

阿克苏地区井式灌溉方式下枣树茎流变化

刘帮¹, 李宏^{2*}, 张志刚¹, 程平², 王真真¹, 武钰³, 苗乾乾¹, 韩莹莹³

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

3. 新疆师范大学,新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要:采用美国 Dynamax 公司生产的 Flow-32 包裹式茎流计和 HOBO 小气候仪对阿克苏地区幼龄枣树的茎流速率以及气象因素进行连续测定,选取晴天与阴雨天 2 种典型天气条件,探究在新型节水方式—林木井式节水灌溉方法下,枣树茎流速率连日变化情况,日变化情况以及茎流速率与气象因素之间的关系。研究表明:枣树茎流速率连日变化中均呈现明显的昼夜变化规律,且有时夜间仍存在较低的茎流值;晴天条件下,茎流速率呈单峰型曲线,阴雨天条件下,茎流速率呈现不规则多峰型曲线;2 种典型天气下,枣树日累积茎流量变化过程曲线均呈现明显的“S”形,日累积茎流量晴天>阴雨天;通过枣树茎流速率与气象因素的相关分析可得,枣树茎流速率与太阳辐射及温度都存在明显的正相关性,相关系数晴天条件下分别为:0.932、0.874,阴雨天条件下分别为 0.689、0.597;晴天条件下枣树茎流速率与空气湿度呈现负相关性相关系数为 -0.852;2 种典型天气条件下茎流速率与太阳辐射相关性最显著。

关键词:阿克苏;幼龄枣树;茎流速率;气象因素;天气条件

中图分类号:S718.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)03-0054-07

Sap Flow Variations of Jujube Tree under Pit Irrigation

LIU Bang¹, LI Hong^{2*}, ZHANG Zhi-gang¹, CHENG Ping², WANG Zhen-zhen¹,
WU Yu³, MIAO Qian-qian¹, HAN Ying-ying³

(1. Forestry and Horticulture College, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 3. Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract:By employing the wrapped stem sap flow meter (Flow-32) and HOBO microclimate instrument, the stem sap flow rate and meteorological factors of jujube seedlings growing in Aksu were measured continuously in two typical weather conditions: sunny and rainy days to explore the variations of seedling sap flow rate under the pit irrigation condition. It was observed that jujube sap flow rate demonstrated a significant circadian variation. However, low stem sap flow could still be measured at night occasionally. Under sunny days, the stem sap flow rate curve showed a single peak, while irregular multimodal curve was observed in rainy days. In both typical weather conditions, the variation of the flow rate was a typical “S” shaped. The daily cumulative amount of sap flow in sunny days was more than that in rainy days. Correlation analysis showed that the sap flow rate was positively correlated to solar radiation and temperature, with correlation coefficients of 0.932, 0.874 in sunny days, and 0.689 and 0.597 in rainy days. The sap flow rate was negatively correlated to air humidity, with a coefficient of -0.852. The correlation of sap flow was the most significant with solar radiation under two typical weather conditions.

Key words:Aksu area; young jujube; stem the flow rate; meteorological factor; weather condition

