sup>,灌溉定额为 323 m<sup>3</sup>·667 m<sup>-2</sup>。井管位置及灌水定额依据:根据地径范围 11~13 cm 灰枣根系分布情况,确定距离树干水平 150 cm、深 0~80 cm 土层为根系主要分布区域<sup>[27]</sup>,同时依据土壤水分湿润模型<sup>[28-29]</sup>,来确定井管位置和滴头流量。各生育期灌水时间如表 2。样株整个生育期共灌水 20 次,灌水总量为 6 400 kg。

### 1.3 数据采集

1.3.1 树干液流数据采集 采用热扩散法<sup>[30]</sup>插针式茎流计测定树干液流,计算公式:“茎流指数”(K),该指数通过测量温度差值和流速为零时的温差最大值(dTM)而计算得出:K=(dTM-dT)/dT,用无量纲量 K 来计算茎流速率 V,再通过茎杆的边

表 2 枣树各生育期灌水时间

Table 2 The irrigation time in all growth stages of jujube

生育期 Growth stages	日期 Time(M-d)
萌芽展叶期 Bud and leaf stage(S <sub>1</sub> )	05-03-06-26
开花坐果期 Flowering and fruit setting stage(S <sub>2</sub> )	06-26-08-20
果实膨大期 Fruit enlargement(S <sub>3</sub> )	08-06-09-15
成熟期 Maturity(S <sub>4</sub> )	09-15-10-15
落叶期 Defoliation(S <sub>5</sub> )	10-05-10-30

材横截面积  $A_s(\text{cm}^2)$ , 与  $V$  组合计算得到树干液流量(体积流量)  $SF$ 。蒸腾耗水量( $T$ )可根据树干液流量求出<sup>[31]</sup>

$$V = 0.0119 \times K^{1.231} \quad (1)$$

$$SF = A_s \times V \times 3600 \quad (2)$$

$$T(\text{g}) = SF \times t \times 99.8\% \quad (3)$$

式中,  $V$  为茎流速率( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $SF$  为树干液流量( $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $t$  为测定时间, 99.8% 表示叶片的蒸腾作用所占树干液流的比例。

插针前对地径 11~13 cm 枯死枣树茎杆进行截断测量, 共截枣树 5 棵, 并测得边材厚度, 从所得数据分析可得边材厚度占地径的 34% 左右。在样株距离地面 50 cm 处, 量取直径, 计算边材厚度, 在树干南北两侧清理表皮, 清除死皮、木栓层等, 直至漏出形成层。将钻模贴紧树干, 消毒钻头进行打孔, 将两对 30 cm 探针加热以电偶在上的原则插入南北两侧钻孔(一株两对探针), 用橡皮泥封住钻孔, 用四分之一半球将探针固定, 依次包裹铝箔纸、反射膜并用胶带封死, 防止进入雨水。连接探头电缆线与数据采集器(CR1000 Decagon USA)接口, 设置数据采集器样株边材面积、探头电压、扫描时间、储存时间参数。测定期间每两周更换一次探头, 并用双氧水进行消毒, 数据 30 s 扫描一次, 10 min 计算一次均值并储存。

1.3.2 气象数据采集 在样地附近安装了 HOBO 小气候仪, 可以测定净太阳辐射( $ES$ )、空气温度( $T$ )、空气相对湿度( $RH$ )、风速( $W$ )。采用 EC50 (Decagon USA) 测取土壤温度及水分含量, 探头深度为 20、40、60 cm。设置数据采集器 30 s 扫描数据一次, 10 min 计算一次均值并储存, 与测定树干液流数据相匹配。水汽压亏缺  $VPD$  的计算方法如下

$$VPD = 0.611e^{17.502T/(T+240.97)}(1 - RH) \quad (4)$$

式中,  $T$  为气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $RH$  为相对湿度(%)。

#### 1.4 茎流计的率定

在试验开始前一个月, 选择 3 株地径 3 cm 灰枣树带土球移栽到花盆里, 进行培育; 两周后通过该样株对茎流计进行率定, 将花盆口用塑料薄膜封死, 防止水分蒸发。通过修剪 3 cm 粗度枝干确定边材厚度, 插入探针并设置茎流计参数, 收集数据。每日 12:00 称取花盆重与茎流计液流总量进行对比, 规定相对误差在 5% 以内, 若超出误差范围, 需校准茎流计<sup>[32]</sup>。此实验项目已连续进行多年, 前人已对茎流计测定灰枣进行率定, 且连续使用中。

