

# 日光温室种植环境对葡萄液流特征的影响

付诗宁,魏新光,郑思宇,孙君,葛东

(沈阳农业大学水利学院,辽宁 沈阳 110866)

**摘要:**为了探究我国东北地区日光温室种植条件下葡萄的液流特性及主要影响因素,对温室主棚(保温)与副棚(无保温措施)葡萄全生育期液流、生长指标及环境指标进行动态监测和系统分析。结果表明:(1)温室主棚与副棚葡萄液流的日内变化呈现单峰或多峰变化趋势,峰值出现在12:00左右,液流基本停止时间为21:00,夜间仍有微弱液流产生。不同月份液流强度不同,8月份液流速率最大,其次为6、10月。(2)全生育期下,主棚内相对液流速率( $SF_R$ )主要受光能驱动的影响,光合有效辐射( $PAR$ )是其主要影响因子,副棚的相对液流速率主要受到光能驱动和气孔导度的综合影响,饱和水汽压亏缺( $VPD$ )和 $PAR$ 均是其主要影响因子。气象因子与 $SF_R$ 响应呈现明显的时间变异性,其中8月份 $SF_R$ 与环境因子的相关性最为密切。(3)主棚的相对液流与影响因子的决定系数均大于副棚,且双因子组合模型预测精度高于单因素。(4)不同种植环境下葡萄的夜间液流有一定的占比,主棚的夜间液流占比略小于副棚的夜间液流占比,随着生育期的推进,葡萄植株夜间液流占比呈现先减小后增大的趋势。

**关键词:**葡萄;液流;环境因子;叶面积指数;日光温室

**中图分类号:**S663.1 **文献标志码:**A

## Effect of planting environment on grapevine sap flow characteristics in solar greenhouse

FU Shining, WEI Xinguang, ZHENG Siyu, SUN Jun, GE Dong

(Institute of Water Resources, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of major influencing factors on the sap flow characteristics of grapevine under different planting environments in solar greenhouse in Northeastern China, dynamic monitoring and systematic analysis were conducted on the sap flow, growth index, and environmental characteristics of grapevine in the main greenhouse (heat preservation) and the secondary greenhouse (no insulation measures) during the whole growth period. The results showed that: (1) Under different planting environments, the daily change of grapevine sap flow presented a trend of single peak or multiple peaks, with the peak appearing at around 12:00, the sap flow basically stopped at 21:00, and there was still a weak flow at night. The sap flow intensity was different in different months, and the sap flow rate was the highest in August, followed by June and October. (2) During the whole growth period,  $PAR$  was the main factor affecting relative sap flow ( $SF_R$ ) in the main greenhouse, and the response degree of  $VPD$  and  $PAR$  to the sap flow rate of the secondary greenhouse was almost the same. The response of  $SF_R$  to environmental factors showed apparent variability over time, and the correlation between  $SF_R$  and environmental factors reached peak in August. (3) The determination coefficients of relative sap flow and influence factors of the main greenhouse were larger than those of the secondary greenhouse, and the prediction accuracy of the two-factor combination model was higher than that of the single factor. (4) There was a certain proportion of grapevine nocturnal flow in different planting environments, and the proportion of nocturnal flow in the main greenhouse was slightly smaller than that in the secondary greenhouse. With the development of growth period, the proportion of nocturnal flow of grapevine presented a trend of decreasing first and then increasing.

收稿日期:2020-04-21

修回日期:2020-05-06

基金项目:国家自然科学基金(51709174)

作者简介:付诗宁(1996-),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论和技术。E-mail: fsning0717@163.com

通信作者:魏新光(1984-),男,山西寿阳人,副教授,主要从事农业节水与水资源高效利用研究。E-mail: weixg\_wi@163.com

**Keywords:** grapevine; sap flow; environmental factors; LAI; solar greenhouse

我国日光温室农业的发展于十九世纪70年代起源于东北地区,近年来发展迅速,温室总面积高达 $2.1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 约占世界温室总面积的42.8%<sup>[1]</sup>。东北地区气候寒冷,昼夜温差大,严寒、冰雹等灾害性天气较为频繁<sup>[2]</sup>,发展设施农业不仅解决了东北地区人民在极端天气条件下种植果蔬的一大难题,还给当地人民带来巨大经济收益<sup>[3]</sup>。同时,东北地区作为中国温室果树栽培的核心分布地区之一,设施果树面积达 $2.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,约占全国的37.5%<sup>[4]</sup>,种植规模居全国首位<sup>[3]</sup>。

作为日光温室种植面积最大、产量最高的辽宁省,传统灌水方式不仅水资源浪费严重,难以达到高产优质的目的<sup>[5]</sup>,还容易引起温室内湿度过高,滋生温室病害。如何提高温室果树的水资源利用效率,是目前温室果树生产亟需解决的问题。而准确把握温室果树的蒸腾规律、耗水特征是提高温室果树灌水效率的基础与前提。目前关于植株蒸腾监测的方法与手段众多,大量学者研究表明蒸渗仪、涡度相关、波文比法等都可以监测葡萄园的耗水量<sup>[6-7]</sup>,上述方法均为微气象学经典方法,但同时又有很多弊端,这些设备通过测定空气中的水汽和 $\text{CO}_2$ 的变化来进一步推测群体的蒸散量,而无法测定植物的单株耗水量,无法准确测定出植株蒸腾和棵间蒸发的比例<sup>[8]</sup>,况且上述设备设计精密,成本较高,适用于下垫面平坦且足够大,风速较小的地区使用。近年来,热技术的方法不断涌现,利用茎流计可直接测定单株耗水量,由于其安装方便,仪器精小,且对环境限制要求较少,因此在植物的蒸腾测定方面应用较为广泛<sup>[9-10]</sup>。

