

白岩,朱高峰,张琨,等. 敦煌葡萄液流特征及耗水分析[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 0175—0181. [Bai Yan, Zhu Gaofeng, Zhang Kun, et al. Analysis of variation of sap flow velocity and water consumption of grapevine in the Nanhu oasis, Dunhuang, China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 0175—0181.]. doi:10. 7522/j. issn. 1000-694X. 2013. 00457.

# 敦煌葡萄液流特征及耗水分析

白岩, 朱高峰, 张琨, 马婷

(兰州大学 西部环境教育部重点实验室 干旱环境与气候变化协同创新中心, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 基于热平衡原理, 运用 FLOW32 包裹式植物茎流计对甘肃敦煌南湖地区无核白葡萄液流速率进行长期连续观测, 并对多个气象因子开展同步测定, 分析探讨不同天气条件下葡萄液流速率及气象因子的日变化特征, 进行了液流速率与各气象因子的回归分析, 建立了液流速率的多元曲线回归模型, 分析了葡萄树的耗水规律。结果表明: 在不同天气条件下无核白葡萄树液流速率日变化差异显著, 日均液流速率晴天>阴天>雨天; 液流速率与光合有效辐射、水汽压亏缺呈线性相关, 与冠层温度、冠层相对湿度呈曲线相关, 相关程度大小顺序为光合有效辐射>水汽压亏缺>冠层温度>冠层相对湿度; 建立液流速率的多元曲线回归模型, 为研究葡萄树潜在耗水能力提供了预测手段; 对比分析了无核白葡萄树的耗水量, 为当地农业灌溉及种植等提供了合理化建议。

**关键词:** 树干液流; 热平衡法; 蒸腾耗水; 回归分析

文章编号: 1000-694X(2015)01-0175-07

doi: 10. 7522/j. issn. 1000-694X. 2013. 00457

中图分类号: Q945. 79

文献标志码: A

## 1 引言

无核白葡萄属欧亚种、东方品种群, 是一个鲜食、制干兼用的优良葡萄品种, 适合生长在高温、干旱、生长期较长的地区, 因而仅在中国新疆吐鲁番、甘肃敦煌、内蒙古乌海等地有栽培。无核白葡萄正常生长、结果需要的条件为: 年均气温度高、无霜期长, 年光照时间 3 000 h 以上, 活动积温 3 500 °C 以上, 气温年平均日较差 12 °C 以上, 花期最高温度 25 °C, 降水量少, 有良好灌溉条件, 空气干燥, 相对湿度在 45% 以下<sup>[1]</sup>。

蒸腾是植物失水的主要方式, 树木蒸腾耗水 99. 8% 以上来自树干液流<sup>[2]</sup>。因而, 通过精确测算液流速度<sup>[3]</sup>及液流累积量, 可以基本确定植物蒸腾耗水量。影响液流速率的因素主要包括生物学结构、土壤供水条件及气象因子等, 生物学结构决定液流的潜在流量, 土壤供水条件决定液流的总体水平, 而气象因子决定液流的瞬间变动<sup>[4]</sup>。全面分析植物液流速率的主要影响因子, 有利于准确掌握单株植物蒸腾耗水规律, 进而准确估算出植物林分蒸腾耗水量<sup>[5-6]</sup>。目前, 热技术在测定植物蒸腾耗水方面

的应用已经日趋成熟<sup>[7]</sup>, 应用热技术测定植物蒸腾耗水可系统掌握林地耗水规律及水分运移机制, 从而指导农业生产活动及生态环境建设<sup>[8-10]</sup>。

作为甘肃敦煌南湖地区单一的经济作物, 无核白葡萄在为当地农民带来经济效益的同时, 也是当地生态环境建设的关键所在。如何完整、准确地测定和掌握单株葡萄的水分利用量, 进而扩展得到葡萄冠层尺度的蒸腾耗水量<sup>[11]</sup>, 根据其耗水特性合理安排灌溉, 以期进一步提高水分利用效率<sup>[12]</sup>, 能够为建设节水农业, 为当地作物生产、生态保持提供理论依据和技术指导, 对西北干旱区的农业生产意义重大。

## 2 研究区概况

研究区位于甘肃省敦煌市西南 70 km 的南湖乡境内, 东临库姆塔格沙漠, 地理位置 39°51'—39°55'N、94°06'—94°09'E, 总面积 11. 06 km<sup>2</sup>; 区内地势平坦, 海拔 1 100~1 297 m, 有湿地、湖泊、荒漠、戈壁、草甸等多重景观; 气候属暖温带干旱性气候, 日较差大, 年均日较差 16~20 °C, 年平均温度 9. 3 °C, 全年降水稀少, 年均降水量 36. 9 mm, 平均无霜

收稿日期: 2013-11-25; 改回日期: 2013-12-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(31370467); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0219); 中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2013-m02)

