

DOI: 10.5846/stxb201502250384

徐利岗, 苗正伟, 杜历, 鲍子云, 王怀博, 李金泽. 干旱区枸杞树干液流变化特征及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(17): - - .

Xu L G, Miao Z W, Du L, Bao Z Y, Wang H B, Li J Z. Analysis of variation in and factors influencing sap flow in stems of *Lycium barbarum* in an arid area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - - .

## 干旱区枸杞树干液流变化特征及其影响因素

徐利岗<sup>1,2,3</sup>, 苗正伟<sup>4</sup>, 杜历<sup>1,\*</sup>, 鲍子云<sup>1</sup>, 王怀博<sup>1</sup>, 李金泽<sup>1</sup>

1 宁夏水利科学研究所, 银川 750021

2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

3 阜康荒漠生态系统国家野外观测研究站, 阜康 831500

4 河北工程技术高等专科学校, 沧州 061001

**摘要:** 树干液流作为植物蒸散作用的水分来源, 是植物水分消耗的直观量化监测指标, 利用包裹式树干液流监测技术获取干旱区枸杞全生育期树干液流实时数据, 分析了不同时间尺度树干液流变化特征及各气象要素对树干液流的影响, 为明晰枸杞耗水规律及其影响因素提供了重要的作证。结果表明: 枸杞的树干液流量昼夜差异较大, 白天液流量是夜间的 10 倍左右; 晴天液流速率、日累积量及变化幅度均大于阴雨天气, 晴天液流速率变化曲线且呈宽峰型, 在 06:30 左右启动较阴天提前 30min; 夏季树干液流启动时间为 6:00 左右比秋季提前 1 个小时左右, 夏季的峰值 123g/h。盛果期液流速率最大 10.32g/h, 营养生长期最小 1.35 g/h; 6—8 月旺盛生长季, 平均日耗水 1388.3g/d, 5—11 月全生育期日均耗水 1102.7g/d; 树干液流速率与太阳辐射、空气温度均呈极显著正相关关系, 与相对湿度呈负相关关系; 枸杞树干液流(F)与太阳辐射(S)、温度(T)、相对湿度(H)及饱和水汽压(VPD)符合方程  $F = 41.5 + 0.167S - 0.563H + 1.36T - 9.67VPD$  ( $R^2 = 0.6547$ )。

**关键词:** 干旱区; 宁夏; 枸杞; 树干液流; 多时间尺度; 变化特征; 气象因子

## Analysis of variation in and factors influencing sap flow in stems of *Lycium barbarum* in an arid area

XU Ligang<sup>1,2,3</sup>, MIAO Zhengwei<sup>4</sup>, DU Li<sup>1,\*</sup>, BAO Ziyun<sup>1</sup>, WANG Huaibo<sup>1</sup>, LI Jinze<sup>1</sup>

1 The Scientific Research Institute of the Water Conservancy of Ningxia, Yinchuan 750021, China

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

3 Fukang Desert Ecosystem Observation and Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Fukang 831500, China

4 Hebei Engineering and Technical College, Hebei Cangzhou 061001, China

**Abstract:** Sap flow is the source of water for plant evapotranspiration, which is the direct quantitative index of plant water consumption. We monitored the sap flow of *Lycium barbarum* continuously with stem heat and balance sap flow monitoring techniques for the entire growing season in an arid region of Ningxia. We used these data to analyze the variation in sap flow and determine its relationship with meteorological factors on different time scales. Our goal was to provide evidence to clarify the amount of water consumption by *Lycium barbarum* and the factors that influenced water consumption. The results indicated the occurrence of diurnal variation in sap flow. Sap flow was approximately 10 times greater during the day than at night. Sap flow started around 06:30 and occurred approximately 30 min earlier on cloudy days. Additionally, the sap flow rate curve had a broad peak on sunny days. In summer, sap flow started at 06:00, 1 hour earlier than in autumn, and the maximum sap flow rate was 123 g/h. The sap flow rate was greatest during the full fruiting period and had a minimum value

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51309136); 宁夏自然科学基金项目(NZ13221); 宁夏回族自治区科技支撑计划项目(精量灌溉与水肥一体化技术研究与示范)

收稿日期: 2015-02-25; 网络出版日期: 2015-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dulisport@126.com

during the vegetative period. It increased rapidly from June to August when water consumption was 1388.3 g/d. Average daily water consumption was 1102.7 g/d during the entire growth period. We also found that the sap flow rate was positively correlated with solar radiation and air temperature, whereas a negative correlation with relative humidity was detected. Furthermore, sap flow (F) expresses the following quantitative relationship with solar radiation (S), temperature (T), relative humidity (H), and vapor pressure differential (VPD):  $F = 41.5 + 0.167S - 0.563H + 1.36T - 9.67VPD$  ( $R^2 = 0.6547$ ).

**Key Words:** Arid area; Ningxia; *Lycium barbarum*; Stem sap flow; Multi time-scale; Variation; Meteorological factors

树干液流是指蒸腾在植株体内引起的上升流,而植株蒸腾量是植物失水的主要方式<sup>[1]</sup>,树木的蒸腾耗水 99.8%以上来自于树干液流<sup>[2-3]</sup>,因此通过精确测量树干液流量基本可以反映植株的蒸腾耗水状况<sup>[4]</sup>。植物树干液流的变化与气象因子具有极为密切的关系<sup>[5-7]</sup>,准确分析掌握单株植物的蒸腾耗水规律,对于准确估算大面积植被的蒸腾耗水量及作物实际耗水具有重要的作用<sup>[8-9]</sup>。近年来,热量测定植物树干液流的技术由于其精度高、无需校正且敏感度较高等优点<sup>[10-11]</sup>,被许多学者所采用。尤其是干旱区,已经被并应用于黄土塬区的苹果<sup>[12]</sup>、新疆地区的胡杨<sup>[13]</sup>、库车白杏<sup>[14]</sup>、速生新疆杨<sup>[15]</sup>、干旱荒漠区银白杨<sup>[16]</sup>及准噶尔盆地南缘原生梭梭树<sup>[17]</sup>等各地不同树木的树干液流分析中。也有学者探讨了不同时间尺度下的树干液流变化特征,池波<sup>[18]</sup>、李少宁<sup>[19]</sup>、杨广远<sup>[20]</sup>及王文杰<sup>[21]</sup>等分析了不同类型树木,日、月、季节等时段茎流变化特征并分析了其与环境因子的响应关系。