收稿日期:2014-09-11 修回日期:2014-11-18

基金项目:林业公益性行业科研专项(201304701-2)。

作者简介:刘帮,男,在读硕士,研究方向:森林培育和经济林高效栽培。E-mail:bangliu1989@126.com

*通信作者:李宏,男,研究员,博士生导师,研究方向:森林培育。E-mail:hong1962@126.com

随着阿克苏地区红枣(*Zizyphus jujuba*)种植业的大力发展,红枣种植业逐渐成为该地区农业经济的主要支柱产业。阿克苏温宿县地处塔里木盆地边缘,干旱少雨,水资源短缺将成为该地区农业及社会经济可持续发展面临的重要问题。由于现行农林业灌溉方式,对水资源浪费较大,因此寻找新的节水灌溉方法势在必行。茎流指植物由蒸腾作用在体内引起的上升液流,与蒸腾存在着必然的联系^[1-2]。植物根部吸收水分的99%以上主要用于蒸腾耗散^[3],因此,掌握植物茎流变化有助于研究植物蒸腾耗水。植物耗水主要通过蒸腾作用,茎流计发明之前,国内外学者测定蒸腾量一般采用快速称重法、大型蒸渗仪法和叶室法^[3-7]等,但上述方法不仅操作复杂、不能持续观测蒸腾量变化,而且很难代表农田小气候及作物生长发育情况。随着研究的深入,国内外学者目前利用热技术法测定植物蒸腾耗水^[4-5],包裹式茎流计就是在此基础上发展而来,采用能量平衡原理,经不同学者的改进与完善^[6-7],通过测量树液流动时产生的热量变化,从而确定植物茎流和植物水分消耗,此方法不仅可以实时测量植物茎流变化,直接得到蒸腾读数,而且对植物本身无伤害。本研究是在一种新型节水方式—林木井式节水灌溉方法下^[8],采用美国Dynamax公司生产的Flow-32包裹式茎流计测定枣树茎流速率,并同步获取气象数据,分析枣树茎流速率在此种灌溉方式下的变化规律以及与气象因素之间的关系,为新型节水灌溉方式下,枣树蒸腾耗水规律提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地在新疆林科院所属试验基地佳木试验站(80°32'E, 41°15'N),位于新疆阿克苏地区温宿县内。属温带大陆性气候,光照时间长、昼夜温差大,年日照时数为2 747 h,总辐射量6 000 MJ·m⁻²,海拔高度1 103.8 m,气温年变化明显,全年无霜期为183~227 d,年平均气温为9.9℃~11.5℃,极端低温-27.4℃,年降水量42.4~94 mm,年蒸发量2 956.3 mm,浅层地下水位3.3 m,试验基地呈长方形,地势为北高南低,西高东低,南北长1 600 m,东西长650 m,试验样地在该试验站东侧,样地土壤类型为沙性壤土。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 选取样地面积为20 m×20 m,红枣种类为灰枣(*Ziziphus jujuba* cv. *Huizao*),选择3~5株生长良好,主干通直且符合茎流计传感器

规格的幼龄健康红枣(地径3±0.3 cm)作为试验对象。样地灌溉方式采取林木井式节水灌溉方法。根据幼龄红枣根系分布区情况^[9],在树行方向,距离样树10 cm处安装一个内径和高分别为10 cm和20 cm的带孔竖直井管,供水系统采用常规滴灌系统,滴头流量为12 L·h⁻¹,用长约10~15 cm的盲管将水引入井管内,每次灌水为60 L,通过由Decagon公司生产的ECH₂O土壤水分传感器对土壤的体积含水量进行观测,当土壤体积含水量下降到12%~15%(田间持水量60%)时进行下一次灌水。为防止样地外其他作物灌溉对其影响,在样地四周挖2 m的深沟,用塑料薄膜隔开,并在四周做垄,防止灌溉渗漏进入样地。样地内除灌水方式不同外,其余均按照当地习惯统一管理。

1.2.2 茎流测定 采用美国Dynamax公司生产的Flow-32包裹式茎流计对幼龄红枣进行茎流速率的测定,茎流计工作原理为能量平衡原理^[6-7,10],即当茎流计的传感器以恒定的功率输入热量(Pin)时,在输入热量不考虑茎干本身热容量的情况下,等于各部分耗散热量(QF、Qv、Qr)之和。表达式为:

$$Pin = QF + Qr + Qv \quad (1)$$

式中,QF:茎流带走的热量,Qr:向茎干四周散发的热量,Qv:沿茎干方向传输的热量。

$$Qr = Ksh \times CH \quad (2)$$

式中,Ksh为护套的导热系数,即当植物茎干茎流值为0时,通过能量平衡表达式计算得到,Ksh=(Pin-Qv)/CH。CH为Qr的热电堆电压(v)。

沿茎干方向传输的热量Qv由欧姆定律Pin=V²/R可得,Qv包括向上热交换热量Qu和向下热交换热量Qd2部分。由Fourier定理可知:

$$Qu = Kst \times A \times dTu/dx \quad (3)$$

$$Qd = Kst \times A \times dTd/dx \quad (4)$$

式中,Kst为茎干热传导率(W·m⁻¹·K⁻¹),不同植物的Kst不同,木本、草本和空心植物的Kst为分别为0.42、0.54和0.28 W·m⁻¹·K⁻¹,枣树为木本植物,Kst为0.42 W·m⁻¹·K⁻¹;A为茎干的横截面积(m²);dT_u/dx与dT_d/dx代表温度梯度(℃·m⁻¹),即:向上热传导时的温度梯度和向下热传导时的温度梯度;dx为2个热电偶节点处的距离(m);