果树的蒸腾受到气象、土壤和自身生长状况的综合影响<sup>[11]</sup>。前人研究表明,在较小尺度上,树体蒸腾主要受到太阳辐射、水汽压亏缺、温度、湿度、风速等气象因子的影响,在较大尺度上,则受到树体自身生长发育的生物学特性、土壤特性及种植年限的影响<sup>[10]</sup>。但大部分研究处于中低纬度,年温差较小的地区<sup>[12-13]</sup>,无法直接应用于东北地区独特的气候条件。在高纬度、高寒地区温室果树液流特征及其与环境互作相关研究还不多见。因此,本文通过分析东北地区日光温室不同种植条件下的葡萄液流特性以及与主要影响因子的耦合机制,为东北寒区日光温室果树的精准、高效灌溉提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2018年4—10月在沈阳农业大学北山科研试验基地44号日光温室内进行( $41.82^\circ \text{N}$ ,  $123.57^\circ \text{E}$ )。温室类型为辽沈Ⅲ型日光节能温室<sup>[14]</sup>,温室大棚主棚采用单面采光抛物面式结构,棚高3.5 m,长60 m,宽9 m。主棚膜采用PVC防老化塑料无滴膜,以防雨棉被作为保温措施,在初春和秋冬季,当夜间温度低于 $15^\circ \text{C}$ 时放下,以保持夜间的室内温度。副棚与主棚相背而建,棚高3.2 m,长60 m,宽8 m,无保温措施。具体布置如图1所示。

供试葡萄品种为‘玫瑰香’( *Vitis vinifera* L. cv. Muscat Hamburg),种植株距为0.5 m。试验地土壤主要是砂壤土,0~60 cm土层土壤基本理化性质:土壤田间持水率为22.3%(质量含水率),容重为 $1.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; pH值为7.0~8.5,有机质含量 $11.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮含量 $0.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷含量 $46.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量 $90.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。灌溉方式采用膜下滴灌,并用灌水上、下限进行控制(60%~80%田间持水量),施肥量为当地推荐施肥量,在每次灌溉之前,将肥料溶解在水中,生育前期施尿素( $288 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),生育后期选用德国康朴特种肥。田间管理措施参考当地设施葡萄生产实际进行。

### 1.2 测定指标

1.2.1 液流测定 在葡萄园任选10株生长良好且树干较为通直的植株进行测定,采用树体包裹式茎流计(Flower32-1K, SGB-9)对全生育期葡萄液流动态进行监测,传感器统一安装在距地面20 cm部位,并用锡箔纸对传感器进行包裹以防其与外界环境发生热交换。用CR1000型数据采集器进行采集,频率为 $10 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ 。包裹式茎流计液流计算公式<sup>[15]</sup>为:

$$F = \frac{Pin - Qr - Qv}{Cp \times dT} \quad (1)$$

式中, $F$ 为茎流瞬时速率( $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ ); $Pin$ 为输入的热量( $\text{W}$ ); $Qr$ 为径向散热( $\text{W}$ ); $Qv$ 为竖向导热( $\text{W}$ ); $Cp$ 为水的比热( $4.186 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ); $dT$ 为竖向2个热电偶电压和的平均值( $^\circ \text{C}$ )。

1.2.2 气象数据 主棚与副棚均布设有小型气象站,测量指标包括:太阳总辐射( $R_s, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )、光合有效辐射( $PAR, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、气温( $T_a, ^\circ \text{C}$ )、相

对湿度( $RH, \%$ )以及实际水汽压( $e, \text{kPa}$ )。测定频率为  $10 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ , 各指标计算值采用各所有传感器监测数值的平均值。饱和水汽压亏缺( $VPD$ )由空气温度( $T_a$ )与相对湿度( $RH$ )计算可得。

$$VPD = 0.611(1 - RH)e^{\frac{1.27 \times T_a}{T_a + 273.8}} \quad (2)$$

1.2.3 叶面积指数测定 在整个生育期内, 主棚与副棚分别随机选择 5 株葡萄, 在每株上分别选取(冠层上部、中上部, 中下部和基部)4 个代表侧枝, 挂牌标记并利用钢尺对代表侧枝的叶面积进行动态测量, 检测时间间隔为 7~10 d, 并以此估算整株、

整个小区的叶面积, 最后根据小区种植面积估算葡萄树的  $LAI$ 。

### 1.3 数据统计与分析

采用 SPSS 19.0 进行数据分析, 并用 Origin 9.1 软件进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 日光温室环境因子变化特征