作者简介: 白岩(1987—), 男, 甘肃靖远人, 硕士研究生, 主要从事干旱区生态—水文过程研究。Email: baiy13@lzu. edu. cn

通讯作者: 朱高峰>Email: zhugf@lzu. edu. cn

期 145 d,  $\geq 0^\circ\text{C}$  活动积温为 4 073  $^\circ\text{C}$ , 年日照时数为 3 115~3 247 h, 年总辐射量 5 903.4~6 309.5  $\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 土壤类型为隐域性土壤, 主要有沼泽土、草甸土和盐渍土等<sup>[13]</sup>。研究区内有较大面积的湿地分布, 其水源来自党河河床的渗漏补给。党河源自祁连山北麓西段, 全长约 390 km, 沿途大段穿越洪积砾石戈壁, 河水大量渗漏, 部分潜流在南湖盆地边缘出露汇成溪流, 在沙漠之中形成一块丰腴的小绿洲——南湖绿洲<sup>[14]</sup>。

核心研究区 (800 m  $\times$  170 m) 位于敦煌南湖绿洲西南部, 在核心研究区内选择一块 52 m  $\times$  34 m 固定样地开展无核白葡萄树液流速率测定试验。南湖盆地边缘由于潜流出露形成溪流, 为该地区提供了稳定的灌溉水源, 区内葡萄地平均每 20 d 进行一次人工漫灌, 土壤水分含量一般不发生亏缺, 属于充分供水条件。无核白葡萄树生长季长约 140 d 左右, 每年 5 月初发芽, 5 月底开花, 9 月初果实成熟。

### 3 试验材料与方法

#### 3.1 试验材料

根据包裹式植物茎流计 (FLOW32, Dynamax, 美国) 对胸径大小的安装要求以及被测植株具有代表性的原则, 在样地中选择生长良好、树干较为通直、无被挤压的 8 棵葡萄作为试验对象, 并从 8 棵样株中选取 2 棵具有平均胸径大小、数据质量良好的进行分析, 具体参数见表 1。

表 1 观测样树基本情况

Table 1 General conditions of the sample trees

树号	树高 /m	胸径 /cm	胸周 /cm	胸高全横截 面积/ $\text{cm}^2$
1	4.5	3.3	10.5	8.8
2	4.6	3.2	10.0	8.0

#### 3.2 试验方法

##### 3.2.1 液流速率和环境因子的测定

在灌溉水位以上、树干通直、无挤压无伤疤的葡萄主干上安装包裹式茎流计, 数据采集间隔为 30 min, 液流观测时间为 2013 年 7 月 12 日至 10 月 26 日。样地内安装有自动气象站 (Campbell, 美国), 用以采集空气温湿度、辐射强度、风速风向、降雨量等气象因子数据, 数据采集间隔为 30 min。此外, 水汽压亏缺 (VPD, kPa) 由冠层温度和冠层相对湿度

经下式求出:

$$VPD = ae^{(bCT/CT+c)} (1 - CRH) \quad (1)$$

式中:  $CRH$  为冠层相对湿度 (%);  $CT$  为冠层温度 ( $^\circ\text{C}$ ); 常数  $a = 0.611 \text{ kPa}$ ,  $b = 17.27 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $c = 237.3 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[15]</sup>。

##### 3.2.2 液流速率的计算方法

液流速率  $F$  根据茎热平衡原理<sup>[16]</sup> 经下式求出:

$$F = (P_{in} - Q_r - Q_v) / (C_p dT) \quad (2)$$

式中:  $P_{in}$  为热量输入 ( $\text{W}$ );  $Q_r$  为径向散热 ( $\text{W}$ );  $Q_v$  为竖向导热 ( $\text{W}$ );  $C_p$  为水的比热 ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ );  $dT$  为竖向两热电偶电压和的平均值 ( $^\circ\text{C}$ );  $F$  为茎流速率 ( $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ )。其中  $Q_r$ 、 $Q_v$ 、 $dT$  都可以通过传感器测得并经过自动计算得出, 然后在数据采集程序中输入胸径横截面积、胸径类型参数, 可直接输出液流速率的结果。

##### 3.2.3 天气条件的划分标准

气象学上根据云量来划分天气状况, 很多试验也根据辐射状况, 结合气象站资料对天气状况进行区分。因此, 结合当地实际观测情况, 统计不同天气条件下差别显著的气象资料, 包括白天 10 h (08:00—18:00) 的平均光合有效辐射、平均水汽压亏缺、冠层平均相对湿度, 分析不同天气条件下各数据所处的大致范围, 对符合条件的日期按照以下标准进行了筛选 (表 2)。其中, 晴天和阴天为随机筛选, 雨天由于当地气候干旱, 降雨稀少, 观测期间仅监测到两次符合条件的降雨事件, 降雨量分别为 2.3 mm 和 3.5 mm。