#### 1.5 数据处理

对因更换探针及停电导致树干液流缺失值, 采用平均日变化法进行插补<sup>[33]</sup>, 利用 Excel 2010, SPSS 18.0 对数据进行处理分析, 对不同尺度时间的  $SF$

采用 Excel 2010 作图, 利用 SPSS 18.0 分析因变量  $SF$  与自变量  $ES$ 、 $T$ 、 $RH$ 、 $W$ 、 $VPD$  之间的相关性, 并做残差分析及相关回归模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 盛果期枣树多时间尺度树干液流变化

2.1.1 枣树干液流各生育期变化 基于整个生育期枣树干液流数据变化较为密集, 难于直观树干液流日变化规律, 先将样株两组探针测得液流速率按时间点求均值, 然后在对各生育期(萌芽展叶期  $S_1$ 、开花坐果期  $S_2$ 、果实膨大期  $S_3$ 、成熟期  $S_4$ 、落叶期  $S_5$ )典型晴天(以太阳辐射为依据)树干液流按时间点求均值作图, 如图 1 所示。从图中可以看出各生育期树干液流昼夜变化较为明显, 且均成“几”字宽峰型,  $S_4$  昼变有较小波动。 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  液流启动时间为 8:00,  $S_4$  启动时间为 9:30,  $S_5$  启动时间为 11:00;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  液流达到峰值时间为 12:00, 其值分别为 1 491、3 004、3 227、2 842  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ , 而  $S_5$  16:00 达到峰值晚于前者 4 h, 其值为 1 417.55  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 各生育期液流迅速下降, 趋于稳定时间点较为统一, 均为 18:00 和 23:00; 夜间各生育期液流均有活动, 但基数较小,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  夜间最大液流速率分别为 71、192、264、242、149  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ , 最小液流速率为 0。各生育期日均液流速率为 620、1 279、1 367、1 109、487  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。盛果期灰枣各生育期日均液流速率从大到小依次为  $S_3 > S_2 > S_4 > S_1 > S_5$ 。综上, 因太阳辐射角度、强度以及林间叶片疏密程度造成各时期液流特征值存在差异。

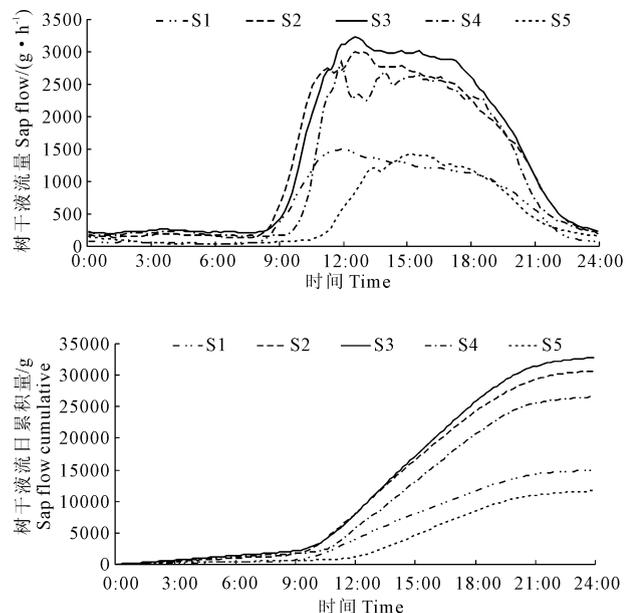


图1 枣树干液流各生育期日变化及日累积量  
Fig.1 Daily changes and daily cumulative amount of jujube stem sap flow at each growth stage

从日累积量图中可以看出  $S_3 > S_2 > S_4 > S_1 > S_5$ , 与日均液流速率规律较为相符, 其值分别为 32.8、30.7、26.6、14.9、11.7 kg。  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  液流日累积量启动时间为 10:00, 晚于液流启动时间 2 h,  $S_5$  启动时间为 12:00, 晚于液流启动时间 1 h, 启动基数分别为 0.5、1.3、1.9、1.6、0.5 kg, 由于液流速率启动基数较小, 造成了液流速率与日累积量之间的时滞效应。 21:00 之前  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  日累积量持续增长, 增长较为迅速且各生育期之间差距逐渐显著, 21:00 之后趋于稳定。 对样株各生育期液流总量求和,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  液流总量分别为 313、1 842、2 166、665、199 kg, 分别占总生长季液流量的 8%、47%、55%、17%、5% (基于重叠时间段)。