图 2 为试验期间日光温室主棚与副棚气象因子的逐日变化, 包括: 光合有效辐射( $PAR$ ), 温度( $T_a$ ),

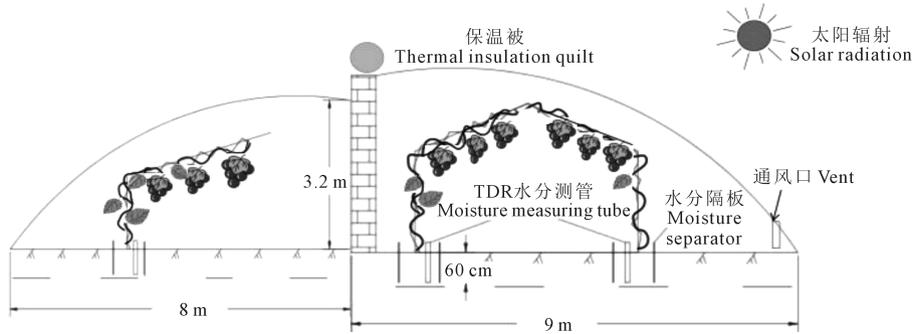


图 1 日光温室主棚、副棚布置

Fig.1 Main and secondary solar greenhouses layout

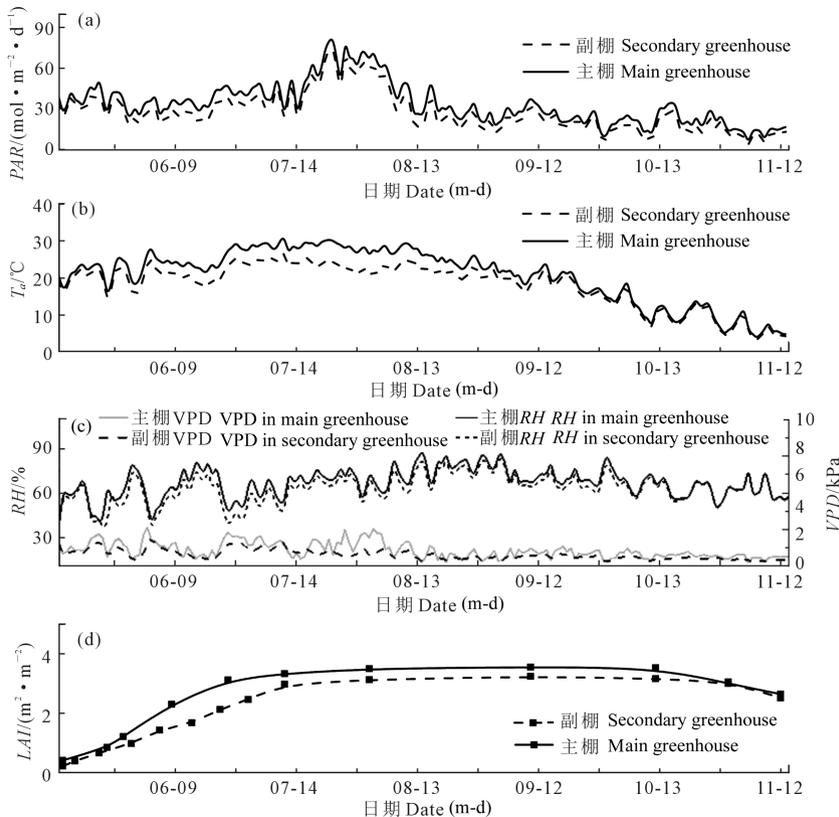


图 2 试验期间气象因子日变化

Fig.2 Diurnal variation of meteorological factors during the experiment

饱和水汽压亏缺( $VPD$ )、空气湿度( $RH$ )及叶面积指数( $LAI$ )。从图中可以看出,日光温室主棚与副棚内的环境因子 $PAR$ 、 $T_a$ 整体呈相同的变化趋势,即生育中期(7—8月)数值最大,出现峰值,生育初期(4—6月)和生育末期(9—10月)数值较低。通过主棚与副棚环境因子的对比发现,日光温室主棚内的光合有效辐射平均高于副棚18.1%,温度高于副棚14.1%、湿度低于副棚6.2%。整个生育期主棚与副棚的饱和水汽压亏缺在相对稳定的变化范围内波动,波动范围分别为0.17~2.12、0.15~1.65 kPa。图2d显示了主棚与副棚全生育期葡萄的叶面积指数( $LAI$ )动态变化情况,主棚7月前,副棚7月中旬前,为叶面积指数快速增长阶段,此时,叶片增长迅速,叶面积指数呈线性增长,直到8月份,叶片增长基本停止,主棚基本稳定在 $3.5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ,副棚基本稳定在 $3.1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 。到达10月中旬以后,随着叶片老化与自然脱落,此时,叶面积指数呈现下降趋势。

## 2.2 日光温室种植环境下葡萄相对液流

前期大量研究结果表明,葡萄液流的变化受到环境微气象和自身生长发育状况的综合影响,为了消除叶面积指数变化对葡萄液流造成的影响,本研究对葡萄的液流速率进行了标准化,并采用公式(3)计算树体相对液流量 $SF_R(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$ :

$$SF_R = \frac{SF}{LAI} \quad (3)$$

图3对比了不同生育期典型日树干液流( $SF$ )与相对液流( $SF_R$ )的日变化。分别选取日光温室内葡萄树的3个生育期的典型日(晴天)进行对比。由于图3中选取的为 $LAI$ 有差异性的3个典型晴天,因此导致了树干液流的差异性也较大,说明此时树干液流主要受到生理指标与环境因子的共同影响。因此用叶面积指数进行标准化之后, $SF_R$ 值差异明显减小,而且能够充分展现 $SF$ 的日动态变化规律,可见为了探明气象因子对葡萄植株耗水的影响,采用 $SF_R$ 研究葡萄的液流变化特征及其对环境