枸杞广泛分布于世界各地及我国的多个省份,但惟有宁夏枸杞(*Lycium barbarum*)历史最为悠久。2005年,宁夏枸杞获国家原产地域保护<sup>[22]</sup>。国家医药管理局将宁夏枸杞定为全国唯一的药用枸杞产地。枸杞产业也是宁夏的战略性主导产业和支柱性区域特色农业的代表。至2010年,宁夏种植面积突破了70万亩,总产量达到了8万吨,占全国60%,出口量占全国90%<sup>[23]</sup>。当前,国内外对枸杞的研究主要从枸杞子营养与药用功效<sup>[24-25]</sup>、枸杞品种资源筛选<sup>[26]</sup>、苗木繁育<sup>[27]</sup>、不同水分亏缺<sup>[28]</sup>及温度处理<sup>[29]</sup>对枸杞多糖及品质的影响等方面展开,对于枸杞蒸腾耗水变化规律及其影响因素方面报道极少。本文以宁夏枸杞为研究对象,采用包裹式茎流监测系统连续监测5—11月自然生长条件下的枸杞树干液流速率及其累积量,分析其变化特征及与环境因子间的关系,为枸杞需水量的计算与精量控制灌溉提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区地处西北干旱内陆地区,位于宁夏北部,干旱少雨,蒸发量大,日照充足,积温较高。多年平均气温 8.8℃,年日照时数为 2800—3100h,多年平均降雨量 195mm,蒸发量 1864mm,无霜期 155d 左右,年平均风速 2—6m/s,土壤冻结深度 0.8—1.2m。地下水水量丰富,主要为灌溉入渗、降水入渗及贺兰山前侧向补给,地下水埋藏一般在 1.0—3.0m 左右,矿化度小于 1.0g/L。

核心试验区位于中国灌溉试验宁夏中心站试验基地枸杞种植区(106°42'E 38°27'N,海拔 1115m),总面积 5 亩,枸杞种植株行距为 1m×3m,选择一块长势均等,冠幅适中,无病虫害的片区(21m×24m)作为枸杞树干液流试验测定区域。试验区土壤类型为淡灰钙土,0—40cm 土壤颗粒组成为:粒径 2.0—0.25mm 占 49.4%,0.25—0.05mm 占 31.6%,0.05—0.02mm 占 2.0%,0.02—0.002 占 4.4%,<0.002mm 占 12.6%,按美国土壤分类制为壤质砂土。试验灌溉水源为地下水,矿化度 0.46g/L,符合灌溉水质标准要求。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验设置及设备安装

(1)在试验区域内选择选取 3 棵典型样株(处理编号分别为 T1、T2 及 T3),T1 地径为 2.33cm,株高 116cm,冠幅 94cm×93cm;T2 地径为 2.77cm,株高 125cm,冠幅 110cm×95cm;T3 地径为 2.09cm,株高 106cm,冠

幅 90cm×85cm。在距地面 10cm 以上树干顺直段安装意大利包裹式植物茎流监测系统(EL-100)的 Dynagage 包裹式茎流传感器,进行枸杞茎秆液流监测。取得了 2014 年 5 月 16 日—11 月 30 日枸杞全生育期树干液流数据,数据步长为 30min。

(2)安装美国产 WatchDog 2900ET 自动气象站 1 台,实时监测试验区太阳辐射、气压、相对湿度、温度、降雨量、风速、露点温度等气象要素,获取了 2014 年 5 月 1 日—2014 年 12 月 31 日逐日气象数据,数据步长为 60min。

## 2.2 研究方法

采用饱和水汽压差(VPD)指标综合表达温度与空气相对湿度的协同效应<sup>[30]</sup>,以分析其对枸杞树干液流的影响。该指标计算公式如下:

$$E = \exp\left(\frac{17.27t}{237.3 + t}\right) \quad (1)$$

$$VPD = E - ERh/100$$

式中, $E$  为饱和水汽压(kpa); $Rh$  为相对湿度(%); $t$  为空气温度(°C)。

数据的统计分析使用 SPSS 软件及 Excel 软件,其中不同月份树干液流的差异性采用 Miniab16.0 方差分析;树干液流与气象因子的相关性分析采用非参数检验 Spearman 分析方法,SPSS 软件予以实现。树干液流与环境因子的回归模型以枸杞树干液流为因变量,以气温、空气相对湿度、太阳辐射及饱和水汽压差为自变量,采用多元回归模型分析方法。

## 3 结果与分析

### 3.1 干旱区枸杞多时间尺度树干液流变化特征

#### 3.1.1 枸杞树干液流昼夜变化特征

为分析不同天气条件下枸杞树干液流的昼夜变化特征,分别选择阴天(8月7日)、降雨天(8月16日,降雨量为 19mm)以及晴天(8月27日)分别作日累计液流量及液流速率日变化过程图(图 1),从图中可以看出三种典型天气条件下,枸杞树干液流速率及日累积量变化差异显著。晴天树干液流速率及日累积量均最大,阴天次之,降雨天气最小;变化幅度晴天大于阴天与降雨天气。晴天液流速率变化曲线且呈宽峰型,在 06:30 左右启动,并迅速升高,11:00—15:00 时段液流保持在较高水平,18:00 开始迅速下降;阴天液流速率变化曲线变化相对平缓,尤其是峰值时段(11:00—15:00),启动时间较晴天滞后 30min,雨天曲线呈现多峰型,液流速率变化剧烈。这主要是因为晴天太阳辐射强烈,气温高,空气湿度相对较小,枸杞叶片蒸腾作用较强,因此树干液流速率及日累积量均高于阴雨天气。

