

半干旱黄土区山毛桃树干液流变化特征及其与环境因子的 相关分析

林琳,蔡国军*,莫保儒,李德丽,薛睿,柴春山

(甘肃省林业科学研究院,甘肃 兰州 730020)

摘要:以半干旱黄土区山毛桃为研究对象,开展树干液流和气象指标、土壤水分含量等环境因子监测,分析在不同时间尺度下液流速率与环境因子的相关性差异,确定主要影响因子,对于理解植物蒸腾对环境的响应机制和时间尺度转化具有重要的意义。结果表明,山毛桃液流速率呈明显的昼高夜低的变化规律,且在非降雨天主要受100 cm以下深层土壤水分影响,降雨过后则主要与100 cm和120 cm深度的土壤水分有关;在月尺度下,饱和水汽压差对于液流速率变化的贡献量达90.2%,是关键控制因子;在日尺度下,太阳辐射对液流速率的影响最大,其次是空气温度,贡献量所占比例分别为58.1%和14.4%;在小时尺度下,对5、6月液流速率的影响最大的环境因子是空气温度,7、8月是太阳辐射,而9月则是饱和水汽压差。研究认为,随着时间尺度的扩展,环境因子对山毛桃液流速率的控制影响愈加强烈。

关键词:液流;环境因子;时间尺度;山毛桃

中图分类号:S718.43

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)04-0018-09

Characteristics of Sap Flow and Correlation Analysis With Environmental Factors of *Prunus davidiana* in Semiarid Loess Area

LIN Lin, CAI Guo-jun*, MO Bao-ru, LI De-li, XUE Rui, CHAI Chun-shan

(Gansu Academy Forestry Sciences, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: Taking *Prunus davidiana* occurring in semiarid loess area as the research object, the tree sap flow and environmental factors were simultaneously monitored, such as meteorological indices and soil moisture. The relationship between the sap flow velocity and environmental factors at different time scales were analyzed. The key factors were determined. The significance of this study was to understand the response mechanism of plant transpiration to environment and time scale conversion. The results showed that the sap flow was generally high in the daytime and low at night. At monthly scale, the vapor pressure deficit dominated the temporal variations in sap flow and its contribution was 90.2%. At daily scale, the dominant factor was solar radiation, followed by temperature, the contribution rates were 58.1% and 14.4%, respectively. At hourly scale, air temperature was the dominant factor that determined sap flow in May and June, solar radiation was the dominant factor in July and August, and vapor pressure deficit was the dominant factor in September. The study suggests that with the expansion of time scale, the influence intensity of environmental factors on sap flow becomes more and more extensive.

Key words: sap flow; environmental factor; time scale; *Prunus davidiana*

收稿日期:2022-05-27 修回日期:2023-04-13

基金项目:草原生态修复治理科技支撑项目(LCJ20210027);国家自然科学基金委员会区域创新发展联合基金(U21A2005)。

第一作者:林琳,工程师。研究方向:干旱区生态学。E-mail:949485461@qq.com

*通信作者:蔡国军,研究员。研究方向:林业生态恢复。E-mail:cgj1665@163.com

半干旱黄土区是地球上降水量稀少,同时蒸发量巨大,从而导致土壤水分含量极小的生态脆弱区域之一^[1]。近50 a来,全球气候的变化和人类不合理的活动使得该区域水资源更加匮乏,生态环境愈加脆弱^[2-3]。植物蒸腾作用是植被水分吸收和利用的主要动力,对于植物生长所需的无机盐和矿物质运输、气体交换和缓解热胁迫具有重要意义^[4]。研究该区域典型植物液流动态变化及其与环境因子的相关性不仅可为树种栽植生长和区域水土保持提供科学指导,而且对于理解和预测陆地生态系统对于干旱环境的响应与调节机制有着非常重要的作用。

山毛桃(*Prunus davidiana*),又名野桃、山桃,蔷薇科李属桃亚属落叶小乔木,耐寒耐旱,适应性强。山毛桃根系发达,具有良好的固土保水能力,能有效防止水土流失,是半干旱地区常见的优良的水土保持树种^[5]。因此,研究该地区山毛桃的蒸腾耗散特征是科学合理经营管理人工林的重要基础。