因子的响应是合理的。

2.2.1 典型天气葡萄相对液流与环境因子日变化 图4主要选取了葡萄生长最旺盛的阶段,8月选取典型日晴天( $PAR > 20 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )、阴雨天( $PAR < 20 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )对葡萄的相对液流速率与主要环境因子( $PAR$ 和 $VPD$ )的日变化过程进行分析。不同种植环境下葡萄的 $SF_R$ 、 $PAR$ 及 $VPD$ 在日内小时尺度的均值呈现低-高-低的变化趋势, $SF_R$ 和 $PAR$ 呈单峰或多峰变化。表1反映了不同生育阶段相对液流典型日变化规律,结合图4发现液流的启动时间大约在05:00—06:00,随后,液流呈显著上升状态,在12:00左右到达峰值,到达峰值后,液流会持续波动一段时间,随着温室内环境因子的变化, $PAR$ 逐渐减弱。温室内的气温逐步下降,液流速率也随之下降,在21:00左右,液流逐步趋于0,但夜间仍有微弱的液流,这种现象是液流的“根压”吸水造成的,为补充白天蒸腾作用所散失的水分,以维持体内的水分平衡<sup>[16]</sup>。

为进一步分析三者的相关关系,本文选择了3个重要的时间节点,分别是液流启动时间、到达峰值时间和液流近乎停止时间进行对比分析<sup>[17]</sup>。对比表1结果可知,主棚液流启动时间比副棚提前30 min左右,10月份液流启动时间最晚。由图4分析发现主棚的 $PAR$ 启动时间大约在05:30,副棚 $PAR$ 的启动时间大约在06:00,主棚 $PAR$ 提前 $SF_R$  1 h左右,而副棚晴天此现象并不明显,在阴雨天,副棚中的液流时滞现象更加明显。而 $PAR$ 到达峰值时间滞后于液流峰值30 min~1 h,在液流下降及近乎停止阶段 $PAR$ 提前于液流或保持同步,这种现象可以解释为作物本身水分调节所形成的一种生理保护机制。 $VPD$ 总体表现为滞后于 $SF_R$ 。由图4可以看出小时尺度上 $SF_R$ 与 $PAR$ 和 $VPD$ 有显著的相关性,晴天和阴雨天的变化明显,对比主棚与副棚晴天和阴雨天, $PAR$ 和 $SF_R$ 阴雨天分别降为晴天的33.3%和39.7%、77.9%和59.9%。

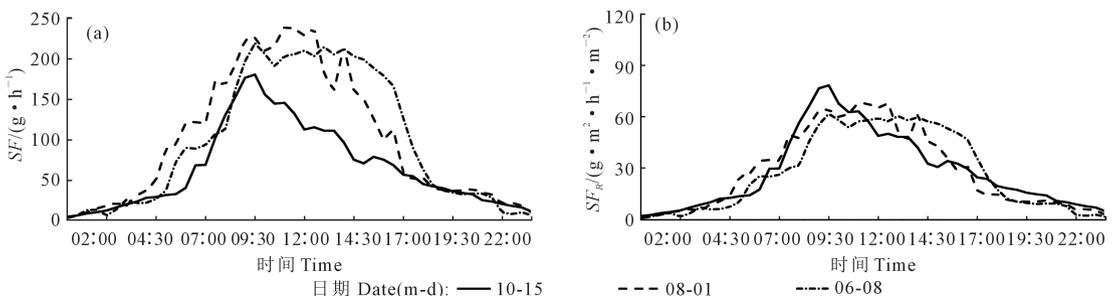


图3 各生育期典型日树干液流( $SF$ )和相对液流( $SF_R$ )的日动态

Fig.3 Diurnal dynamics of typical daily sap flow ( $SF$ ) and relative sap flow ( $SF_R$ ) in each growth period

2.2.2 日尺度下葡萄相对液流与主要环境因子的关系 为了进一步分析葡萄相对液流速率与其主要影响因子 ( $PAR$ 、 $VPD$ 、 $T_a$ ) 之间的关系, 本文选取生育初期、生育中期以及生育末期的典型月份 (6、8、10 月份), 对液流与  $PAR$ 、 $VPD$ 、 $T_a$  数据进行回归分析, 如图 5 所示。由分析结果可知, 相同的气象因子在不同月份下具有差异性, 整个生育期内,  $SF_R$  与  $PAR$ 、 $VPD$ 、 $T_a$  均呈现良好的正相关关系。纵观整个生育期, 在主棚内,  $PAR$  的决定系数随着生育期的推进呈现先增大后减小的趋势, 其决定系数在 0.36~0.78 范围内波动, 在 8 月  $PAR$  与主棚  $SF_R$  的相关性最为显著 ( $R^2=0.78$ ,  $P<0.01$ ), 在 10 月份,  $VPD$  成为了影响液流的主要气象因子 ( $R^2=0.49$ ,  $P<0.01$ )。在副棚的种植环境下,  $PAR$  和  $VPD$  均随着生育期推

进, 决定系数变化规律为先增大后减小, 即 8 月份两因子的相关性最为显著。6 月和 8 月  $VPD$  是影响副棚  $SF_R$  的最主要气象因子, 其决定系数在 0.39~0.75 范围内波动。10 月份  $VPD$  对副棚液流影响小于  $PAR$ 。温度在整个生育期内对于液流速率的影响在 8 月份表现最为显著 ( $R^2=0.34$ ,  $P<0.01$ )。

依据上述分析结果可知,  $PAR$  和  $VPD$  为影响相对液流的最主要气象因子, 为了进一步综合考虑两因子对  $SF_R$  的影响, 基于全生育期 (6、8、9、10 月) 日尺度下液流数据, 建立了基于  $PAR$ 、 $VPD$  两个单一气象因子的一元二次回归模型, 并进行了相关分析, 以及双因子回归模型与两个单因子模型的拟合精度进行比较, 结果如表 2 所示。由表可知, 综合全生育期, 主棚与副棚的液流速率均与气象因子  $PAR$