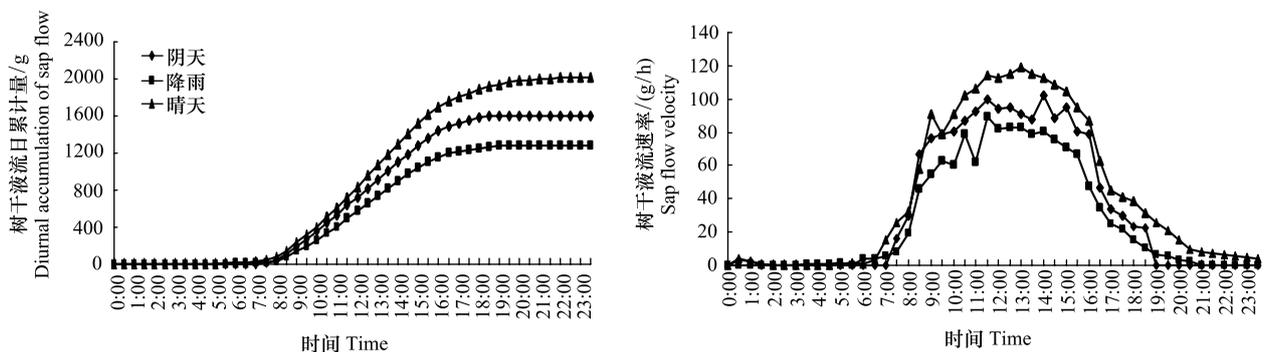


图 1 不同天气条件下枸杞累计树干液流量(a)及树干液流速率(b)变化过程图

Fig.1 Diurnal variation of sap flow accumulation (a) and sap flow rate(b) under different weather conditions

统计枸杞生育期内夏季(6—8月)及秋季(9—11月)树干液流速率日动态的平均值,绘制变化过程线(图

2)。从图 2 中可以看出夏季及秋季枸杞树干液流的日变化过程及趋势较为相似。从起动时间来看,秋季在 7:30 左右,而夏季在早晨 6:00,比秋季提前 1 个小时左右。从峰值来看,夏季各时刻树干液流速率高于秋季,夏季的峰值为 123g/h,出现在午后 13:00,而秋季在 12:00 达到峰值为 92 g/h,此后维持平稳至 16:00 逐渐降低,夏季变化幅度大于秋季。认为夏季比秋季起动时间早是因为夏季太阳辐射逐渐增强,空气温度升高,使得枸杞叶片气孔张开,光合与蒸腾逐渐增强,带动液流启动,而夏季太阳较秋季升起的较早,所以液流启动较早。

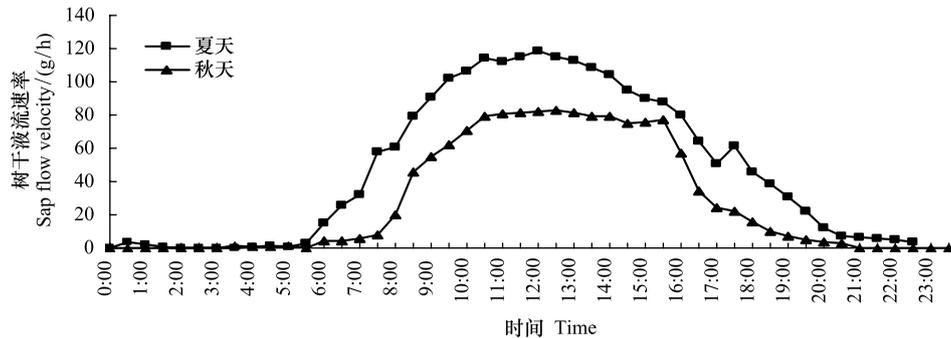


图 2 不同季节树干液流速率日变化过程

Fig.2 Diurnal variation of sap flow rate for different season

### 3.1.2 枸杞树干液流日间变化特征

绘制基于降水量的枸杞日累计树干液流量及日平均树干液流速率变化过程线(图 3),从图 3a 看出,6—8 月枸杞的旺盛生长季,也是枸杞日累计树干液流量及蒸腾耗水最大的时期,最高值出现在 7 月 6 日为 2098.9g/d,次高值则出现在 8 月 16 日 2040.3g/d,而 6 月 26 日也出现了 1898.9 g/d 的高值。5 月中旬至 11 月的日均耗水量为 1102.7g/d,6—9 月枸杞树干液流维持在较高水平,5 月份及 10—11 月份相对较低。全生育期降水量 143.5mm,降水影响了树干液流的蒸散。从图 3b 可以看出,枸杞日均树干液流速率与日累积量的变化特征相似,6—8 月生长旺季,每日的树干液流速率较大,10—11 月相对较小,尤其是 11 月,由于叶片的脱落,树干液流急剧减小。

### 3.1.3 枸杞树干液流月际间变化特征

绘制 5—11 月枸杞各月树干液流累积量及月平均速率变化过程图(图 4)。从图 4 中可以看出,8 月份枸杞累计树干液流量最大为 46926.52g,对应的月平均树干液流速率为 7.73g/h,7 月份次之,累计总量为 44735.8g,平均速率为 7.45 g/h,6 月份为 36024.03 g,平均速率为 2.98 g/h。11 月最小为 4966.45 g,对应的平均速率为 0.93 g/h。

统计枸杞不同生育期内树干液流及其平均速率(表 1)。从表 1 中可以得出,枸杞树干液流随其生长期的发展而变大,其中营养生长期蒸腾耗水最小为 15.77kg,秋季生长后期耗水最大为 62.50kg,平均树干液流速率则以盛果期最大为 10.32g/h,营养生长期最小为 1.35 g/h。

表 1 枸杞不同生育期树干液流量及其速率变化表

Table 1 Variation of total sap flow and sap flow rate in the different growth periods