表 2 天气条件的划分标准

Table 2 The classification standard of weather conditions

	平均光合有效 辐射/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	平均水汽 压亏缺 /kPa	平均冠层 相对湿度 /%	符合条件 的日期 (月-日)
晴天	$\geq 1000$	$\geq 2$	$< 40$	07-21, 08-02, 08-10
阴天	$\geq 500, < 1000$	$\geq 1, < 2$	$\geq 40, < 60$	07-23, 08-16, 08-18
雨天	$< 500$	$< 1$	$\geq 60$	07-25, 08-26

##### 3.2.4 数据处理

不同天气下葡萄液流速率及气象因子的日变化对比采用方差分析法。葡萄液流速率与气象因子的相关关系采用偏相关分析及一元回归分析方法。葡萄液流速率的预测模型采用多元曲线回归方法, 以葡萄液流速率为因变量, 光合有效辐射、冠层相对湿度和冠层温度 3 个主要气象因子为自变量。数据统计分析及绘图软件分别使用 SPSS 21 软件及 Matlab 软件。

## 4 结果与分析

### 4.1 典型天气下液流速率及气象因子的日变化

不同天气条件下无核白葡萄树液流速率日变化规律差异显著,液流速率晴天>阴天>雨天(图 1)。液流速率与光合有效辐射、水汽压亏缺、冠层温度的日变化曲线峰形较为一致,而与冠层相对湿度的日变化曲线峰形相反。液流速率与以上 4 个气象因子均呈现出良好的生态学相关性。

晴天液流速率日变化曲线为典型的宽峰型,液流启动时间在 09:00 左右,14:00 前后到达峰值,峰值附近伴有小幅波动,18:00 之后开始急剧下降,21:00 左右到达最低水平,日均液流速率为  $245.7 \pm 16.5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。阴天受气象因子波动的影响,液流日变化曲线出现两个较低峰值,液流于 10:00 左右启动,明显

滞后于晴天 1 h,在 14:00 出现一个低峰值后小幅下降,于 17:30 出现另一个较低的峰值,随后逐步下降,至 21:00 左右液流到达低谷值,日平均液流速率为  $141.7 \pm 33.2 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。雨天液流速率启动不明显,除出现两个数值低且持续时间短的峰值外,一直维持较低水平,日均液流速率为  $60.5 \pm 49.5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ ,明显低于晴天和阴天的日平均液流速率。

### 4.2 树干液流与气象因子的回归分析

对连续 6 d(8 月 10—15 日)的葡萄树液流速率及气象因子数据进行偏相关分析,结果如表 3 所示。液流速率与光合有效辐射、水汽压亏缺及冠层温度呈正相关关系,而与冠层相对湿度为负相关关系,这与图 1 液流速率及气象因子日变化曲线所体现的规律相符。所有气象因子中,光合有效辐射与液流速率的相关性最强,其次为水汽压亏缺,各气象因子

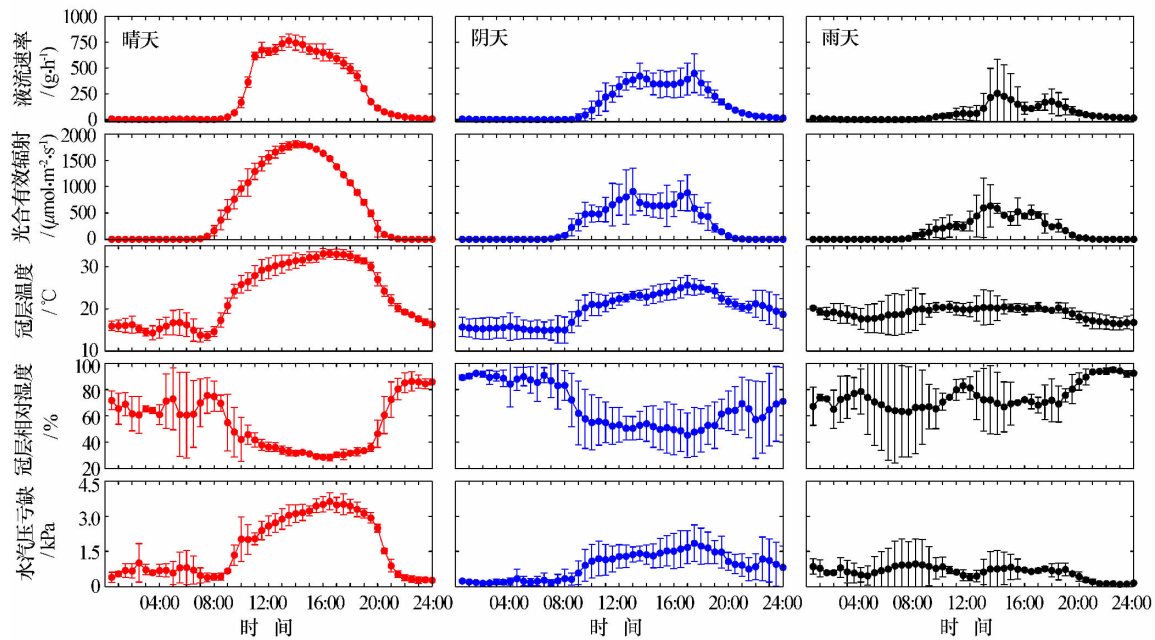


图 1 不同天气条件下葡萄树液流速率及气象因子的日变化

Fig. 1 Diurnal fluctuation of sap flow velocity of grapevine and meteorological factors under different weather