2.1.2 枣树干液流月间变化 基于降雨量绘制 5—10 月日累积液流量及日最大液流速率, 如图 2 所示。从图中可以看出日累积液流量及日最大液流速率变化过程线均符合二次多项式函数关系。从日累积液流量分析可知, 7 月初到 9 月初为枣树干日累积液流及蒸腾耗水最大时期, 此时期枣树生长最为旺盛, 最大值出现在 7 月 22 日为  $47 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ , 该时间段共有 10 d 日累积量大于  $40 \text{ kg}$ ; 5、6、10 月, 叶片处于展叶和落叶期, 太阳辐射强度相对于 7、8、9 月

较弱, 因此日累积液流量较小, 最小值在 10 月 21 日为  $3 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从日最大液流速率分析, 7 月底到 9 月底日最大液流速率为峰值段, 最大值在 9 月 4 号为  $6 339 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ , 与日累积液流量有差异。原因分析: 其一, 9 月底虽然日液流速率峰值大但峰值段持续时间短, 日液流速率变化幅度大, 导致日累积液流量值相对较小, 7 月初日液流速率一般, 但峰值段持续时间长, 对日累积液流量影响较大。其二, 降雨量分布不均匀, 集中分布在 8、9 月份, 造成日累积液流量值变小。5—10 月各月液流累积量分别为 245、561、915、1 098、776、293 kg, 根据公式(3)可得 5—10 月各月蒸腾耗水量分别为 244.5、559.9、913.2、1 095.8、774.4、292.4 kg, 树干液流量基数越大, 蒸腾耗水量越大。

2.1.3 枣树干液流季节变化 对枣树生育期内春季、夏季、秋季树干液流季累积量及季液流速率进行统计并绘制变化过程线, 如图 3 所示。从图中可以看出季液流速率夏季 > 秋季 > 春季, 其值分别为 2 242、919、197  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。季液流累积量分布与液流速率大小较为相符, 夏季最大, 春季最小, 夏季液流累积量为  $2387 \text{ kg} \cdot \text{季}^{-1}$ , 春季为  $489 \text{ kg} \cdot \text{季}^{-1}$ 。整个生育期内枣树液流总量为 3 935 kg。

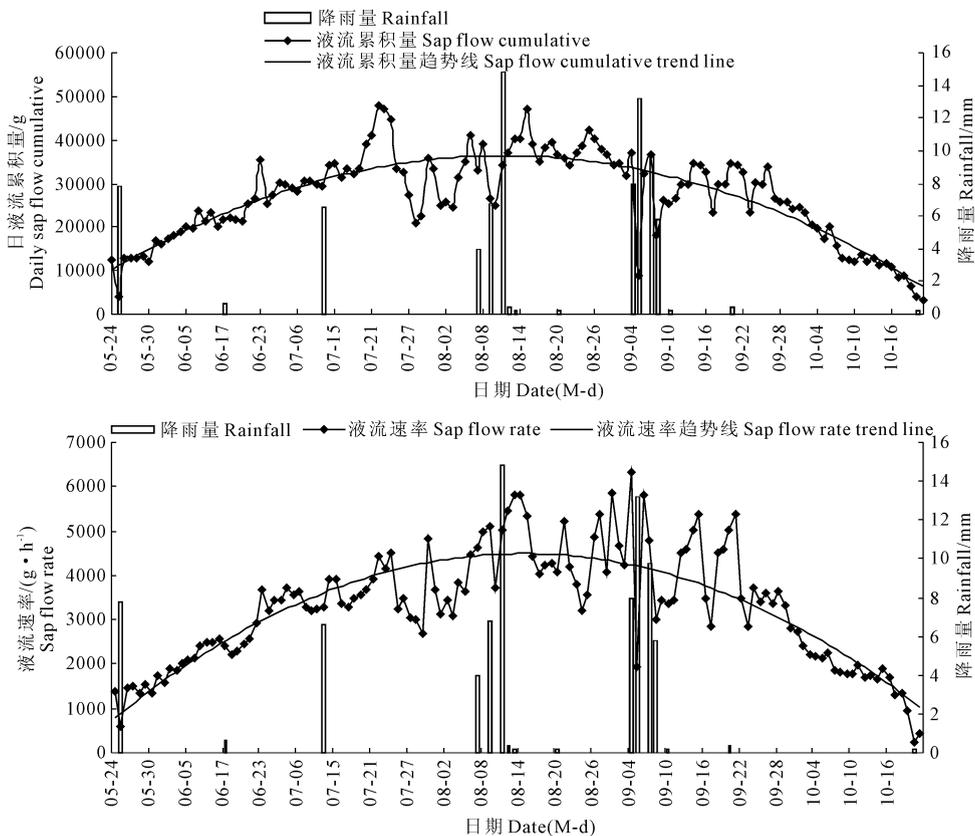


图 2 枣树干液流累积量及日最大液流速率变化

Fig.2 Variations of jujube stem sap flow cumulants and the maximum daily sap flow rate