通过上述一系列计算公式可得茎流速率表达式为:

$$F = (P_m - Q_v - Q_r) / C_p \times dT \quad (5)$$

式中,C_p为水的比热容4.168 J·g⁻¹·℃⁻¹;dT为上下茎干水流温度的变化值(℃)。

安装与数据采集: 测量茎流前, 首先在样树安装传感器部位, 用刮刀等工具去除树干外部的死去表皮, 然后用细砂纸打磨光滑, 并用游标卡尺准确测量安装传感器处的直径, 接下来根据传感器规格, 所选样树均采用 SGB25 型号传感器, 按照传感器的包裹要求, 对样树进行包裹(包裹过程中, 一定要仔细认真, 防止因密封不实引起的测量不准确), 最后把传感器与数据采集器对接, 并通过电脑对数据采集器进行程序设定, 茎流数据采集时间间隔为 10 min。

1.2.3 其他因子的测定 样地内安装 HOBO 小气候仪, 对枣园的气象因素进行测定, 主要包括: 太阳辐射、空气湿度、温度、风速, 数据采集时间间隔 10 min。

1.2.4 数据处理与分析 通过笔记本电脑与主机箱连接, 利用美国 Dynamax 公司提供的 PC400 软件下载茎流数据, 并将 3 株样树的茎流速率进行平均, 计算出每天每 10 min 的平均茎流速率, 采用 Excel 2007 和 SPASS 18.0 软件, 对试验对象幼龄枣树(地径 3±0.3 cm)的试验数据进行分析处理。

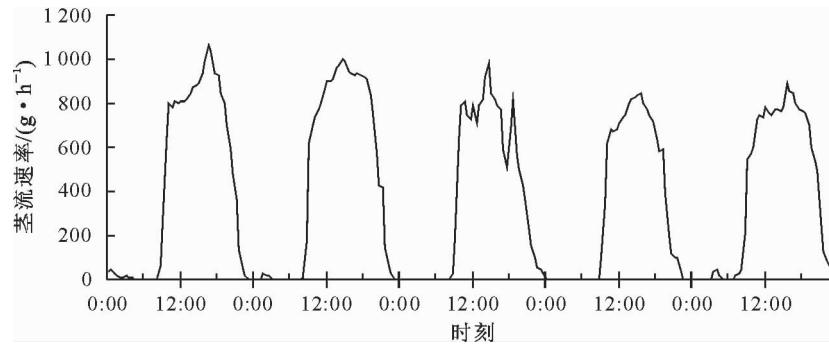


图 1 枣树茎流速率连日变化(6月 23 日—6月 27 日)

Fig. 1 Jujube tree sap flow rate variations (June 23—June 27)

2.2 枣树茎流速率日变化特征

在枣树生长季中选取 2 种典型天气条件, 即: 晴天与阴雨天。在晴天(06-24、07-02 与 07-03)条件下, 枣树茎流速率表现出明显地昼夜变化规律, 均呈现出典型的单峰曲线。茎流速率启动时间为 8:00、8:30 与 6:30, 随着太阳辐射强度的增大、空气温度增高、相对湿度减小, 植物蒸腾速率加大, 枣树茎流速率也迅速加大, 茎流速率增大幅度最大出现在 8:30~9:30 之间, 茎流速率达到峰值时间在 14:30~15:30 之间, 峰值在 843.80~995.54 g·h⁻¹ 之间, 茎流速率停滞 06-24 为 23:00、07-02 为 22:30, 07-03 直至 24:00 仍然有茎流速率(图 2)。

在阴雨天(07-22、07-23 与 07-26)条件下, 枣树茎流速率虽也表现出明显地昼夜变化规律, 但日变化曲线与晴天不同, 均呈现出不规则的多峰曲线(图

2 结果与分析

2.1 枣树茎流速率连日变化

试验期间 6 月 23 日(06-23)—06-24, 06-26—06-27 晴天, 06-25 阴天, 枣树茎流速率连日变化情况曲线(图 1)可以看出, 枣树茎流速率连日变化规律基本相同, 均呈现明显的昼夜变化规律, 晴天茎流速率略大于阴天。除 06-25 外, 枣树茎流速率日变化均呈单峰型曲线, 白天茎流速率大, 夜晚茎流速率小; 清晨启动时间较早, 晚上停滞较晚; 0:00~8:00 间枣树茎流速率为一天内最低状态, 甚至茎流速率为 0。以 06-24 为例, 枣树茎流日变化凌晨 1:30~2:30 存在较小的茎流速率。茎流启动时间为清晨(7:30~8:30), 茎流启动后速率迅速开始增大, 8:30~9:00 茎流速率增加最快, 14:30 茎流速率达到峰值, 19:30~20:00 枣树茎流速率开始迅速下降, 23:30 茎流速率降到较低状态。每天枣树茎流速率活动达 14 h 之久, 耗水为 10.564 L。