表 3 液流速率与主要气象因子的偏相关分析

Table 3 Analysis of partial correlations between sap flow velocity of grapevine and the main meteorological factors

	液流速率 /( $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ )	光合有效辐射 /( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水汽压亏缺 /kPa	冠层温度 /°C	冠层相对 湿度/%
液流速率	1				
光合有效辐射(控制水汽压亏缺)	0.865**	1			
水汽压亏缺(控制光合有效辐射)	0.377**	0.492**	1		
冠层温度(控制光合有效辐射、冠层相对湿度)	0.215**	0.584**	0.700**	1	
冠层相对湿度(控制光合有效辐射、冠层温度)	-0.170**	-0.172**	-0.792**	-0.557**	1

注:\*\*为 0.01 水平上显著相关。

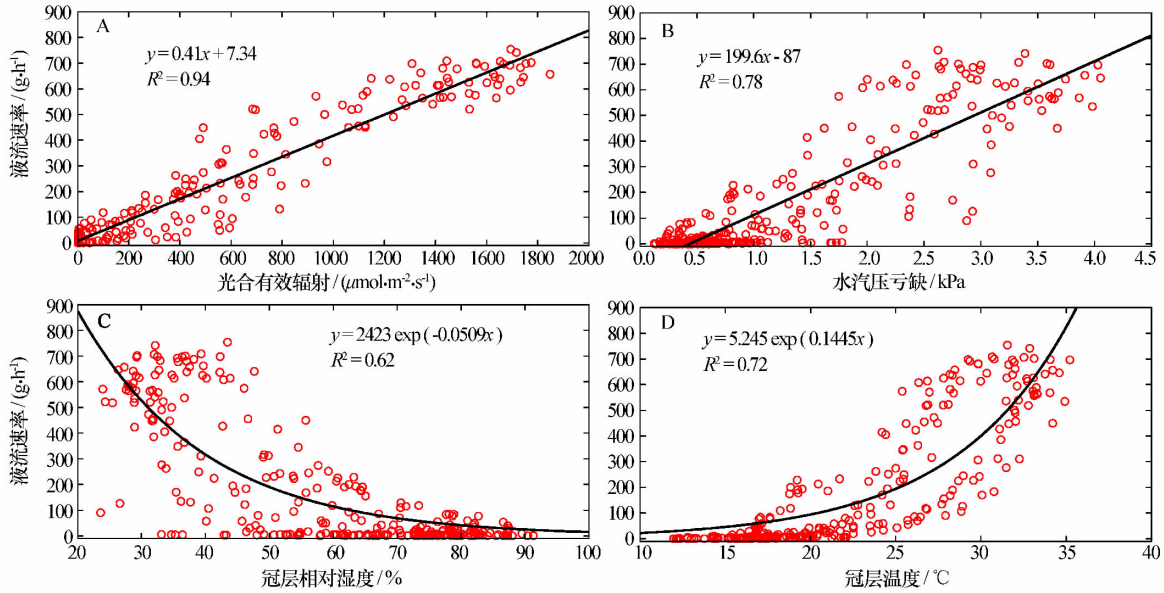


图 2 各气象因子与液流速率相关关系

Fig. 2 Correlation between meteorological factors and sap flow velocity

对液流速率的影响程度大小依次为：光合有效辐射 (0.865) > 水汽压亏缺 (0.377) > 冠层温度 (0.215) > 冠层相对湿度 (-0.170)。

从图 2 的曲线估计结果可以看出，液流速率与光合有效辐射、水汽压亏缺呈线性相关关系，而与冠层温度、冠层湿度呈曲线相关关系，所有回归方程和回归系数的相关性检验都达到了极显著水平 ( $p < 0.001$ )。