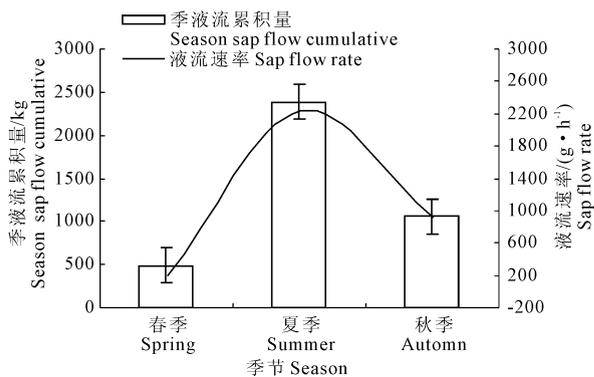


图 3 不同季节枣树干液流累积量及液流速率变化

Fig.3 Variations of jujube stem sap flow cumulants and sap flow rate

## 2.2 枣树干液流与气象因子的关系

### 2.2.1 枣树干液流与气象因子相关性分析 为了

解枣树干液流日变化特征与气象因子的关系,在监测期 5—10 月各选择一个较为典型的晴天进行分析。利用 Spss 18.0 分析各月典型晴天枣树干液流速率与各气象因子太阳辐射、温度、相对湿度、风速之间相关关系,相关系数如表 3 所示。液流速率与各气象因子均呈显著相关性,液流速率与太阳辐射、温度、水汽压亏缺、风速呈显著性正相关,与相对湿度呈显著性负相关( $N = 144, ** P < 0.01$ ),风速与液流速率相关性最小。5、6、8 月影响枣树干液流的主导气象因子为太阳辐射,7 月为温度,10 月为相对湿度,说明在枣树整个生育期影响液流量的主导气象因子不唯一,与各时间段枣树自身生理特征存在相关关系。因此可根据不同时间段主导因子的不同对枣树采取合理的管理措施。

表 3 枣树干液流与气象因子相关性

Table 3 The correlation between jujube stem sap flow and meteorological factors

月份 Month	太阳辐射 Solar radition	温度 Temperature	相对湿度 RH	水汽压亏缺 VPD	风速 Wind speed
5 月 May	0.932 **	0.842 **	-0.669 **	0.775 **	0.664 **
6 月 June	0.856 **	0.775 **	-0.743 **	0.734 **	0.301 **
7 月 July	0.878 **	0.880 **	-0.852 **	0.861 **	0.203 **
8 月 August	0.914 **	0.904 **	-0.875 **	0.872 **	0.309 **
9 月 September	0.899 **	0.915 **	-0.939 **	0.913 **	0.238 **
10 月 October	0.881 **	0.920 **	-0.925 **	0.943 **	0.144 **

注:  $N = 144, ** P < 0.01$ .

Note:  $N = 144, ** P < 0.01$ .

各气象因子中,太阳辐射、温度、相对湿度、水汽压亏缺对枣树干液流速率影响较大,其中水汽压亏缺是温度与相对湿度共同作用的结果<sup>[34]</sup>,因此对液流速率与太阳辐射、水汽压亏缺作图进行直观分析,如图 4 所示。从图中可以看出液流速率、太阳辐射、水汽压亏缺日变化各月之间差异较大,5、6、7 月日启动时间为 8:00 左右,8、9 月启动时间为 10:00 左右,10 月启动时间不相符。太阳辐射与水汽压亏缺日峰值出现时间为 15:00 左右,液流速率日峰值出现于 12:00 左右,早于前者 3 h。由此说明,太阳辐射、水汽压亏缺值越大液流速率值不一定越大,而是在合适的时间,适当的气象数值,以及枣树最佳生理状态,液流速率的峰值才会出现。例如修剪增加林间透光透气性、旋耕减少地表植被都会引起枣树干液流的变化。

2.2.2 枣树干液流与气象因子回归分析 为了进一步探讨液流速率与气象因子之间的关系,对液流速率与气象因子做回归分析,先检验数值是否符合正态分布,如图 5 所示。从直方图可以看出标准化残差 - 频率符合正态分布;P - P 图中,所测点围绕