2)。茎流速率启动时间较晴天晚, 在 8:30~9:30 之间, 白天的茎流速率低于晴天, 夜间 21:30~22:30 茎流速率降低, 但 22:30 之后仍有较小的茎流速率。

典型天气条件下枣树日累积茎流量变化研究以 06-24(晴天)与 07-22(阴雨天)为例, 两天的枣树日累积茎流量变化过程曲线均呈现明显的“S”形(图 3)。晴天条件下, 在 0:00~7:30 间, 仅 1:30~2:30 间枣树日累计茎流量出现变化, 由于气候干旱, 植物白天耗水严重, 晚上需在根压的作用下, 吸收水分来维持自身生理活动需要; 早晨枣树日累积茎流量变化启动时间为 7:30, 随太阳辐射的增加上升速度逐渐增大, 直至 20:00 上升速度趋于平缓, 23:30 停止, 全天枣树日累积量为 10 564.94 g; 阴雨天条件下, 在 0:00~7:30 间, 0:00~5:00 枣树日累积茎流量都有变化, 且变化较明显, 早晨枣树日累积茎流量

变化启动时间为 9:30,较 06-24 晚近 2 h,之后变化趋势与 06-24 相似,22:30 停止,全天枣树日累积量

为 5 342.80 g。由此可知,典型天气条件下,枣树日累积茎流量变化过程存在显著差异。

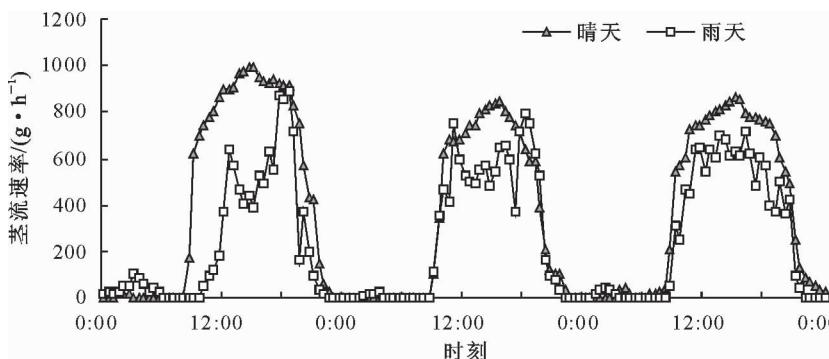


图 2 晴天(06-24,07-02,07-03)与阴雨天(07-22,07-23,07-26)茎流速率

Fig. 2 Sap flow rate on sunny days (June 24, July 02, July 03) or raining days (July 22, July 23, July 26)

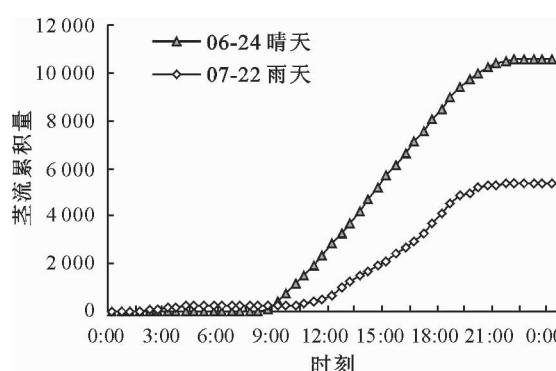


图 3 典型天气条件下的枣树日累积茎流量变化过程

Fig. 3 Cumulative stem flow change process under typical weather conditions

2.3 气象因素与茎流速率的关系

晴天条件下茎流速率与太阳辐射、温度、风速以及空气湿度的日变化曲线(图 4)可以看出,茎流速率与太阳辐射、温度日变化曲线波动趋势基本一致,且呈现较显著的正相关变化(表 1),即茎流启动后,随着太阳辐射的增强,茎流速率随之增大,温度也随之增高,但到达峰值时却存在着显著差异,太阳辐射峰值出现在 15:00,茎流速率峰值出现在 14:30~15:30 之间,温度峰值出现在 15:30~18:00 之间;茎流速率和空气湿度日变化曲线波动呈现负相关变化趋势,即随着茎流速率的增加,湿度却减小;茎流速率与风速日变化曲线波动趋势也呈现出一定的相似性,但变化趋势不明显。