### 4.3 树干液流与气象因子的多元回归模型

选取连续 6 d 的液流速率 ( $F$ ) 及主要气象因子

数据(光合有效辐射  $PAR$ 、冠层相对湿度  $CRH$  和冠层温度  $CT$ )拟合出葡萄树液流速率的预测模型，如式 2 所示。由于水汽压亏缺是相对湿度和温度的函数<sup>[15]</sup>，尽管液流速率与水汽压亏缺 ( $VPD$ ) 有很高的相关性 ( $R^2 = 0.78$ , 图 3)，为了充分体现温度和相对湿度这两个因子对液流速率的贡献，同时避免各环境因子重复影响，我们没有将水汽压亏缺作为单独环境因子参与回归模型分析。

$$F = 0.34PAR + 863.20e^{0.0041CT} + 321.75e^{-4.98CRH} - 936.32 \quad (3)$$

该多元曲线回归方程拟合效果如图 3 所示，方

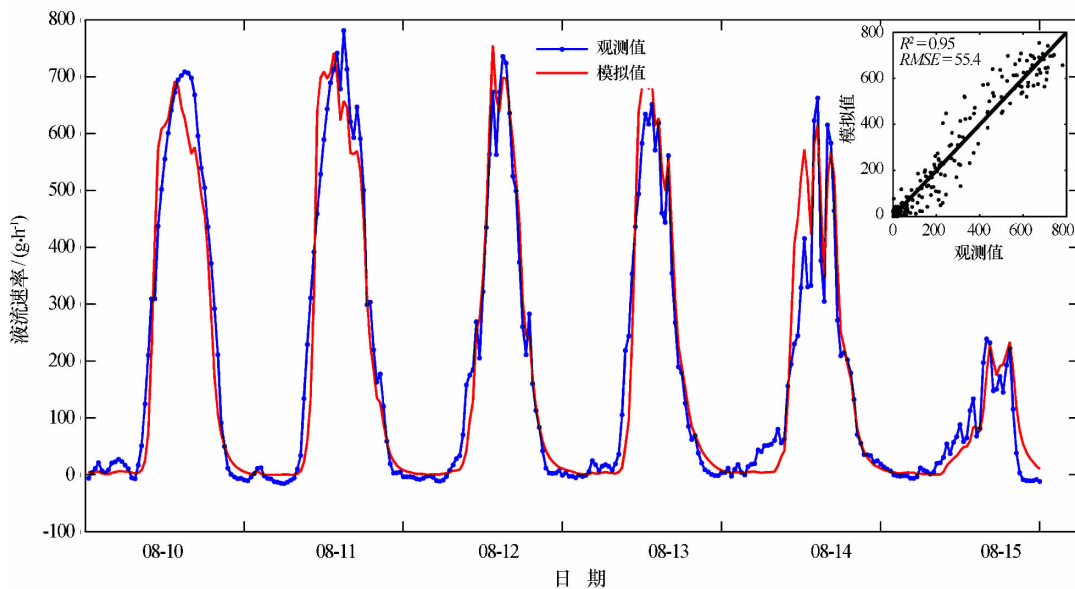


图 3 实测曲线与拟合曲线的对比

Fig. 3 Comparison of observed and simulated sap flow velocity

程模拟值与实际观测值的相关系数  $R^2$  达到 0.95, 标准误差  $RMSE$  为  $55.4 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ , 说明该方程拟合效果较佳, 因变量与自变量之间存在着较强的相关关系, 方程能够较好地揭示无核白葡萄树液流速率与各气象因子变化的相关关系。

#### 4.4 耗水量

图 4 为无核白葡萄树日累计耗水量变化曲线。测定当日胸径为 3.2 cm 和 3.3 cm 的两棵葡萄树日累计耗水量相当, 分别为 6.0 kg 和 5.8 kg。早晨耗水量很小, 09:00 开始增加, 10:00 后为加速阶段, 18:00 开始增长减缓, 日变化曲线斜率中间大, 两端接近于零, 这与图 1 所示液流速率的日变化规律是相对应的, 反映出葡萄树白天通过蒸腾大量耗水, 夜晚气孔关闭耗水微弱甚至停止的耗水量日变化过程。

图 5 为无核白葡萄树月累计耗水量变化曲线。胸径为 3.3 cm 葡萄树月累计耗水量为 158.5 kg, 日均耗水量为 5.1 kg, 胸径为 3.2 cm 葡萄树的月累计耗水量为 162.2 kg, 日均耗水量为 5.2 kg。试验区内每公顷种植约 7 500 棵葡萄树, 根据平均胸径大小及以上耗水量分析可推算出, 在生长季中每公顷葡

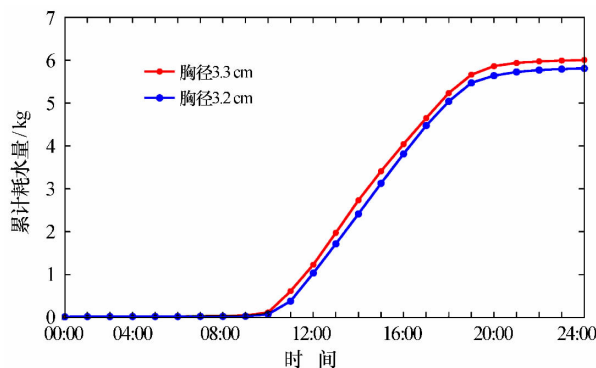


图 4 葡萄树日累计液流量变化(7月19日)