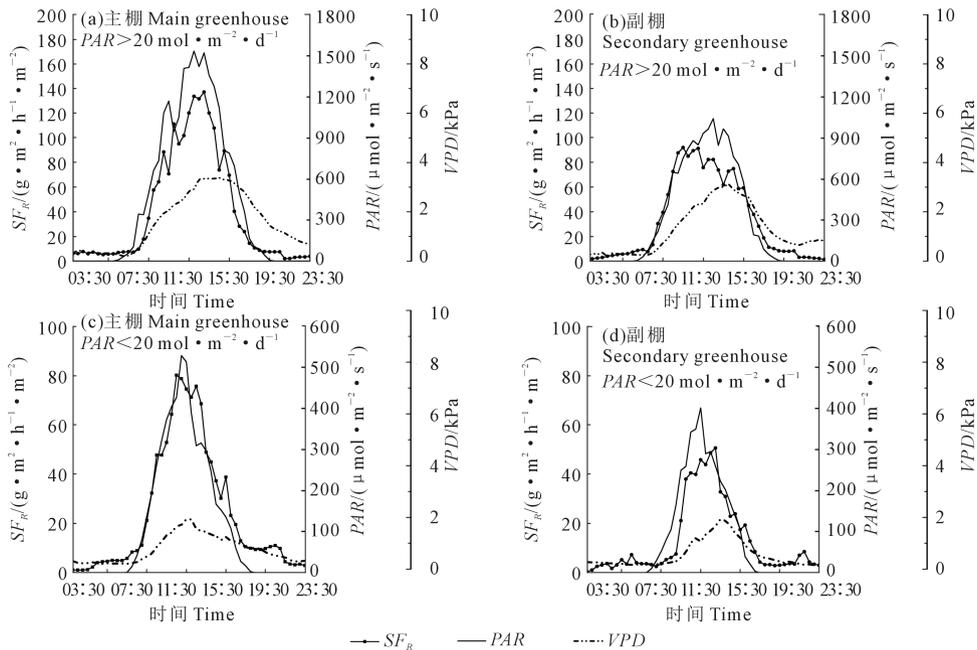


图 4 典型天气葡萄相对液流及环境因子日变化

Fig.4 Diurnal variation of relative sap flow and environmental factors in typical weather of grapevine

表 1 全生育期典型日葡萄相对液流动态变化规律

Table 1 The typical diurnal dynamic change of grapevine relative sap flow rate in the whole growth period

温室类型 Greenhouse type	观测日期 Date (Y-m-d)	环境因子日均值 Daily mean of environmental factors				液流启动时间 Sap flow start time	液流到达峰值时间 Sap flow peak value time	液流近乎停止时间 Sap flow basically stop time
		$PAR$ /( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$VPD/\text{kPa}$	$T_a/^\circ\text{C}$	$RH/\%$			
主棚 Main greenhouse	2018-06-18	36.51±1.23a	0.87±0.08a	24.22±3.45a	68.92±7.44ab	05:30	11:30	21:00
	2018-08-21	34.19±2.19a	0.69±0.07bc	25.49±1.23a	76.09±6.9a	05:30	12:00	21:00
	2018-10-07	21.67±1.74cd	0.79±0.12ab	12.71±1.78c	56.47±7.1c	07:00	14:00	21:00
副棚 Secondary greenhouse	2018-06-18	27.76±3.68bc	0.63±0.15cd	20.25±2.15b	60.22±7.69bc	06:30	12:00	20:30
	2018-08-21	28.74±2.48ab	0.55±0.09d	22.62±2.15ab	72.34±8.98a	06:00	12:30	21:00
	2018-10-07	15.95±1.36d	0.55±0.14d	11.85±1.48c	54.47±6.28c	08:00	14:00	20:00

注: 数据为平均值±标准差。同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: Data are mean ± standard deviation. Different letters within the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ ). The same below.