植物主要通过蒸腾作用消耗水分,植物的耗水除了与自身特性有关外还会受到环境因子的影响^[6]。目前,有关液流对环境因子响应方面的研究较为丰富。例如,Huang等^[7]研究发现中国北方半干旱地区沙柳(*Salix psammophila*)的液流速率与太阳辐射强度和空气温度呈正相关,与相对湿度呈负相关;杨文新^[8]认为太阳辐射、空气温度、空气相对湿度对怪柳(*Tamarix chinensis*)液流密度影响较大;韩兆敏等^[9]认为干旱区油松(*Pinus tabulaeformis*)的液流速率表现为明显的单峰型昼夜变化,控制油松液流变化的主要环境因子依次是太阳辐射强度、空气相对湿度、空气温度和平均土壤温度;苏军德等^[10]认为气温是祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)树干液流的限制因子,而土壤含水量则与之无关。以上关于植物液流的研究多以小时为衡量尺度,探究植物液流速率与环境因子的相关性是否具有时间尺度效应,即影响液流速率变化的关键性环境因子在不同时间尺度下是否存在明显不同,尤其在环境极端复杂和液流速率对环境变化十分敏感的半干旱黄土区^[11]具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市岷口镇龙滩流域,地理坐标为104°27′—104°32′E,35°43′—35°46′N,面积16.12 km²,属于典型的半干旱黄土丘陵区。区域平均海拔为1 967~2 168 m,年平均气温6.8℃,年均降水量386.3 mm,平均无霜期152 d,平均日照2 052 h。研究区域内土壤主要为黄绵土,有机质

和土壤水分含量低,土壤贫瘠。天然植被主要是多年生草本植物,以赖草(*Leymus chinensis*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等草本为主,人工植被以侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、山毛桃(*Prunus davidiana*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等植物为主^[12-13]。

1.2 液流与环境因子监测

在研究区域内选择长势良好的山毛桃-苜蓿(*Medicago Sativa*)人工林设置固定观测样地,样地海拔2 088 m,半阳坡,上坡位,坡度15°,土壤类型为黄绵土,林龄约12 a,郁闭度0.2。从样地中选择生长状况良好、粗细适中、主茎通直、无分叉、无疤的9根枝条分别安装液流传感器,形态参数如表1所示。采用EMS32测定液流速率(S_F),为避免太阳辐射对探针温度的影响,探针统一安装在茎杆的北侧,用锡纸包裹住探头,并用透明胶带缠绕在锡纸上下两端,防止降雨对探针的影响^[14]。采用Mini32数据采集器,采集记录间隔时间为15 min。土壤含水量采用ThetaProbe ML2x土壤水分速测仪进行测定,每15 d测定1次,测定深度为200 cm,每20 cm为一个侧层,降雨后1~2 d进行加测。空气温度(T_a)、太阳辐射(R_a)、相对湿度(R_H)、风速(WS)、降雨量($Rain$)等环境因子均采用样地附近开阔地安装的自动气象站监测数据,数据采集时间与液流监测时间同步。为综合反映空气温度和湿度的协同效应^[15],选取饱和水汽压差(V_{PD})作为本研究的一项影响因子,计算方法如下

$$V_{PD} = E - E \times R_H / 100, E = \exp \left(\frac{17.27 T_a}{237.3 + T_a} \right) \quad (1)$$

表1 山毛桃形态参数

Table 1 Morphological parameters of *Prunus davidiana*

序号	茎干直径/mm	高度/cm
1	13.06	129
2	13.75	132
3	10.80	99
4	13.00	110
5	11.02	105
6	12.15	128
7	12.00	102
8	12.04	111
9	10.06	112

1.3 数据分析方法

在不同时间尺度上,采用Pearson相关分析法量化山毛桃液流速率与各环境因子之间的相关性。采用逐步回归分析法构建不同时间尺度下液流速率的回归方程,并根据决定系数(R^2)变化量来量化各环境因子对于液流速率的相对贡献,由此确定影响