生育期 Growth periods	营养生长期 Vegetative phase	盛花期 Full blooming	盛花后期 Late flowering stage	盛果期 Fruit period	盛果后期 Late Fruit period	秋季生长期 Autumn growth period	秋季生长后期 Late autumn growth period
累计茎流量/kg Accumulation of sap flow	15.77	16.40	18.44	20.29	27.17	32.80	62.50
茎流速率/(g/h) Sap flow velocity	1.35	1.88	4.32	10.32	6.27	6.75	2.42

## 3.2 不同地径枸杞植株的树干液流变化特征分析

依据典型样株(T2、T3)获取的全生育期树干液流数据,选择 6 月 1 日、7 月 1 日、8 月 1 日、9 月 1 日、10 月

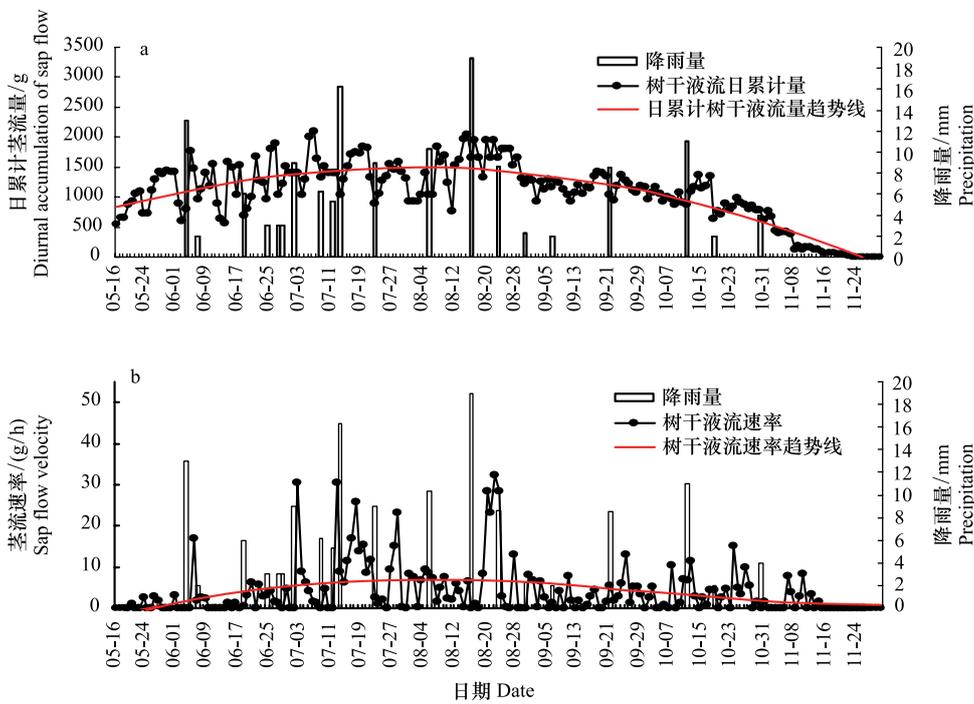


图3 枸杞累计树干液流量(a)及日平均速率(b)变化过程线

Fig.3 Varying line of total sap flow (a) and sap flow rate (b) in whole growth period

日及11月1日分别绘制T2和T3样株当日树干液流变化过程线(图5)。从图中可以看出不同树径枸杞各月树干液流变化过程基本相似,但T2各月树干液流明显大于T3树干液流,结合样株生长情况认为,这与植株冠幅及地径有显著联系,T2地径为2.77cm,株高125cm,冠幅110cm×95cm,而T3地径为2.09cm,株高106cm,冠幅90cm×85cm。各月枸杞树干液流日变化过程均呈多峰型特征,且7—8月份蒸腾耗水最为剧烈。此外,枸杞在夜间(20:00—8:00)仍保持一定的液流蒸散,但占日累计蒸腾耗水比例较少。其中,T2样株6月夜间液流量占日累计量的7.31%,白天液流总量是夜间的12倍,T3样株夜间液流量占日累计量的6.68%,白天液流总量是夜间的11倍。T2样株7月夜间液流量占日累计量的8.15%,白天液流总量是夜间的15.6倍,T3样株夜间液流量占日累计量的6.98%,白天液流总量是夜间的10倍。说明枸杞的树干液流量昼夜差异大,同时,枸杞试验区还出现了,午间有液流骤减现象,其主要原因是由于午间气温较高,干旱区植物为了保存体内的水分,短暂关闭或减小叶片气孔,降低植物体水分蒸腾,以减少水分损耗的一种机制。而在夜间仍然有液流的产生,则认为这是由于白天气孔开放,树冠蒸腾,形成了叶片-冠-根的水势差,日落后气孔关闭,但水势梯度并不立即消失,由于水势差的存在,仍会有部分水分在一段时间内被动地通过根部进入树干,形成夜间补偿流,恢复植物体内的水分平衡<sup>[30]</sup>,这与树种及其周围环境条件有密切相关性。

### 3.3 枸杞树干液流与气象因子的影响关系分析

#### 3.3.1 枸杞树干液流与气象要素的相关性分析

为了讨论枸杞树干液流与气象要素的相关关系,利用SPSS16.0软件,分析树干液流速率、太阳辐射、空气温度、相对湿度及风速之间的互相关关系,得出其相关系数及显著性程度(表2)。同时选取8月10日及9月

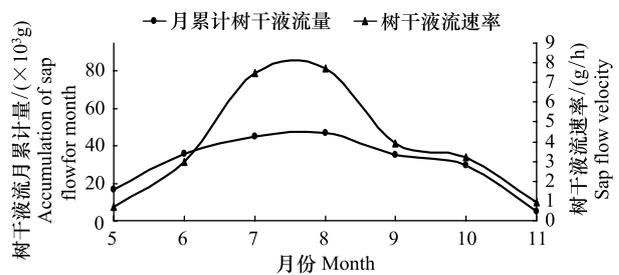


图4 枸杞各月累计树干液流量及平均速率变化过程线

Fig.4 Variation of sap flow accumulation value and sap flow rate for months in growing periods