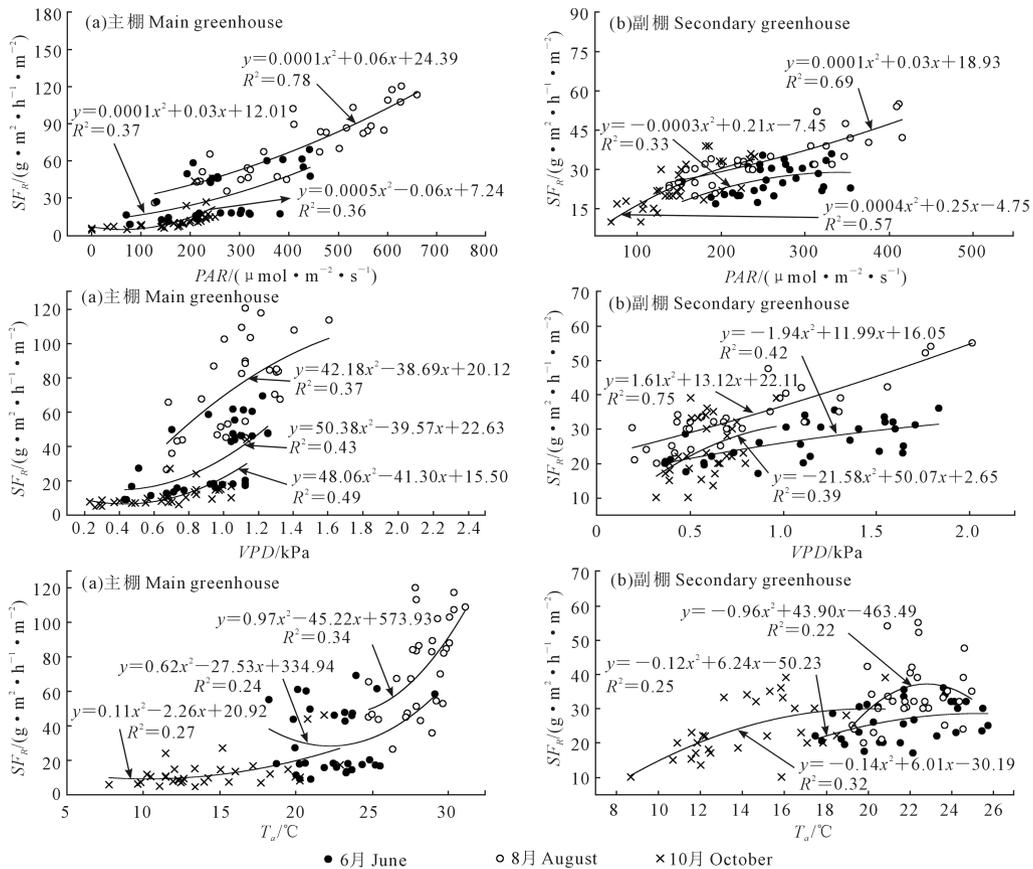


图5 日尺度下葡萄相对液流和环境因子的关系

Fig.5 The relationship between grapevine relative sap flow and environmental factors in daily scale

表2 全生育期日尺度葡萄相对液流与环境因子回归模型

Table 2 Regression model of daily scale relative sap flow rate and environmental factors in grapevine growth period

模型类型 Model type	主棚 Main greenhouse			副棚 Secondary greenhouse		
	回归模型 Regression model	$R^2$	$P$	回归模型 Regression model	$R^2$	$P$
单因子 Single factor	$SF_R = 0.0002PAR^2 + 0.07PAR + 1.27$	0.80	**	$SF_R = 6.0 \times 10^{-5}PAR^2 + 0.05PAR + 14.32$	0.47	**
	$SF_R = -0.001VPD^2 + 0.31VPD + 13.24$	0.63	**	$SF_R = -0.001VPD^2 + 0.55VPD + 14.29$	0.48	**
多因子 Multifactor	$SF_R = 0.30PAR + 41.63VPD + 24.01$	0.83	**	$SF_R = 0.25PAR + 21.96VPD + 10.26$	0.57	**

注: \*\* : 在 0.01 级别(双尾)相关性极显著。

Note: \*\* : The correlation was highly significant at the level of 0.01.

和 VPD 呈现极显著的正相关关系。影响主棚液流的最主要气象因子为 PAR ( $R^2 = 0.80, P < 0.01$ ), 其次为 VPD ( $R^2 = 0.63, P < 0.01$ ), 对于副棚而言, 两因子对液流影响作用基本相同 ( $R^2 = 0.47, 0.48$ )。但是对比主棚与副棚两环境因子的相关性发现, 副棚环境因子对液流的影响弱于主棚。此外, 双因子回归模型的决定系数 ( $R^2 = 0.83, 0.57$ ) 优于单因子回归模型的决定系数。

### 2.3 日光温室种植环境下葡萄相对液流昼夜占比

前期在对葡萄日内液流的监测中发现, 液流相对停止时间在 21:00 左右, 此时液流数值较低, 接近于 0, 但尚未达到 0, 说明夜间仍有微弱的液流产生<sup>[18]</sup>。为了了解日光温室主棚与副棚昼夜相对液流的占比情况, 本试验将日内光合有效辐射瞬时值

小于  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的时间段内的葡萄液流定义为夜间液流, 不同生长期的晴天的昼、夜间液流划分如表 3 所示。将不同生育期典型日(晴天)的夜间液流量和白天液流量分别进行统计, 结果如表 4 所示。从表 4 可以看出, 相对液流的夜间占比随着生育期推进, 呈现先减少后增大的规律, 生育末期占比达到最大值。主棚与副棚的单日相对液流量 7 月 > 8 月 > 6 月 > 9 月 > 10 月, 且主棚的单日相对液流总量大于副棚。主棚与副棚夜间占比情况 10 月 > 9 月 > 6 月 > 7 月 > 8 月, 且主棚的夜间占比略微小于副棚, 两棚最大的夜间占比高达 12.63%, 出现在副棚 10 月。由此可见, 在生育末期液流的夜间占比是相当大的, 说明此阶段果树的耗水较为严重。

表 3 晴天昼夜时间划分

Table 3 Day and night time table

日期 Date(m-d)	白昼 Day time	夜晚 Night time
06-02	06:00—18:00	18:00—次日 06:00 18:00—next day 06:00
07-17	05:30—18:00	18:00—次日 05:30 18:00—next day 05:30
08-18	06:00—18:00	18:00—次日 06:00 18:00—next day 06:00
09-10	07:00—17:30	17:30—次日 07:00 17:30—next day 07:00
10-05	07:30—16:00	16:00—次日 07:30 16:00—next day 07:30

表 4 晴天主棚与副棚昼夜葡萄相对液流量及占比

Table 4 Day and night relative sap flow and ratio of main greenhouse and secondary greenhouse on sunny days