半干旱黄土区山毛桃液流速率的主要控制因子。所有数据分析采用 SPSS26 软件完成,做图采用 origin2018 软件。

2 结果与分析

2.1 液流速率变化规律分析

2.1.1 山毛桃液流动态分析 将山毛桃生长季(5—9月)每日相同时刻的液流速率取平均值得到各月液流速率的日变化规律,如图1所示。由图1可以看出,日间液流速率明显大于夜间,整体上液流速率均呈“几”字形单峰型曲线,夜间液流变化幅度较小,但不为0,说明夜间存在微弱液流。这是由于半干旱黄土区降水量小而蒸发量大,植物体长期处于日间过度失水的状态,因此夜间仍需要补充大量的水分从而形成夜间液流。由于植物根压的作用,根系吸水方式由日间的被动吸水转变为夜间的主动吸水行为,通过产生一定的液流来弥补白天损失的大量水分^[16-17]。各月液流情况差异主要体现在启动时间、峰值大小和峰值持续时间上。5—7月液流启动时间大致相同,均在8:00左右,8、9月液流启动时间逐月推迟。就液流速率的峰值而言,各月基本都在13:00—15:00出现峰值,7月最高,6月次之,其余月份相对较低。有关液流速率峰值的持续情况,除9月外,其余各月液流速率峰值持续时间都基本较长。5月液流速率从12:00—16:00都基本稳定在峰值附近,6、7月液流速率在整个生长季中变化最大,在14:00分别达到峰值 $89.20 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $94.18 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$,随后开始缓慢下降,在17:00后迅速降低,与5月份情况相似,8月液流速率在相同时段也基本稳定在峰值附近,整体低于5月水平。9月经常有持续性降雨且降雨量明显较前几个月大,这可能是导致9月液流速率较小,且峰值维持时间较短的原因。

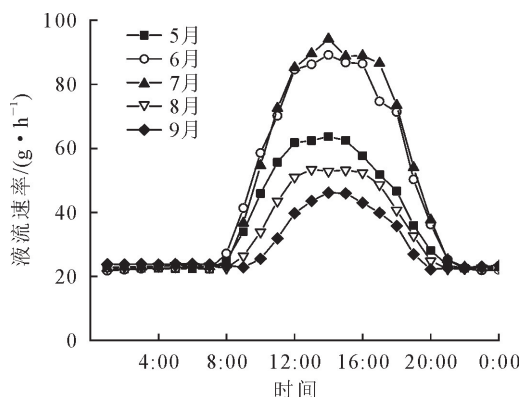


图1 山毛桃生长季月平均液流速率日变化情况

Fig. 1 Diurnal variation curve of stem flow of *P. davidiana* in growing season

2.1.2 降雨前后山毛桃液流和土壤水分含量动态变化 将典型降雨天时的液流速率和土壤水分含量与降雨前后连续3d的数据进行对比,分析降雨对于液流速率与土壤水分含量的影响。由图2可以看出,雨天时日间液流速率变化幅度较夜间不显著,降雨后土壤含水量增加,日间液流速率缓慢加强,雨后第2天表层土壤水分大量蒸发,较深层土壤水分含量基本与降雨前相近,液流变化情况也逐渐恢复至降雨前水平。对比降雨前后一天内土壤水分含量变化情况,降雨前一天浅层(深度 $<100 \text{ cm}$)土壤水分普遍低于深层(深度 $\geq 100 \text{ cm}$),符合干旱地区土壤含水量垂直特征,雨后一天内表层(深度 $<40 \text{ cm}$)土壤水分得到迅速补充,其余各深度土壤水分含量基本呈相近水平,深层土壤含水量与降雨前基本保持一致。研究区域平均降雨量不大且蒸发迅速,降雨前后深层土壤水分含量变化不明显,说明降雨对于半干旱黄土区100 cm以下深层土壤水分动态影响不显著,地下水供给可能是影响深层土壤水分的主要因素。