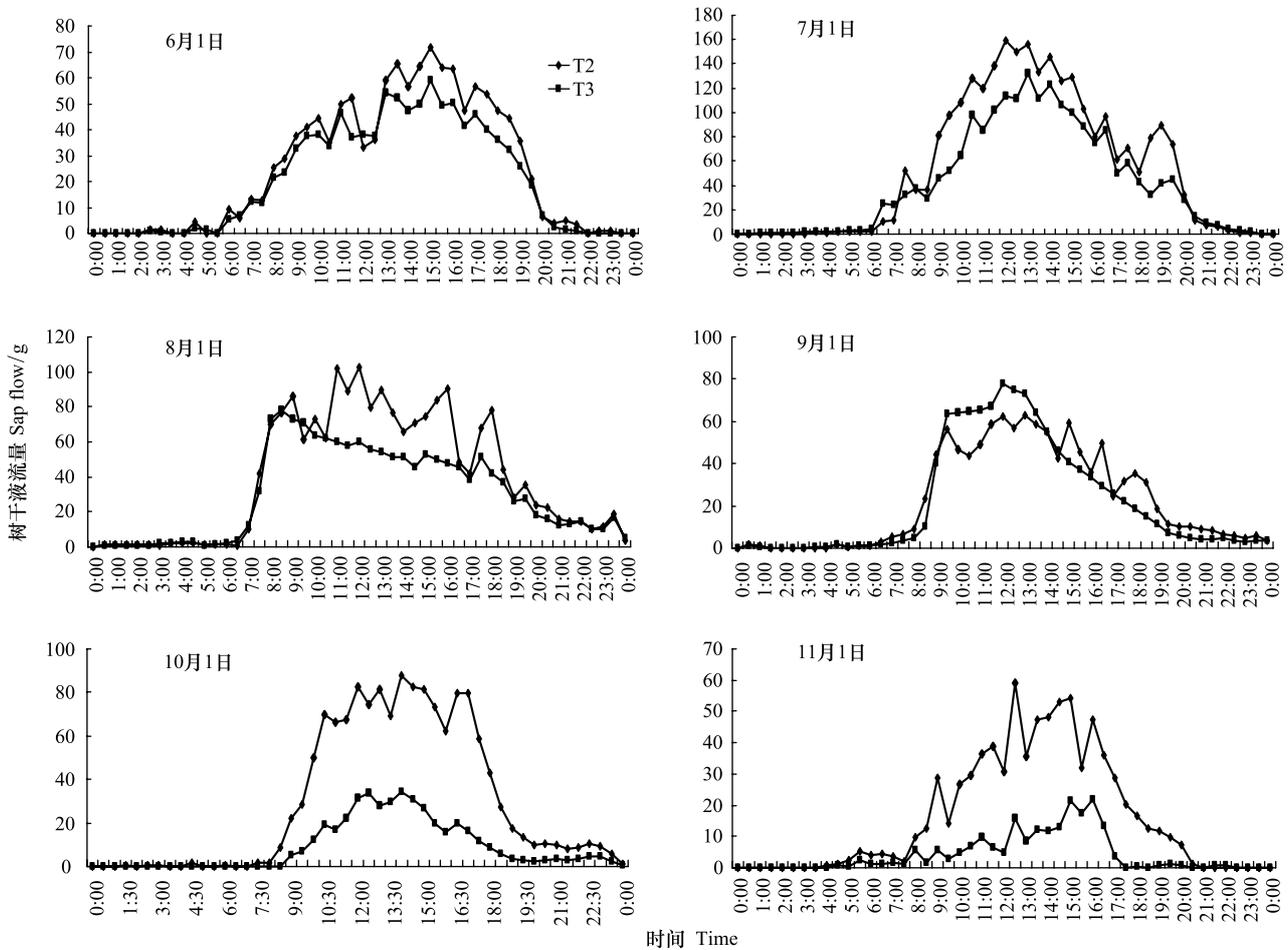


图5 枸杞不同地径各月树干液流日变化过程线

Fig.5 The Diurnal sap flux of *Lycium barbarum* with different basal diameter in months

表2 枸杞树干液流速率与气象因子的相关关系

Table 2 The correlation analysis between sap flow velocity and meteorological factors

项目 Item	液流速率 Sap flow velocity	太阳辐射 Solar radiation	温度 Air temperature	相对湿度 Relative humidity	风速 Wind speed	
液流速率 Sap flow velocity	Pearson Correlation	1.000	0.446 **	0.324 **	-0.272 **	0.307 **
	Sig. (2-tailed)	0	0.003	0.005	0.001	0.009
太阳辐射 Solar radiation	Pearson Correlation	0.446 **	1.000	0.566 **	-0.547 **	0.512 **
	Sig. (2-tailed)	0.003	0	0.000	0.000	0.000
温度 Air temperature	Pearson Correlation	0.324 **	0.566 **	1.000	-0.858 **	0.045
	Sig. (2-tailed)	0.005	0.000	0	0.000	0.591
相对湿度 Relative humidity	Pearson Correlation	-0.272 **	-0.547 **	-0.858 **	1.000	-0.213 *
	Sig. (2-tailed)	0.001	0.000	0.000	0	0.011
风速 Wind speed	Pearson Correlation	0.307 **	0.512 **	0.045	-0.213 *	1.000
	Sig. (2-tailed)	0.009	0.000	0.591	0.011	0

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ ;  $N = 144$ ; Pearson Correlation 相关系数; Sig. (2-tailed)-P 值(双尾).