Fig. 4 Accumulative daily water consumption of grapevine on 19 July

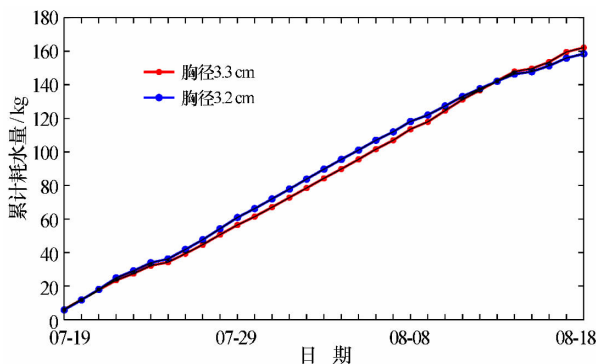


图 5 葡萄树月累计液流量变化(7月19日—8月19日)

Fig. 5 Accumulative monthly water consumption of grapevine between 19 July and 19 August

萄树月蒸腾耗水量约为  $1\,216.5 \text{ m}^3$  (122 mm), 而根据灌溉期间所获得的灌溉资料, 包括渠道横截面积 ( $0.64 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ )、渠道平均水流速度 ( $1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、平均水位深度 (0.15 m)、灌溉周期 (20 d) 及灌溉时长 (15 min), 计算可得每公顷葡萄树月灌溉量约为  $2\,137.5 \text{ m}^3$  (213 mm)。这说明大水漫灌这种粗放的灌溉方式存在一定的水资源浪费, 当地的水资源利用效率有待进一步提高。

## 5 讨论

对无核白葡萄树液流速率的日变化进行分析时, 发现无核白葡萄树夜间存在少量液流, 这并不表明夜间仍有蒸腾, 而是由根压引起的, 水分以主动吸收的方式进入葡萄树体内, 补充白天蒸腾耗散的水分, 恢复体内的水分平衡。李海涛等<sup>[17]</sup>、熊伟等<sup>[18]</sup>、常学向等<sup>[19]</sup>也发现树干夜间存在微弱液流。Fisher等<sup>[20]</sup>则采用经热脉冲技术改进的热率技术, 精确测量了涡动相关方法 (Eddy Covariance, EC) 所不能观测到的夜间低液流甚至负液流。

影响无核白葡萄树液流速率的主要气象因子依次为光合有效辐射、水汽压亏缺、冠层温度及冠层相对湿度。Martin<sup>[21]</sup>同样使用热平衡法测定火炬松、湿地松人工林树干液流变化时发现, 树干液流与太阳辐射的日变化规律一致, 王华等<sup>[22]</sup>对马占相思树液流的研究表明, 太阳辐射与水汽压亏缺是其主要环境影响因子, 与本研究结果较为一致。而 Granier等<sup>[11, 23]</sup>发现树干液流与水汽压亏缺的相关性高于太阳辐射或空气温度, 与本研究结果较为不同。这说明受气象因子、土壤因素、作物本身等多种因素的综合作用, 影响不同植物树干液流的主导因子并非完全相同。

晴天条件下无核白葡萄树液流并未出现“午休”现象, 仍为典型的单峰型变化曲线, 这是由于南湖地区虽地处西北干旱区, 但由于有稳定灌溉水源, 土壤供水条件充分, 所以午间并未因水分缺失而出现蒸腾抑制现象。张小由等<sup>[24]</sup>研究胡杨和柽柳的液流速率时认为, “液流速率的午休”现象导致液流速率变化呈现出双峰或多峰型, 该现象是干旱区植物为了保存植物体内的水分, 短暂关闭或减小叶片气孔开合程度, 降低植物体内水分蒸腾所致。

阴雨天气条件下无核白葡萄树液流速率大幅下降, 是由于冠层相对湿度大, 降低了葡萄叶片气孔内外的水汽压梯度, 水汽压亏缺的数值很低, 植物蒸腾驱动力不足。同时由于阴雨天太阳辐射较弱, 从而导致葡萄树的蒸腾作用被抑制, 大幅降低了液流速率。液流速率与气象因子数据方差较大, 则受到太

阳辐射、云量及降雨变等变化的影响。李炜等<sup>[25]</sup>发现不同天气条件对植物蒸腾的日变化过程有影响,夏桂敏等<sup>[26]</sup>发现柠条晴天液流变化幅度较大,雨天液流变化幅度较小,赵春彦等<sup>[27]</sup>发现阴雨天液流启动时间推迟,停止时间提前,峰值显著缩小,这都与本研究结果一致。