在直线周围也符合正态分布;从散点图可以看出残差在 -2 到 +2 之间,可以解释大部分预测值,说明回归方程式有效。因此,所得数据回归分析具有实际意义。

根据温度、相对湿度利用公式(4)求得饱和水汽压,以太阳辐射、温度、相对湿度、饱和水汽压为自变量( $X$ ),液流速率为因变量( $Y$ )作图。枣树干液流与太阳辐射对称性较弱,说明液流速率与太阳辐射变化较为一致,与温度对称性一般,与相对湿度、饱和水汽压对称性较好,这与午间枣树受到干旱胁迫,气孔关闭,蒸腾量下降有关<sup>[35]</sup>。利用线性、多项式、指数、幂函数等对液流速率与各气象因子进行拟合,选出最优。如图 6,液流速率与太阳辐射符合二次多项式关系,  $R^2 = 0.94$ ;与温度、相对湿度、饱和水汽压符合幂函数关系,  $R^2$  分别为 0.86、0.71、0.79。最后对液流速率与各气象因子进行多元回归分析,获得总拟合方程为  $SF = 276.354 + 6.344ES + 182.441T - 33.472RH - 996.995VPD$ ,  $R^2 = 0.924$ ,拟合程度较高。

### 3 讨论

以新疆林科院佳木试验站为实验区,以井式节水灌溉下的盛果期灰枣为研究对象,利用热扩散插针式液流仪对样株整个生育期的树干液流进行动态

监测,利用 HOBO 小气候仪同步于液流仪监测气象数据,对不同时间尺度及各气象数据对枣树干液流量影响进行研究。

随着生长季内物候的变化,盛果期枣树整个生育期液流量变化表现为前期低(5、6月)中期高(7—

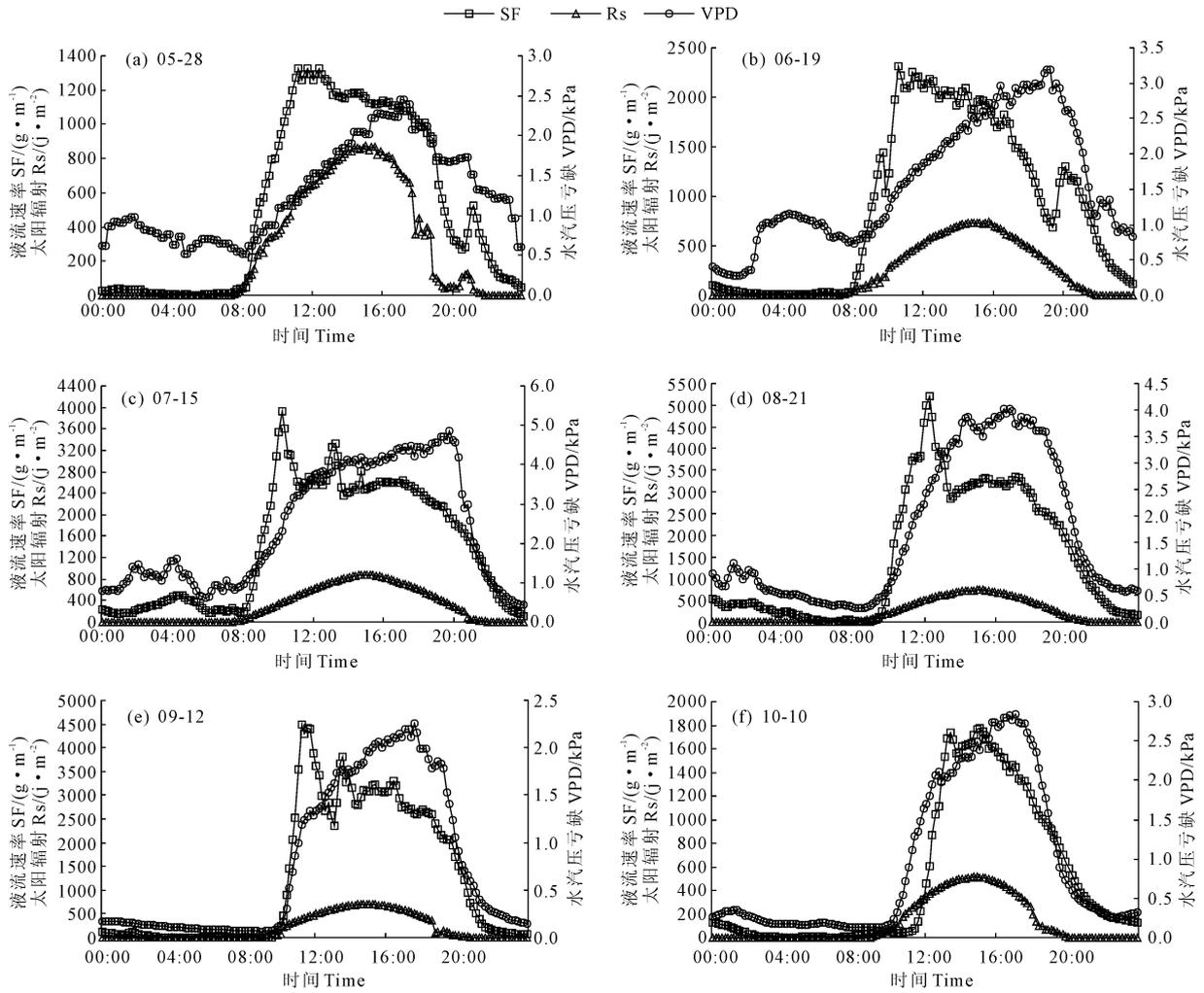


图 4 各月份典型晴天液流速率(SF)、太阳辐射(Rs)与水汽压亏缺(VPD)日变化

Fig.4 Diurnal variation of sap flow rate (SF), solar radiation (Rs) and vapor pressure deficit (VPD) in a typical sunny day of each month