阴雨天条件下茎流速率与太阳辐射、温度、风速以及空气湿度的日变化曲线(图 5)可以看出,相对于晴天条件下,阴雨天时,除茎流速率与太阳辐射以及温度的日变化曲线波动变化呈现正相关变化趋势外,曲线波动幅度较小且峰值也较低;空气湿度日变化曲线波动幅度较小,虽与茎流速率日变化曲线也呈现负相关变化趋势,但峰值却较高;风速日变化曲线存在

表 1 枣树茎流速率和气象因素的相关关系

Table 1 The correlation analysis between sap flow rate and meteorology factors

| 天气 | 太阳辐射 (W·m⁻²) | 温度 /℃ | 空气湿度 /% | 风速 (m·s⁻¹) |
|-----|-----------------|----------|------------|---------------|
| 晴天 | 0.779 ** | 0.573 ** | -0.541 ** | 0.531 ** |
| 阴雨天 | 0.689 ** | 0.597 ** | -0.454 ** | 0.244 ** |

N=145; ** p<0.01.

表 2 枣树茎流速率和气象因素的多元回归模型

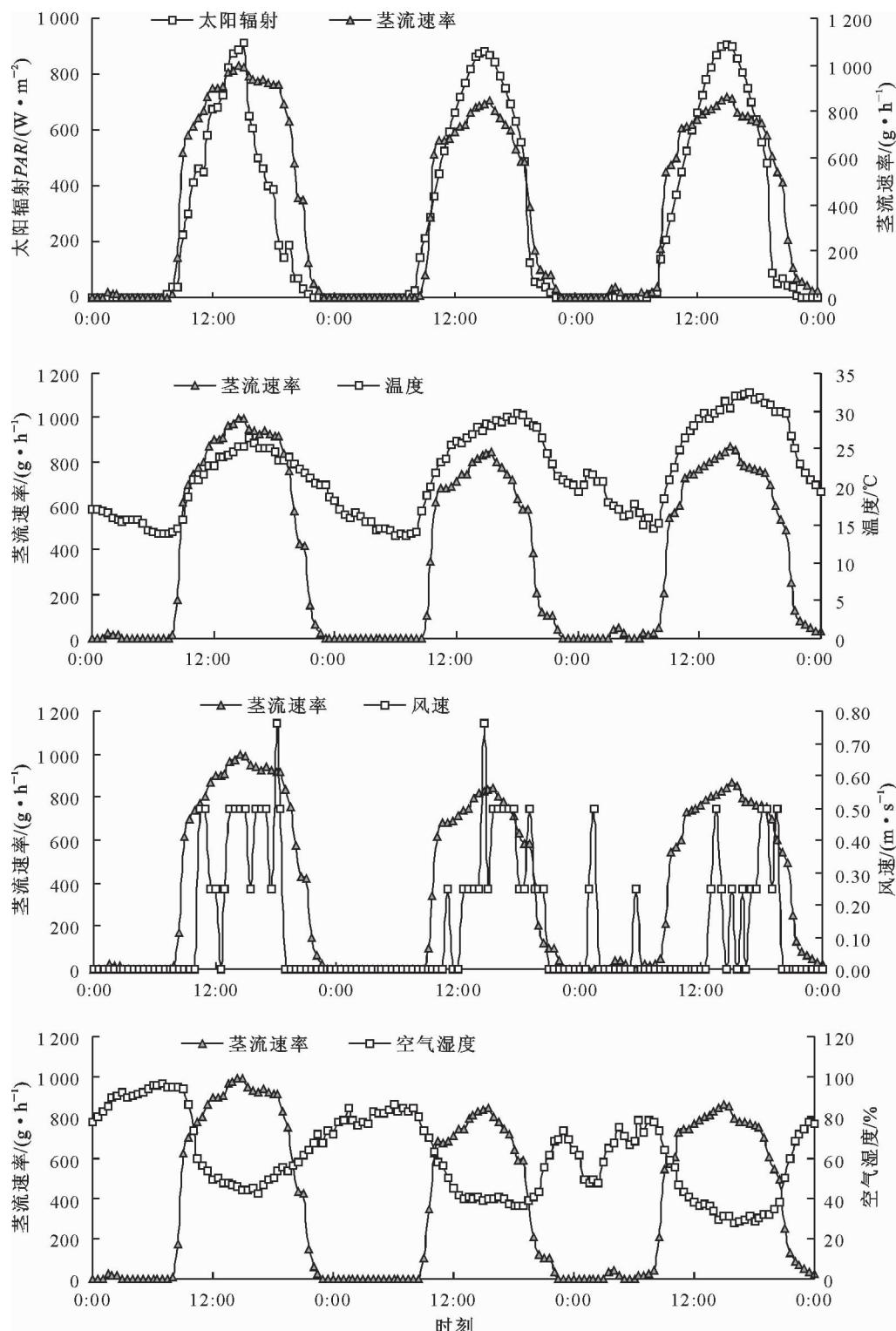
Table 2 Multiple linear model of meteorology factors with sap flow rate