10日两个典型日的树干液流、太阳辐射、相对湿度、空气温度及风速等日数据,分别两两绘制过程线(图6)。从表2中可以看出,树干液流速率与太阳辐射、空气温度及风速之间均呈正相关关系且均达到极显著检验水平,相关系数分别为0.446( $P = 0.003$ )、0.324( $P = 0.005$ )、0.307( $P = 0.009$ ),树干液流速率与相对湿度呈负相

关系,相关系数为 $-0.272(P=0.001)$ 。说明树干液流与气象要素有着极为显著地相关性关系,气象要素对树干液流的变化影响显著。从图 6 中可以看出太阳辐射、空气温度及风速与树干液流变化过程基本相似,但存在一定的滞后效应。树干液流与相对湿度成负相关关系。

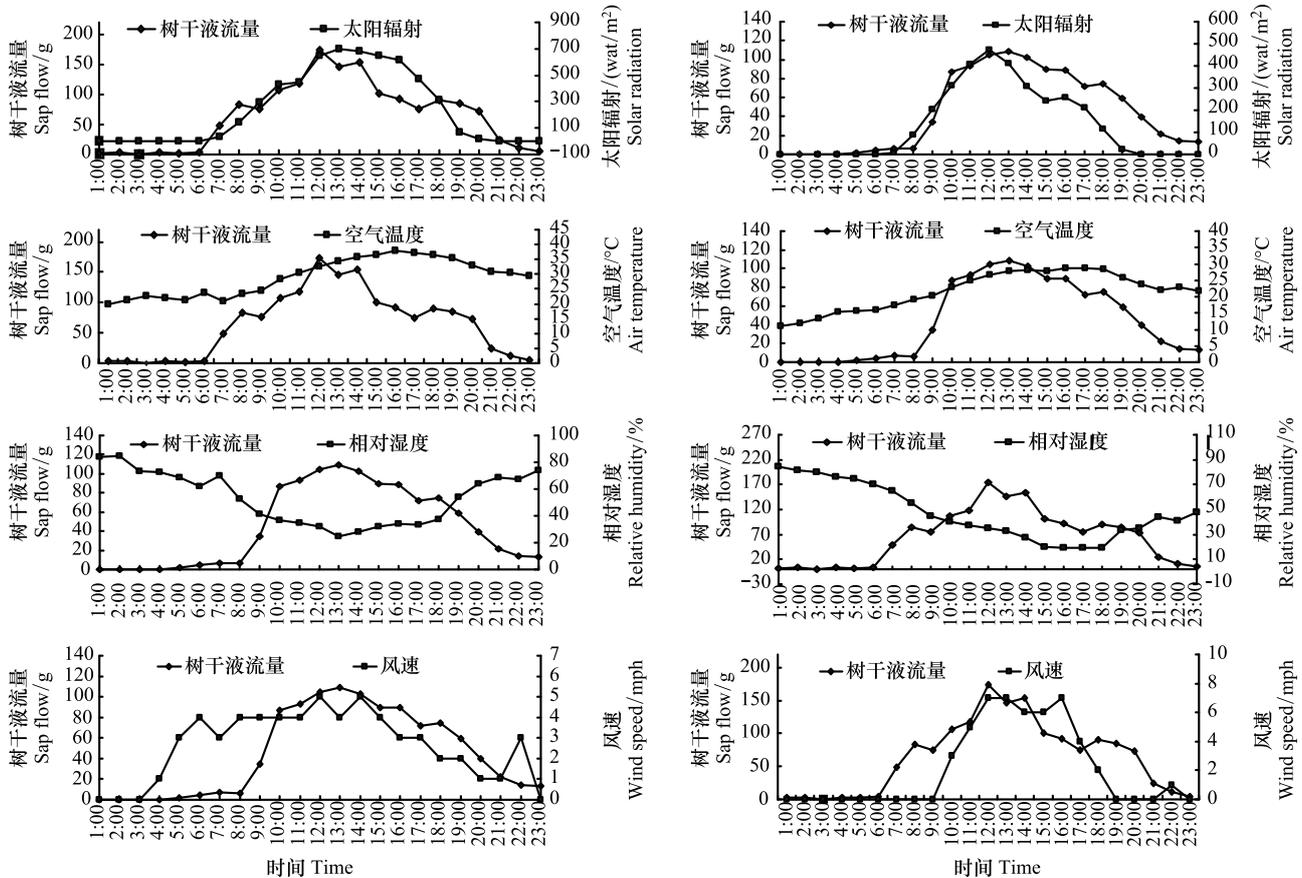


图 6 枸杞树干液流速率与气象因子的日变化过程(左侧:8月10日;右侧9月10日)

Fig.6 Diurnal variation of sap flow velocity and meteorological factors(left:1<sup>st</sup> August; right:1<sup>st</sup> September)

### 3.3.2 枸杞树干液流与气象要素的回归分析

依据 T1 树干液流数据及相应时间段的气象资料(太阳辐射、相对湿度、气温)以及计算出的饱和水汽压进行回归性分析,从图 7 中可以看出树干液流与太阳辐射及饱和水汽压差均符合二次多项式关系,与空气温度符合三次多项式关系,与相对湿度符合指数关系。以太阳辐射(S)、温度(T)、相对湿度(H)及饱和水汽压(VPD)为自变量,枸杞树干液流(F)为应变量,进行多元回归分析,获得拟合方程  $F = 41.5 + 0.167S - 0.563H + 1.36T - 9.67VPD$  ( $R^2 = 0.6547$ ),并以 8 月 1 日及 8 月份数据作为校核系列,绘制实测值及模拟值的日过程及月过程(图 8),从图 8 中可以看出模拟方程模拟的树干液流值与实测值较为接近,综合误差为 3.46%。

## 4 结论与讨论

以宁夏为靶区,以大田滴灌枸杞为研究对象,利用包裹式树干液流监测技术获取枸杞全生育期树干液流实时数据,利用自动气象站获取相应时间的气象参数数据,对不同时间尺度和不同茎粗枸杞树干液流变化特征及各气象要素对树干液流的影响进行了研究。主要得出以下结论。

(1) 6—8 月枸杞的旺盛生长季,平均日均耗水量为 1388.3g/d,5—11 月全生育期日均耗水量 1102.7g/d。降水影响了树干液流的蒸散,枸杞平均树干液流速率以盛果期最大,营养生长期最小。