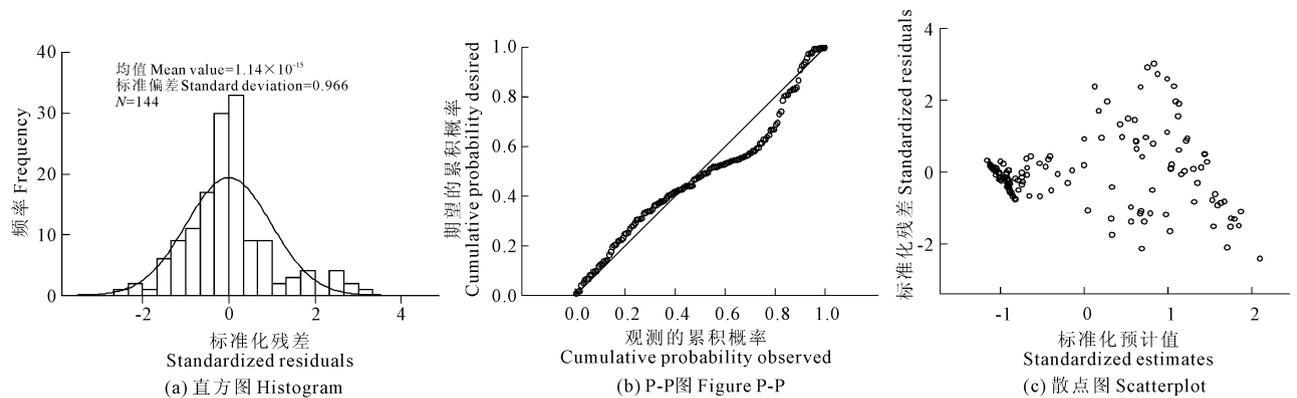


图 5 树干液流量速率残差检验

Fig.5 Residual test of stem sap flow rate

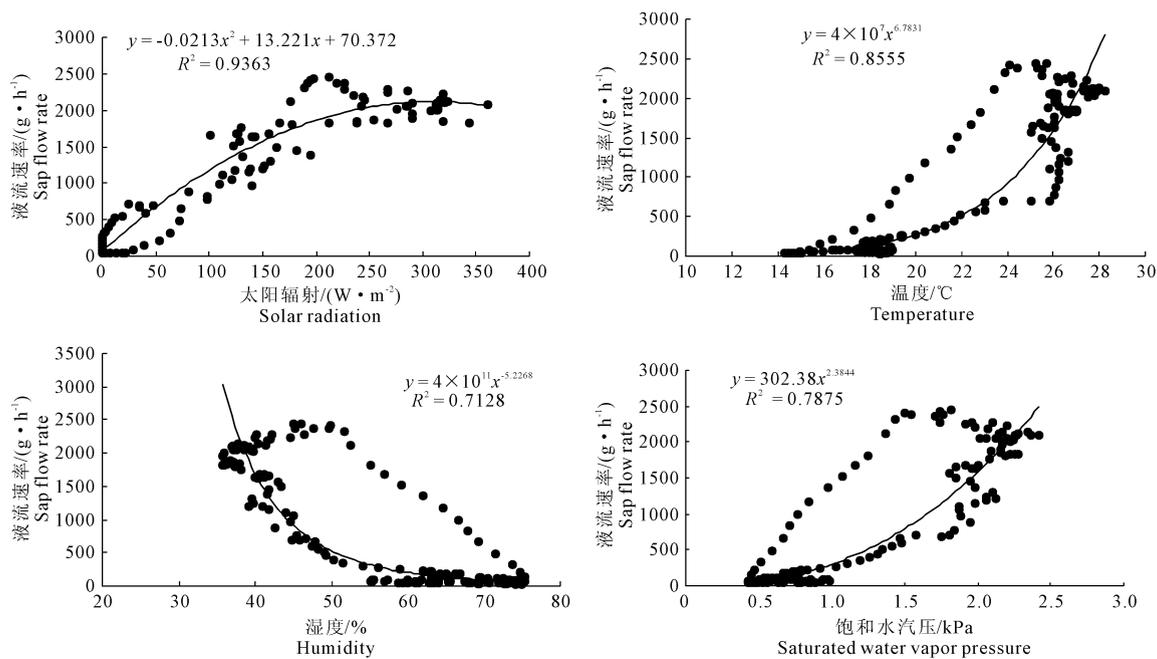


图6 各气象参数与枣树干液流速率散点图

Fig.6 Scatter plot of meteorological parameters and jujube stem sap flow rate

9月)后期低(10月)的变化趋势。日变化曲线为单峰,液流启动时间为8:00左右,峰值出现在12:00左右,不同月份液流速率峰值不同,与王文明<sup>[36]</sup>、李宏<sup>[37]</sup>研究有所差异,由此可知相同树种在不同树龄、不同区域、采用不同的灌溉方式及灌水量的不同都会造成液流特征值的差异。在枣树整个生育期共灌水20次,灌水总量为6400 kg,树干液流总量3935 kg,水分被吸收用于蒸腾效率高达61%,效果明显优于滴灌、微喷灌<sup>[38]</sup>。分析枣树干液流速率的夜间变化,夜间各生育期液流均有活动,但基数较小, $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 夜间最大液流速率分别为71、192、264、242、149  $g \cdot h^{-1}$ ,最小液流速率为0,液流累积量启动基数分别为0.5、1.3、1.9、1.6、0.5 kg,由此可知高效的井式节水灌溉方式能够满足枣树蒸腾耗水。