| 天气 | 回归方程 | R ² |
|-----|--|----------------|
| 晴天 | $F = -553.708 + 0.586 X_1 - 73.088 X_2 + 29.560 X_3 + 1.074 X_4$ | 0.916 ** |
| 阴雨天 | $F = -870.741 + 0.725 X_1 + 6.430 X_2 + 43.985 X_3 + 0.729 X_4$ | 0.745 ** |

注: F: 茎流速率(g·h⁻¹); X₁: 太阳辐射(W·m⁻²); X₂: 风速(m·s⁻¹); X₃: 温度(℃); X₄: 空气湿度(%)。

3 结论与讨论

在新型灌溉方式—林木井式节水灌溉方法下,采用能量平衡原理的包裹式茎流计对幼龄红枣茎流



注：横坐标从左到右依次为 06-24, 07-02, 07-03 3 个晴天的数据。

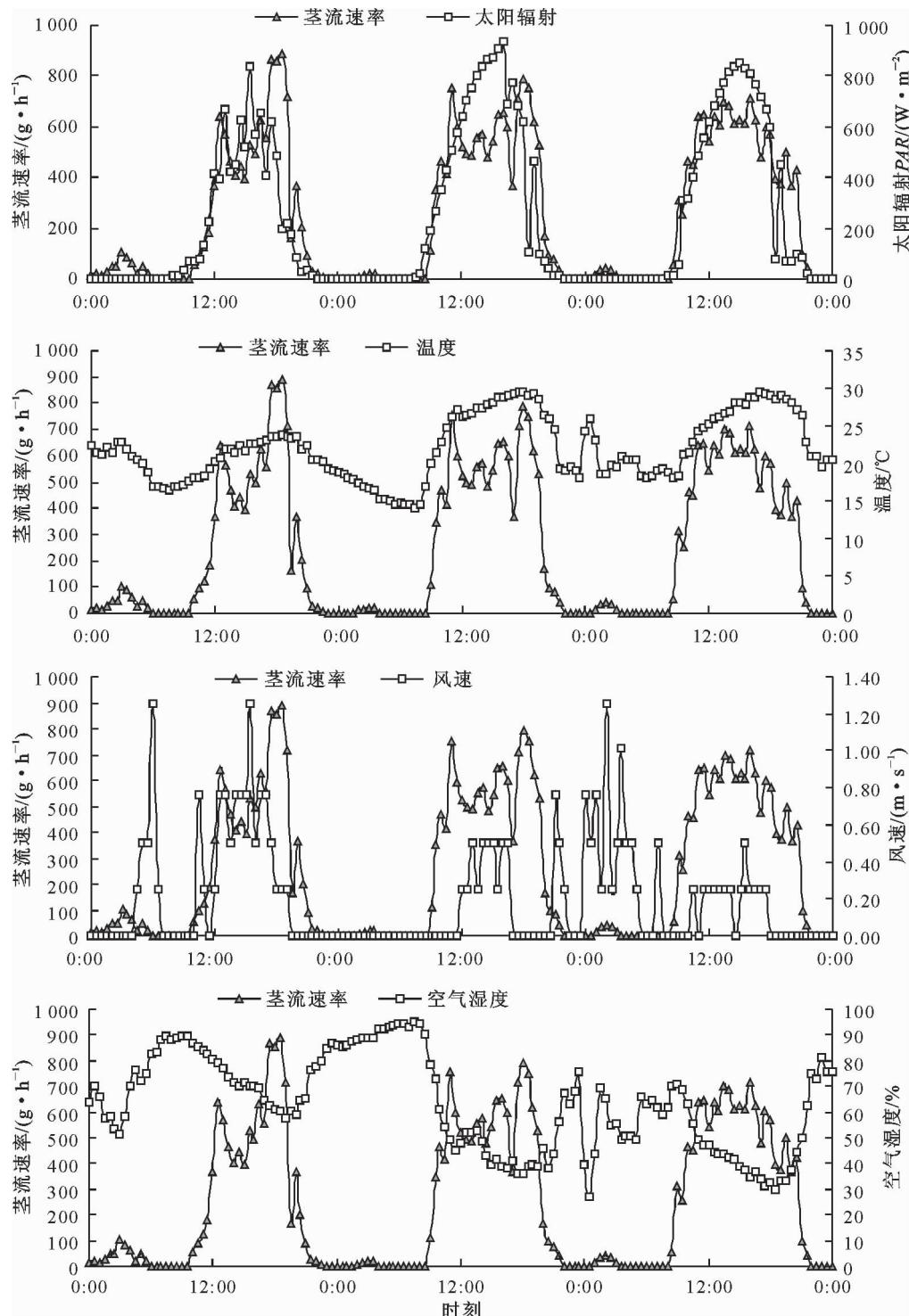
图 4 晴天条件下茎流速率与太阳辐射、温度、风速以及空气湿度的日变化曲线

Fig. 4 Diurnal variations of sap flow rate, solar radiation, temperature, wind speed and air humidity under sunny conditions