日期 Date (m-d)	夜间液流量/g(占比,%) Nocturnal sap flow (Ratio,%)		白天液流量/g(占比,%) Diurnal sap flow (Ratio,%)		单日相对液流总量/g(占比,%) Total relative sap flow in a single day (Ratio,%)	
	主棚 Main greenhouse	副棚 Secondary greenhouse	主棚 Main greenhouse	副棚 Secondary greenhouse	主棚 Main greenhouse	副棚 Secondary greenhouse
06-02	48.06±2.63c (3.69)	58.13±6.15c (5.69)	1254.31±142.25a (96.31)	963.52±56.25ab (94.31)	1302.37±96.15abc (100)	1021.65±66.39a (100)
07-17	44.07±5.58c (3.12)	55.10±4.15c (5.32)	1368.56±265.15b (96.88)	980.59±84.51a (94.68)	1412.63±98.55a (100)	1035.69±74.11a (100)
08-18	47.46±7.48c (3.04)	46.59±3.25d (4.48)	1348.28±177.96a (96.96)	993.26±74.55a (95.52)	1395.74±102.25ab (100)	1039.85±69.45a (100)
09-10	108.29±10.48b (8.47)	102.64±10.35b (10.26)	1170.25±125.47bc (91.53)	897.77±57.51bc (89.74)	1278.54±85.31bc (100)	1000.41±77.25a (100)
10-05	132.75±15.15a (10.64)	124.49±12.15a (12.63)	1114.88±188.69c (89.36)	861.14±47.11c (87.37)	1247.63±47.15c (100)	985.63±56.65a (100)

提出该指标是液流经过叶面积的标准化结果,在很大程度上消除了叶面积的影响。

在液流与环境因子的相关分析中,大量研究结果表明,不同环境因子对液流的影响存在明显的差异<sup>[21]</sup>。本文分析得到主棚影响葡萄液流的主要气象因子为 *PAR*,副棚为 *VPD*,在生育中期(8月)液流和气象因子的相关性最好,6、10月液流与气象因子相关性近乎相同。不同种植环境产生差异的原因主要是由于副棚内光合有效辐射较低,无法达到对液流的驱动作用,此时,气孔导度即为主要影响因素,而主棚受到太阳辐射较为剧烈,液流速度的变化主要受到光能驱动作用影响<sup>[22]</sup>,这也体现了温室环境独有的特点。这与李波等<sup>[16]</sup>研究结果一致,与杜太生等<sup>[23]</sup>、郑睿等<sup>[24]</sup>研究结果不一致。杜太生等<sup>[23]</sup>对中国西北干旱荒漠绿洲区葡萄液流变化与响应因子的研究得出影响液流的主要气象因子为温度和风速。郑睿等<sup>[24]</sup>认为在阴天条件下,影响液流的主要因子是相对湿度。这可能是由于不同植物间自身特性差异以及对外界环境因子的响应程度不同造成的。在日光温室种植的条件下,其气候条件更为复杂,温室内保温、增温效果显著,导致白天升温迅速,且下降缓慢,储温效果较好。此外,温

### 3 讨论

种植条件、生长环境以及水肥与园艺管理等措施的差异,均会对葡萄的液流过程造成显著影响<sup>[19]</sup>。前人大量研究发现影响液流速度的主要因子有生理指标(*LAI*)及环境因子(*PAR*、*VPD*、*T<sub>a</sub>*、*RH*)<sup>[10,13]</sup>。因此,本文在分析不同种植环境对葡萄液流的影响时,将液流速率标准化,得到相对液流速率,此观点与 Liu 等<sup>[20]</sup>、陈滇豫<sup>[13]</sup>的观点一致。Liu 等对苹果树以及陈滇豫在对枣树的研究时,将液流速率与叶面积的比值定义为相对液流速率,并

室种植条件下,空气难以形成对流,风速一般忽略不计。这与我国西北地区干旱气温较低、风速较大形成鲜明的对比,因此导致以上结论和本文不同。

植物夜间液流的产生不仅有利于树木补充白天所散失的水分以达到体内的水分平衡<sup>[25]</sup>,还有助于驱动根系与植物体向上进行物质运输<sup>[26]</sup>。本试验结果显示,葡萄的液流基本停止时间在 21:00 左右,不同生育期夜间液流占比在 3.04%~12.63%,Ford 等<sup>[27]</sup>同样观察到此现象,得出夜间液流主要是由“根压”现象引起的。夜间茎流可能是水流由根部上升至枝叶部分存储,为下一阶段的生长做准备<sup>[28]</sup>。且本试验中,不同种植环境的液流启动时间及到达峰值时间会略有差异,而液流近乎停止时间差异性并不大,这与于萌萌等<sup>[29]</sup>的研究不同,于萌萌等对长白山阔叶红松林 3 种主要树种的树干液流速率研究发现,相同天气条件下,液流启动时间和到达峰值时间相同,但停止时间不同,与本文产生差异的原因主要是由于温室环境的特异性产生的,温室内保温性强,夜晚温度下降的缓慢,但长白山地区昼夜温差大,夜间温度急剧下降,因此与长白山地区环境差异较大,导致液流近乎停止时间产生差异。

## 4 结 论

本文以东北寒区日光温室葡萄为研究对象,采用包裹式茎流计、小型气象站等仪器测定了日光温室主棚与副棚葡萄液流及环境因子的变化,研究了不同尺度树干相对液流与环境因子之间错综复杂的关系,揭示了东北寒区日光温室种植环境对葡萄液流的影响,得到结论如下:

1) 试验期间温室主棚与副棚的环境因子  $PAR$ 、 $T_a$  整体呈低-高-低的变化趋势,主棚的  $PAR$ 、 $T_a$ 、 $VPD$  分别高于副棚 18.1%、14.1% 和 5.2%,  $RH$  低于副棚 6.2%。 $LAI$  在全生育期内的变化规律为先快速增长,随后长时间保持稳定,生育后期呈下降趋势。

2) 不同时间尺度上葡萄相对液流与环境因子均有显著的相关性。影响主棚与副棚葡萄液流的最主要环境因子为  $PAR$  和  $VPD$ ,  $T_a$  对主棚与副棚葡萄液流的影响并不显著。8月主棚  $PAR$  与相对液流的相关性最为密切 ( $R^2=0.78$ ), 副棚  $VPD$  与相对液流的相关性最为密切 ( $R^2=0.75$ )。6月与10月影响因子的响应程度大小无规律。

3) 从葡萄全生育期来看,影响主棚葡萄的液流最主要因子为  $PAR$ , 主要受到光能驱动作用影响,而副棚葡萄的液流受到光能驱动和冠层导度的共同作用。对比不同种植环境下葡萄液流速率对环境因子的响应程度,副棚影响因子 ( $PAR$ 、 $VPD$ ) 对液流的影响程度均弱于主棚。

4) 不同种植环境下夜间液流均占有一定的比例,主棚夜间相对液流占比较副棚略小。葡萄的相对液流夜间占比随着生育期的推进均呈现先减小后增大的趋势,8月夜间液流占比较其他月份小,全生育期夜间液流占比平均副棚高于主棚 2.45%。

### 参 考 文 献:

[1] 宣景宏,郭修武. 辽宁省葡萄产业发展现状及对策[J]. 中国果业信息, 2015, 22(11): 1-3.

[2] 何学敏,刘笑,殷红,等. 1986~2015年中国东北地区主要农业气象灾害变化特征[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(4): 392-398.

[3] 高圣华,吕春晶. 葡萄避雨设施栽培在辽宁省的应用初探[J]. 北方园艺, 2018, (12): 206-208.

[4] 高东升. 中国设施果树栽培的现状与发展趋势[J]. 落叶果树, 2016, (1): 1-4.

[5] 康绍忠. 农业水土工程学科路在何方[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 1-8.

[6] 丁日升,康绍忠,龚道枝. 苹果树液流变化规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 21-25.

[7] 张建国. 黄土丘陵区两典型森林群落蒸腾耗水特性研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.

[8] 王月月. 农田蒸散的测定与分解: 茎流计和热脉冲传感器的应

用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

[9] 马长健,刘馨惠,卞城月,等. 热平衡式茎流计在测定植物蒸腾耗水中的应用进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(32): 241-245.

[10] 魏新光,陈滇豫,汪星,等. 山地枣林蒸腾主要影响因子的时间尺度效应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 149-156.

[11] 龚道枝,胡笑涛,张富仓,等. 不同水分状况下桃树根茎液流变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 34-38.

[12] 王慧梅,孙伟,祖元刚,等. 不同环境因子对兴安落叶松树干液流的时滞效应复杂性及其综合影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3109-3116.

[13] 陈滇豫. 黄土高原雨养枣园耗水规律及修剪调控研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.

[14] 李天来. 我国设施蔬菜科技与产业发展现状及趋势[J]. 中国农村科技, 2016, (5): 75-77.

[15] Shackel K A, Johnson R S, Medawar C K, et al. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1992, 117(2): 351-356.

[16] 李波,郑思宇,魏新光,等. 东北寒区日光温室葡萄液流特征及其主要环境影响因子研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 185-193.

[17] 张彦群. 西北旱区葡萄园液流时空动态及影响因子[C]// 现代节水高效农业与生态灌区建设(上). 北京: 中国农业工程学会, 2010: 137-145.

[18] 钟海霞,张付春,潘明启,等. 不同灌水量对赤霞珠葡萄光合作用的影响[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(3): 492-497.

[19] 王尚涛. 干旱绿洲区农田葡萄树蒸散耗水及水分利用策略研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.

[20] Liu C W, Du T S, Li F S, 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 Management, 2012, 104(1): 193-202.

[21] 徐璐,李平衡,赵鑫,等. 2种典型荒漠植物多尺度蒸腾日变化特征及其尺度转换研究[J]. 石河子大学学报, 2014, 32(1): 79-85.

[22] 黄辉,孟平,张劲松,等. 华北低丘山地人工林蒸散的控制因子[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 667-673.

[23] 杜太生,康绍忠,张宝忠,等. 石羊河流域干旱荒漠绿洲区不同滴灌模式下葡萄茎液流变化及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 299-305.

[24] 郑睿,康绍忠,佟玲,等. 不同天气条件下荒漠绿洲区酿酒葡萄植株耗水规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 99-107.

[25] Daley M J, Phillips N G. Interspecific variation in night-time transpiration and stomatal conductance in a mixed new England deciduous forest[J]. Tree Physiology, 2006, 26: 411-419.

[26] McDonald P, Erickson J E, Kruger E L. Can decreased transpiration limit plant nitrogen acquisition in elevated  $CO_2$ ? [J]. Functional Plant Biology, 2002, 29: 1115-1120.

[27] Ford C R, Goranson C E, Mitchell R J, et al. Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: Predicting total stem flow in Pinustaeda trees[J]. Tree Physiology, 2004, 24(9): 951-960.

[28] 王华,赵平,王权,等. 马占相思夜间树干液流特征和水分补充现象的分析[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 476-482.

[29] 于萌萌,张新建,袁凤辉,等. 长白山阔叶红松林三种树种树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1707-1714.