通过对不同月份枣树干液流与气象因子响应变化的分析可知,影响液流速率变化的主导气象因子不唯一,但太阳辐射贡献较大。同时影响枣树干液流诸多气象因子大多存在连带效应。例如太阳辐射、温度会影响空气湿度,水汽压亏缺又是空气温度和相对湿度的综合体现。因此,研究气象因子对枣树干液流的影响需统筹各气象因子对液流速率的影响,而非通过多元回归建立液流速率与太阳辐射、水汽压亏缺、温度、湿度多元一次方程,与张建国等<sup>[39]</sup>观点较为一致。而赵平等<sup>[40]</sup>则更深层次地对太阳辐射、水汽压亏缺进行等级划分来分析不同太阳辐

射强度对水汽压亏缺的响应特征。本研究位于干旱地区,在典型晴天条件下建立液流速率与太阳辐射、温度、湿度、水汽压亏缺、风速气象因子的幂函数及指数函数,拟合程度较高。从拟合曲线可以看出,液流速率会随着气象因子变化呈现两种趋势,第一种“低—高保持高趋势水平不变”,第二种“由高—低保持低趋势水平不变”。因此,气象因子与液流速率并不成持续正相关或负相关关系,其相关性具有区间划分特征。

## 4 结论

研究表明,合理的井式节水灌溉制度能够满足盛果期枣树蒸腾耗水量,不同时间段枣树各生理指标不同,在加之气象因子的强度不同,应适时地进行灌水频率的调整,其中应着重把握太阳辐射、温度、相对湿度此三个气象因子的变化。井式灌溉在满足枣树生理需水量的情况下,水分被根系吸收利用效率高达61%,对于果实品质好坏的影响,还未与其它灌溉方式下果实品质进行对比,因此后期还需进一步的研究,确定更合理的灌水量及灌溉频率,提高水分利用效率同时对果实增产提质。

### 参考文献:

[1] 逢焕成.我国节水灌溉技术现状与发展趋势分析[J].中国土壤与肥料,2006,5:1-6.  
 [2] 郑天翔,唐湘如,罗锡文,等.不同灌溉方式对精量穴直播超级