(2) 夏季枸杞树干液流启动时间为早晨 6:00 比秋季提前 1 个小时左右,出现在午后 13:00,秋季在 12:00

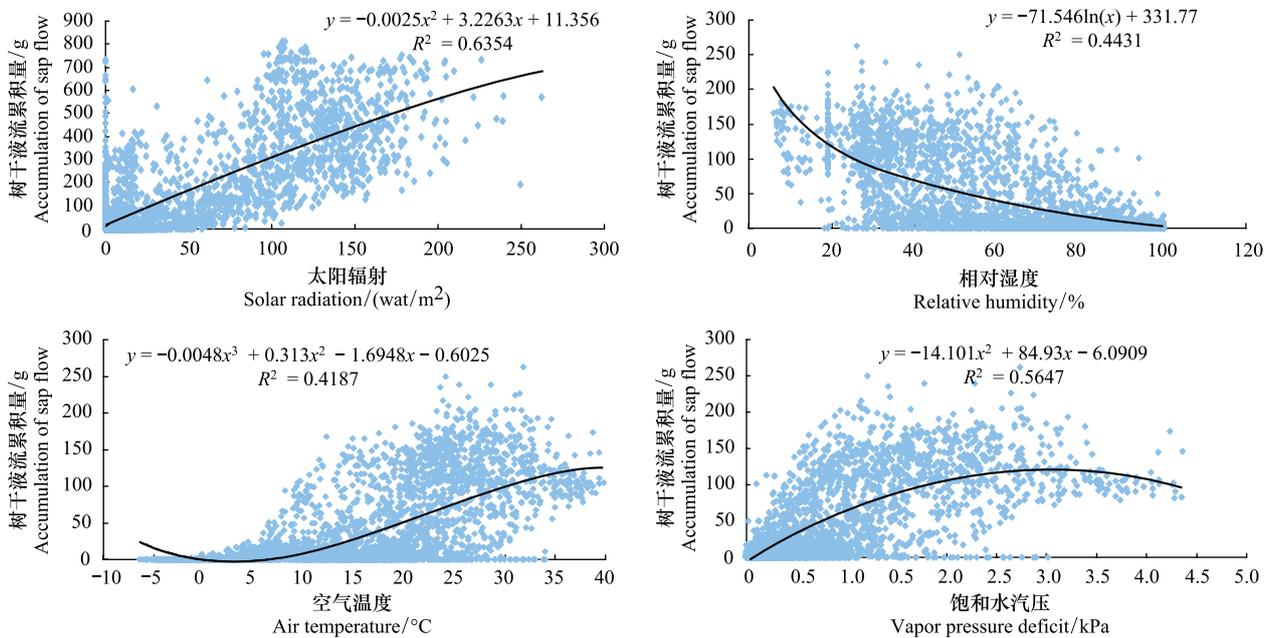


图7 各气象参数与树干液流的散点图

Fig.7 A scatter diagram for sap flow velocity and meteorological factors

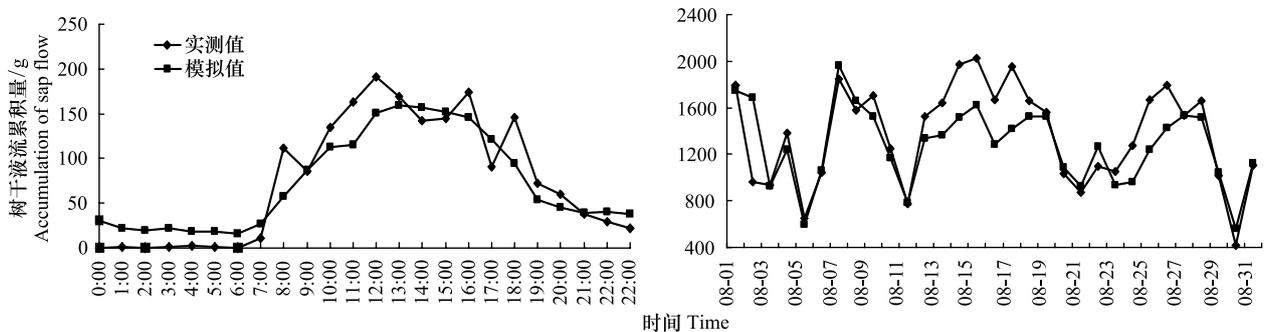


图8 各气象参数与树干液流的回归分析模拟校核图

Fig.8 Regression model of sap flow velocity and meteorological factors simulation and fitting

达到峰值,此后维持平稳至 16:00 逐渐降低,夏季变化幅度大于秋季。

(3) 天气情况对枸杞树干液流速率及日累积量影响显著,晴天树干液流速率及日累积量均最大,阴天次之,降雨天气最小。晴天液流速率变化曲线且呈宽峰型,在 06:30 左右启动,11:00—15:00 时段液流保持在较高水平;阴天液流速率变化曲线变化相对平缓,启动时间较晴天滞后 30min。

(4) 枸杞的树干液流量昼夜差异大,夜间(20:00—8:00)液流量仅为日累计量的 6.68%—8.15%,同时还出现午间有液流骤减现象,分析其原因可能是由于午间气温较高,干旱区植物为了保存体内的水分,短暂关闭或减小叶片气孔,降低植物体水分蒸腾,以减少水分损耗的一种机制。

(5) 气象要素对树干液流的变化影响显著,树干液流速率与太阳辐射、空气温度及风速之间均呈显著正相关关系,与相对湿度呈显著负相关关系,相关系数为  $-0.272$  ( $P = 0.001$ )。枸杞树干液流( $F$ )与太阳辐射( $S$ )、温度( $T$ )、相对湿度( $H$ )及饱和水汽压( $VPD$ )符合方程  $F = 41.5 + 0.167S - 0.563H + 1.36T - 9.67VPD$  ( $R^2 = 0.6547$ ),且模拟综合误差为 3.46%。