此外,典型生长季胸径为 3.3 cm 葡萄树月累计耗水量为 158.5 kg,日均耗水量为 5.1 kg,胸径为 3.2 cm 葡萄树月累计耗水量为 162.2 kg,日均耗水量为 5.2 kg。胸径稍小的葡萄树耗水量反而稍大,这可能与样树本身的气孔导度、叶面积大小、树龄大小等紧密相关,表明影响树干液流的因子错综复杂,除了太阳辐射、气温、空气湿度等气象因子外,树木生理形态特征(如气孔导度<sup>[28]</sup>,边界层导度,叶面积等)也参与控制着这个复杂的生理生态过程<sup>[29-31]</sup>。许浩等<sup>[32]</sup>发现在塔克拉玛干沙漠腹地,土壤水分充足时,直径为 3.5 cm 的多枝桧柳在整个生长季的日平均耗水量为 6.3 kg,耗水量最大的 7 月有时高达 10 kg,高于本研究葡萄树日均耗水量,说明在环境因子类似的情况下不同树种的耗水量存在一定差异。Evans 等<sup>[33]</sup>发现,灌溉方式、栽培品种、种植间隔和朝向等耕作方式的差异也会导致类似环境下同种作物耗水量差异。

## 6 结论

典型生长季无核白葡萄树不同天气条件下液流速率日变化差异显著,日均液流速率晴天( $245.7 \pm 16.5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ ) > 阴天( $141.7 \pm 33.2 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ ) > 雨天( $60.5 \pm 49.5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ ),液流速率日变化规律与光合有效辐射、水汽压亏缺、冠层温度及冠层相对湿度呈现出良好的生态学相关性。

液流速率与气象因子数据的偏相关分析表明,液流速率与各气象因子的相关程度大小顺序为:光合有效辐射 > 水汽压亏缺 > 冠层温度 > 冠层相对湿度。单因子回归分析表明,液流速率与光合有效辐射、水汽压亏缺为线性相关关系,与冠层温度及冠层相对湿度为曲线相关关系。

建立了液流速率( $F$ )与主要气象因子的多元曲线回归方程: $F = 0.34PAR + 863.20e^{0.0041CT} + 321.75e^{-4.98CRH} - 936.32$ ,其中, $PAR$  为光合有效辐射, $CT$  为冠层温度, $CRH$  为冠层相对湿度。方程模拟值与实际观测值的相关系数  $R^2$  达到 0.95,该方程能够较好地揭示无核白葡萄树液流速率与气象因子变化的相关关系。

典型生长季胸径为 3.3 cm 葡萄树月累计耗水

量为 158.5 kg,日均耗水量为 5.1 kg,胸径为 3.2 cm 葡萄树月累计耗水量为 162.2 kg,日均耗水量为 5.2 kg。胸径稍小的葡萄树耗水量反而稍大,表明树木生理形态特征也参与控制植物蒸腾耗水过程。此外,通过估算得到典型生长季中每亩葡萄树月蒸腾耗水量约为 122 mm,而月灌溉量约为 213 mm,当地水资源利用效率有待进一步提高。

## 参考文献:

- [1] 张茂杨.葡萄栽培与加工技术[M].济南:山东科学技术出版社,1991:22-23,90-91.
- [2] Granier A, Bobay V, Gash J H C, et al. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Anj.) in Les Landed forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 51(3/4): 309-319.
- [3] Baker J M, van Bavel C H M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants[J]. Plant, Cell Environment, 1987, 10: 777-782.
- [4] 司建华,冯起,张小由,等.热脉冲技术测定树干液流研究进展[J].冰川冻土,2007,29(3):1-7.
- [5] Sun H Z, Zhou X F, Kang S Z. Research advance in application of heat technique in studying stem sap flow[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 1074-1078.
- [6] Rosanne C, Sami B, Daniel Z, et al. Evaluation of the sap flow determined with a heat balance method to measure the transpiration of a sugarcane canopy[J]. Agricultural Water Management, 2005, 75: 10-24.
- [7] 敦煌市志编纂委员会.敦煌市志[M].北京:新华出版社,1993:174-180.
- [8] 王维真,徐自为,刘绍民,等.黑河流域不同下垫面水热通量特征分析[J].地球科学进展,2009,24(7):1-10.
- [9] 王介民,王维真,孙方林,等.复杂条件下湍流通量的观测与分析[J].地球科学进展,2007,22(8):1-7.
- [10] Tang J W, Paul V B, Brent E E, et al. Sap flux-upscaled canopy transpiration, stomatal conductance, and water use efficiency in an old growth forest in the Great Lakes region of the United States[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: 1-12.
- [11] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 78: 19-29.
- [12] 苏永红,冯起,朱高峰,等.应用模糊综合评判方法评价石羊河流域水资源承载能力[J].干旱区研究,2009,26(2):1-7.
- [13] 蔡正旺,苏雪,牟迈,等.甘肃敦煌南湖自然保护区生物多样性及保护对策[J].西北师范大学学报(自然科学版),2007,43(6):1-5.
- [14] 岳广阳,张铜会,刘新平,等.热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J].林业科学,2006,42(8):1-7.
- [15] Allen R G, Pereira L S, Smith R D. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56. Rome, Italy: FAO, 1998.
- [16] Steinberg S L, Van Bavel C H M, McFarland M J. A gauge to

- measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1989, 114: 466—472.
- [17] 李海涛, 向乐, 夏军, 等. 应用热扩散技术对亚热带红壤区湿地松人工林树干边材液流的研究[J]. *林业科学*, 2006, 42(10): 1—8.
- [18] 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[J]. *林业科学*, 2003, 39(2): 1—7.
- [19] 常学向, 赵文智. 荒漠绿洲农田防护树种二白杨生长季节树干液流的变化[J]. *生态学报*, 2004, 24(7): 1436—1441.
- [20] Fisher J, Dennis D, Baldocchi L M, et al. What the towers don't see at night; nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California[J]. *Tree Physiology*, 2007, 27: 59—610.
- [21] Martin T A. Winter season tree sap flow and stand transpiration in an intensively-managed loblolly and slash pine plantation[J]. *Sustainable Forest*, 2000, 10(1/2): 155—163.
- [22] 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.
- [23] Granier A, Claustres J P. Water relations of a Norway spruce (*Picea abies*) tree growing in natural condition; variation within the tree[J]. *Acta Oecologica*, 1989, 10(3): 295—310.
- [24] 张小由, 龚家栋, 周茂先, 等. 应用热脉冲技术对胡杨和柽柳树干液流的研究[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(5): 1—6.
- [25] 李炜, 司建华, 冯起, 等. 胡杨 (*Populus euphratica*) 蒸腾耗水对水汽压亏缺的响应[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1—8.
- [26] 夏桂敏, 康绍忠, 李王成, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化[J]. *生态学报*, 2006, (4): 1—8.
- [27] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 胡杨 (*Populus euphratica*) 树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 1—7.
- [28] 苏永红, 朱高峰, 冯起, 等. 额济纳荒漠河岸胡杨林叶片气孔导度与微环境因子关系的模拟研究[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(7): 1434—1439.
- [29] Kumagai T, Saitoh T M, Sato Y, et al. Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a low land mixed dip terocarp forest in Sarawak, borneo; dry spell effects[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 287: 237—251.
- [30] Wullschlegel S D, Wilson K B, Hanson P J. Environmental control of whole-plant transpiration, canopy conductance and estimates of the decoupling coefficient for large red maple trees[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104: 157—168.
- [31] Meinzer F C, Goldstein G, Holbrook N M, et al. Stomatal and environmental control of transpiration in a lowland tropical forest tree[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1993, 16: 429—436.
- [32] 许浩, 张希明, 闫海龙, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝桧柳茎干液流及耗水量[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 1—7.
- [33] Evans R G, Spayd S E, Wample R L, et al. Water use of *Vitis vinifera* grapes in Washington[J]. *Agricultural Water Management*, 1993, 23(2): 109—124.

## Analysis of Variation of Sap Flow Velocity and Water Consumption of Grapevine in the Nanhu Oasis, Dunhuang, China

Bai Yan, Zhu Gaofeng, Zhang Kun, Ma Ting

(Collaborative Innovation Centre for Arid Environments and Climate Change, Key Laboratory of Western China's Environmental Systems with the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** By using FLOW32 sap flow sensors, the researchers employ the heat balance method to study sap flow velocity of grapevine in the Nanhu Oasis in Dunhuang, China. After detecting meteorological factors by automatic weather station, the paper analyzes the diurnal fluctuations of sap flow velocity of grapevine under different weather conditions, and conducts simple regression analysis between sap flow velocity of grapevine and meteorological factors, and establishes a multiple linear regression model to analyze the water-consuming pattern of grapevine. The result shows that, sap flow velocity varies in different weather conditions with statistical significance; the daily mean on sunny days is greater than that on cloudy days, with the rainy days the lowest. Analysis of partial correlations and regression analysis between sap flow velocity of grapevine and the main meteorological factors show that, sap flow velocity of grapevine correlates linearly with photosynthetically active radiation (*PAR*) and vapor pressure deficit (*VPD*), and correlates curve-linearly with canopy temperature (*CT*) and canopy relative humidity (*CRH*) in the pattern of  $PAR > VPD > CT > CRH$ . The result of multiple regression modeling can help better predict water consumption of grapevine ( $R^2 = 0.95$ ), and comparative analysis of water consumption of grapevines can help improve the local agricultural watering and planting.

**Key words:** sap flow velocity; heat balance method; transpiration; regression analysis