- 稻生产的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 52-55.
- [3] 韦彦, 孙丽萍, 王树忠, 等. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分配及硝态氮运移的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 67-72.
- [4] 任玉忠, 王水献, 谢蕾, 等. 干旱区不同灌溉方式对枣树水分利用效率和果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 95-102.
- [5] 李道西, 罗金耀, 彭世彰. 地下滴灌土壤水分运动室内试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 26-28.
- [6] 吕谋超, 仵峰, 彭贵芳, 等. 地下和地表滴灌土壤水分运动的室内试验研究[J]. 灌溉排水学报, 1996, (1): 42-44.
- [7] 何华, 康绍忠, 曹红霞. 地下滴灌埋管深度对冬小麦根冠生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 31-33.
- [8] Swanson R H. Significant historical development in thermal methods for measuring sap flow in trees[J]. Agricultural and forest Meteorology, 1994, 72(1-2): 113-132.
- [9] Wullschlegel SD, Meinzer FC, Vertessy RA. A review of whole-plant water use studies[J]. Tree Physiology, 1998, 18(8-9): 499-512.
- [10] 李宏, 刘帮, 孙明森, 等. 干旱区枣树茎流速率变化特征及其与气象因素的关系[J]. 河南农业科学, 2016, 45(2): 98-103.
- [11] 龙秋波, 贾绍凤. 茎流计发展及应用综述[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(4): 18-23.
- [12] Girona J, Gelly M, Mata M, et al. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils[J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(2): 97-108.
- [13] Masmoudi C C, Masmoudi M, Abid - Karray J, et al. Sap flow measurements in young olive trees (*Olea europaea* L.) cv. Chétoui under Tunisian conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(4): 520-527.
- [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] 胡伟, 闫美杰, 杜峰, 等. 黄土丘陵区山杨展叶期树干液流分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 48-52.
- [16] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2145-2151.
- [17] 张小由, 康尔泗, 张智慧, 等. 黑河下游天然胡杨树树干液流特征的试验研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 742-746.
- [18] 马长明, 管伟, 叶兵, 等. 利用热扩散式边材液流探针(TDP)对山杨树干液流的研究[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(1): 39-43.
- [19] 王华田, 马履一, 孙鹏森. 油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 31-37.
- [20] 孙慧珍, 康绍忠, 龚道枝. 测定位点对计算梨树树干液流的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2024-2028.
- [21] Lu P, Müller W J, Chacko E K. 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.
- [22] 唐敏, 赵西宁, 吴普特, 等. 不同地表覆盖对枣树树干液流特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 120-126.
- [23] 孙雨婷. 阿克苏地区枣树茎流变化特征及影响因子研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013.
- [24] 赵付勇, 赵经华, 付秋萍, 等. 不同灌水定额对滴灌条件下核桃树茎流速率的影响[J]. 节水灌溉, 2015, (12): 35-39.
- [25] 冯志文, 姜茂茂, 田玉政, 等. 气象因子对红富士苹果树干茎流特性的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2013, 44(1): 18-24.
- [26] 李宏. 林木井式节水灌溉方法: 中国, ZL2012103148482[P]. 2012.
- [27] 李宏, 郭光华, 郑朝晖, 等. 阿克苏地区红枣盛果期根系空间分布规律研究[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(20): 4963-4967.
- [28] 张志刚, 李宏, 李疆, 等. 地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗过程的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 53-58.
- [29] 张志刚. 滴灌条件下土壤水分运移规律研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013.
- [30] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rainforest and its dependence on climatic factors[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1996, 78(78): 19-29.
- [31] 刘华, 余春燕, 白志强, 等. 不同径级的西伯利亚红松树干液流及蒸腾耗水特征的差异[J]. 西北植物学报, 2016, 36(2): 390-397.
- [32] 胡文涛. 热流计校准装置及其温度控制系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [33] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange ☆[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2001, 107(1): 43-69.
- [34] 王华, 赵平, 蔡锡安, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 225-230.
- [35] 徐世琴, 吉喜斌, 金博文. 典型荒漠植物沙拐枣茎干液流密度动态及其对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 345-353.
- [36] 王文明, 郑德明, 姜益娟, 等. 滴灌条件下枣树耗水规律的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 38-42.
- [37] 李宏, 刘帮, 程平, 等. 不同灌水量下幼龄枣树茎流变化规律[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 23-30.
- [38] 任玉忠, 王水献, 谢蕾, 等. 干旱区不同灌溉方式对枣树水分利用效率和果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 95-102.
- [39] 张建国, 久米朋宣, 大规模一, 等. 黄土高原半干旱区辽东栎的树干液流动态[J]. 林业科学, 2011, 47(4): 63-69.
- [40] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 马占相思林冠层气孔导度对环境驱动因子的响应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1149-1156.