长时间连续定点观测研究表明，茎流速率连日变化均呈现明显的昼夜变化规律，白天茎流速率大，夜间茎流速率存在较小的茎流值或停滞。可能是由于在阿克苏地区干旱条件下，白天蒸腾作用强烈，造成植物体内水分失调，植物处于缺水状态，夜晚植物会在

根压的作用下进行吸水，以此来补充体内的水分亏缺^[10-13]。

植物茎流速率除与自身特性有关外，与气象因素也存在很多关系^[10-11, 14-20]。由于在林木井式节水灌溉方式下，能够很好的保持土壤水分含量，使植物



注:横坐标从左到右依次为 07-22, 07-23, 07-26 3 个阴天的数据。

图 5 阴雨天条件下茎流速率与太阳辐射、温度、风速以及空气湿度的日变化曲线

Fig. 5 Diurnal variations of sap flow rate, solar radiation, temperature, wind speed and air humidity under rainy conditions

得到较为充足的水分供应。因此,枣树茎流速率主要受到当地气象因素的影响。茎流速率受天气条件影响明显,两种典型天气条件下茎流速率日变化规律存在显著差异。阴雨天条件下,茎流速率均呈现出不规则的多峰曲线;晴天茎流速率启动时间早,茎流速率峰值高,日累计茎流量多。这可能是由于存在降雨使土壤湿度急增,白天太阳辐射低,气温也较

低,相对湿度较高,使树体与土壤之间存在比平时更大的水势梯度^[14-16],根系容易从土壤中吸收水分,以补充树体水分的不足。晴天条件下,茎流速率日变化规律呈现典型的宽型单峰曲线,这与田盼盼^[18]等研究结果相似。