树干液流作为植物蒸散作用的水分来源,是植物水分消耗的直观量化监测指标,对于树干液流的研究,为明晰植物耗水规律,耗水影响因素极为重要,也为深入探讨不同作物在不同环境条件下的需水特征提供了重

要手段。而如何探明植物叶片的各项生理指标与树干液流变化的关系,并使其量化;如何明确植物光合作用、树干液流以及小气候要素间的相互关系,构建多元模拟模型,使其成为准确诊断作物需水的信号将是未来的研究热点。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 张继澍. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [ 2 ] Granier A, Bobay V, Gash J H C, Gelpe J, Saugier B, Shuttleworth W J. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 513(3/4): 309-319.
- [ 3 ] Lapitan R L, Parton W J. Seasonal variabilities in the distribution of the microclimatic factors and evapotranspiration in a shortgrass steppe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 79(1/2): 113-130.
- [ 4 ] Baker J M, Van Bavel C H M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant, Cell & Environment*, 1987, 10(9): 777-782.
- [ 5 ] 赵春彦, 司建华, 冯起, 鱼腾飞, 李炜. 胡杨 (*Populus euphratica*) 树干液流特征及其与环境因子的关系. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 718-724.
- [ 6 ] 于萌萌, 张新建, 袁凤辉, 何秀, 关德新, 王安志, 吴家兵, 金昌杰. 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. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1707-1714.
- [ 7 ] 吉春容, 邹陈, 范子昂, 李新建. 天山中段雪岭云杉树干液流变化及其与气象因子的关系. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(12): 119-123.
- [ 8 ] 白岩, 朱高峰, 张琨, 马婷. 敦煌葡萄酒液流特征及耗水分析. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 175-181.
- [ 9 ] 刘鑫, 张金池, 庄家尧, 顾哲衍, 韩诚, 吴雁雯. 杉木幼树树干液流影响因子及其对杉木林蒸腾量的贡献. *水土保持通报*, 2014, 34(6): 73-78.
- [ 10 ] Yunusa I A M, Walker R R, Loveys B R, Blackmore D H. Determination of transpiration in irrigated grapevines: comparison of the heat-pulse technique with gravimetric and micrometeorological methods. *Irrigation Science*, 2000, 20(1): 1-8.
- [ 11 ] 张志山, 张小由, 谭会娟, 何明珠, 郑敬刚, 李新荣. 热平衡技术与气孔计法测定沙生植物蒸腾. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 60-66.
- [ 12 ] 王力, 王艳萍. 黄土塬区苹果树干液流特征. *农业机械学报*, 2013, 44(10): 151-158.
- [ 13 ] 朱亚, 吕光辉, 胡颖颖, 杨晓东, 冉启阳. 艾比湖自然保护区胡杨树树干液流特征研究. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(11): 69-73.
- [ 14 ] 刘温泉, 潘存德. 不同天气条件下‘库车白杏’树干液流变化规律及其与环境因子的关系. *中国农学通报*, 2014, 30(31): 14-18.
- [ 15 ] 党宏忠, 杨文斌, 李卫, 刘世增, 张友焱. 新疆杨树树干液流的径向变化及时滞特征. *生态学报*, 2015, 35(15), doi: 10.5846/stxb201401060046. (未出版刊物)
- [ 16 ] 张俊, 李晓飞, 李建贵, 王华, 黄春堂, 闵首军, 李刚, 张福海, 田旭, 孔军. 干旱荒漠区银白杨树树干液流动态. *生态学报*, 2013, 33(18): 5655-5660.
- [ 17 ] 李妙伶, 周宏飞, 孙鹏飞. 准噶尔盆地南缘梭梭树干液流规律比较. *干旱区研究*, 2012, 29(1): 101-108.
- [ 18 ] 池波, 蔡体久, 满秀玲, 李奕. 大兴安岭北部兴安落叶松树干液流规律及影响因子分析. *北京林业大学学报*, 2013, 35(4): 21-26.
- [ 19 ] 李少宁, 陈波, 鲁绍伟, 潘青华, 张玉平, 王华. 月尺度下杨树树干液流对环境因子的响应. *西北林学院学报*, 2013, 28(3): 40-45, 52-52.
- [ 20 ] 杨广远, 张涛, 戴锋, 赵明水, 蒋文伟. 天目山柳杉树干液流春秋特征及影响因素分析. *西北林学院学报*, 2013, 28(2): 8-14.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T19742—2005 原产地域产品 宁夏枸杞. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [ 23 ] 张元缘. 打造枸杞产业链 构建多赢新格局. [2011-03-04]. <http://finance.ce.cn/rolling/201103/04/t20110304-16548995.shtml>. (请核对链接网址)
- [ 24 ] Amagase H, Farnsworth N R. A review of botanical characteristics, phytochemistry, clinical relevance in efficacy and safety of *Lycium barbarum* fruit (Goji). *Food Research International*, 2011, 44(7): 1702-1717.
- [ 25 ] Amagase H, Sun B X, Borek C. *Lycium barbarum* (goji) juice improves in vivo antioxidant biomarkers in serum of healthy adults. *Nutrition Research*, 2009, 29(1): 19-25.
- [ 26 ] 梁海永, 刘兴菊, 杨敏生. 利用 RAMP-PCR 技术对枸杞 10 个品种资源的分析. *中国农学通报*, 2011, 27(16): 61-64.
- [ 27 ] 高淑敏. 几种栽培因素对菜用枸杞硬枝扦插成活率的影响研究. *现代农业科技*, 2011, (17): 124-125.
- [ 28 ] 张萍, 郑国琦, 郑国保, 张源沛, 许兴. 亏缺灌溉对枸杞果实糖积累和蔗糖代谢相关酶活性的影响. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 160-163.
- [ 29 ] 赵游丽, 冯美, 康建宏. 不同温度处理对采后枸杞果实呼吸强度和品质的影响. *农业科学研究*, 2010, 31(4): 34-36.
- [ 30 ] 刘奉觉, 郑世楷, 巨关升, Wm E, 吴衍德. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究. *林业科学*, 1997, 33(2): 117-125.