2 种典型天气条件下枣树茎流速率与太阳辐射、温度日变化曲线波动趋势基本一致且均呈现正

相关变化,但晴天条件下曲线波动趋势较显著;茎流速率与空气湿度日变化曲线波动均呈现负相关变化趋势;2种天气条件下枣树茎流速率与太阳辐射以及温度存在明显的正相关性,其中茎流速率与太阳辐射相关性最显著,但晴天条件下茎流速率与空气湿度呈现明显的负相关性;利用多元回归的方法建立枣树茎流速率和气象因素的相关性回归模型,经过回归系数和相关系数检验,回归系数均达到显著水平。相关性回归模型的建立可以为研究在林木井式灌溉方式下枣树的耗水量提供一定的依据,对这种新型节水灌溉方式的研究提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] ALLEN S J, GRIME V L. Measurements of transpiration from savannah shrubs using sap flow gauges [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 75(1/3): 23-41.
- [2] NAGLER P L, GLENN E P, THOMPSON T L. Comparison of transpiration rates among salt cedar, cotton wood and willow trees by sap flow and canopy temperature methods [J]. Agriand for Meter, 2003, 116(1/2): 73-89.
- [3] 李德全.植物生理学[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [4] 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):585-590.
ZHANG X Y, GONG J D, ZHOU M S, et al. A study on the stem sap flow of *Populus euphratica* and *Tamarix* spp by heat pulse technique [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(5): 585-590. (in Chinese)
- [5] 白云岗,宋郁东,周宏飞,等.应用热脉冲技术对胡杨树干液流变化规律的研究[J].干旱区地理,2005,28(3):373-376.
- [6] 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):102-108.
YUE G Y, ZHANG T H, LIU X P, et al. Development and application of thermal methods in measuring stem sap flow[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(8): 102-108. (in Chinese)
- [7] 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.
LONG Q B, JIA S F. Review on the development and application of sap flow gauge[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(4): 18-23. (in Chinese)
- [8] 李宏.林木井式节水灌溉方法[P].2012103114848.2
- [9] 李宏,杨婵婵,郭光华,等.幼龄期红枣根系生物量空间分布特征[J].中南林业科技大学学报,2013,33(5):59-64.
LI H, YANG C C, GUO G H, et al. Spatial distribution characteristics of root system biomass of *Ziziphus jujube* in juvenile phase[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2013, 33(5): 59-64. (in Chinese)
- [10] 徐先英,孙保平,丁国栋,等.干旱荒漠区典型固沙灌木液流动变化及其对环境因子的响应[J].生态学报,2008,28(3): 895-905.
XU X Y, SUN B P, DING G D, et al. Sap flow patterns of three main sand-fixing shrubs and their responses to environmental factors in desert arers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 895-905. (in Chinese)
- [11] 马长明,刘广营,张艳华,等.核桃树干液流特征研究[J].西北林学院学报,2010,25(2):25-29.
MA C M, LIU G Y, ZHANG Y H, et al. Stock sap flow characters of *Juglans regia*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(2): 25-29. (in Chinese)
- [12] 许浩,张希明,王永东,等.塔里木沙漠公路防护林乔木状沙拐枣耗水特性[J].干旱区研究,2006,23(2):216-222.
- [13] 冯金朝,刘新民.干旱环境与植物的水分关系[M].北京:中国环境科学出版社,1998:45-46.
- [14] 于红博,杨勘,臧春鑫,等.皇甫川流域中国沙棘树干液流日变化及其相关因子[J].生态学杂志,2008,27(7):1071-1076.
YU H B, YANG J, ZANG C X, et al. Diurnal variation of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi stem sap flow in Huangfuchuan Basin and related environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27 (7): 1071-1076. (in Chinese)
- [15] 许浩,张希明,阎海龙,等.塔克拉玛干沙漠腹地多枝柽柳茎干液流及耗水量[J].应用生态学报,2007,18(4):735-741.
XU H, ZHANG X M, YAN H L, et al. Stem sap flow water consumption of *Tamarix ramosissima* in hinterland of Taklimakan[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18 (4): 735-741. (in Chinese)
- [16] 陈婧,马履一,段勘,等.不同环境因子对黄连木1年生苗耗水规律的影响[J].西北林学院学报,2014,29(2):6-11.
CHEN J, MA L Y, DUAN J, et al. Effects of different environmental factors on water consumption of one-year-old *Pistacia chinensis* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2): 6-11. (in Chinese)
- [17] 岳广阳,张铜会,赵哈林,等.科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J].生态学报,2006,26(10):3205-3213.
YUE G Y, ZHANG T H, ZHAO H L, et al. Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejevii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3205-3213. (in Chinese)
- [18] 赵奎,丁国栋,吴斌,等.宁夏盐池毛乌素沙地柠条锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J].干旱区研究,2009,26(3):390-395.
- [19] 田盼盼,董新光,刘峰,等.干旱区枣树蒸腾规律及其与气象要素的关系[J].水资源与水工程学报,2012,23(2):86-89.
TIAN P P, DONG X G, LIU F, et al. Relationship between jujube trees transpiration rule and weather factors in arid areas[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(2): 86-89. (in Chinese)
- [20] 夏桂敏,康绍忠,李玉成,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,2006,26(4):1186-1193.
XIA G M, KANG S Z, LI Y C, et al. Transpiration of *Hedysarum scoparium* in arid desert region of Shiyang River basin Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1186-1193. (in Chinese)