进一步将降雨前后液流速率与不同深度土壤水分含量进行相关性分析,分析结果表明,降雨前液流速率与140 cm和160 cm土壤水分相关性达到极显著水平($P < 0.01$),与120 cm和180 cm土壤水分相关性达到显著水平($P < 0.05$),降雨过后的第1个非阴雨天液流速率与100 cm深度的土壤水分呈极显著正相关($P < 0.01$),和120 cm深度的土壤水分呈显著正相关($P < 0.05$),而后一般第2天就逐渐恢复与降雨前一致,与100 cm以上较浅层土壤水分含量相关性不显著($P > 0.05$)。

2.2 月尺度上山毛桃液流速率动态变化及相关性分析

从月均液流速率与环境因子的变化情况图可以看出,液流速率变化曲线随着生长时间的推进先升高后降低,7月在整个生长季中平均速率最大,9月最小,太阳辐射和饱和水汽压差月均值变化与液流相同,空气温度7月最高,5月最低,风速则是9月最大,5月最小,而相对湿度和降雨量则正好与风速相反。在月尺度下,液流速率、空气温度、太阳辐射和饱和水汽压差均随着时间的变化呈现先增加后减小的变化趋势,液流速率与饱和水汽压差呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数为0.921,与太阳辐射和空气温度呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数分别为0.857和0.842(表3)。5—7月,随着空气温度的升高,太阳辐射愈加强烈,植物光合及蒸腾作用不断加强,叶片气孔开合度逐渐增加,液流随之加速,7月达到最高峰。8—9月温度较7月有所降低,太阳辐射也较之开始减弱,加上这2个月降雨较为频繁,部分叶片气孔逐渐关闭,液流速率随之降低。

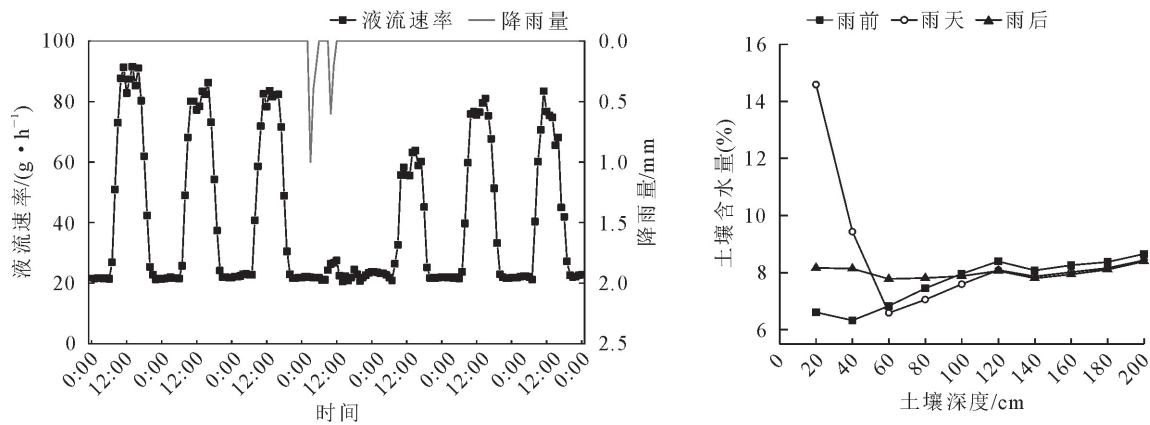


图 2 降雨前后山毛桃液流速率变化及土壤水分含量变化情况

Fig. 2 Changes of sap flow velocity and soil moisture content before and after raining

表 2 降雨前后山毛桃液流速率与土壤水分含量相关性对比

Table 2 Comparison of the correlation between sap flow velocity and soil moisture content before and after raining

时间	SW ₂₀	SW ₄₀	SW ₆₀	SW ₈₀	SW ₁₀₀	SW ₁₂₀	SW ₁₄₀	SW ₁₆₀	SW ₁₈₀	SW ₂₀₀
雨前	-0.853	-0.520	0.862	0.879	0.920	0.954 *	0.996 **	0.956 **	0.990 *	0.920
雨后	-0.435	-0.790	0.522	-0.044	0.995 **	0.966 *	0.943	0.897	0.535	-0.201

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

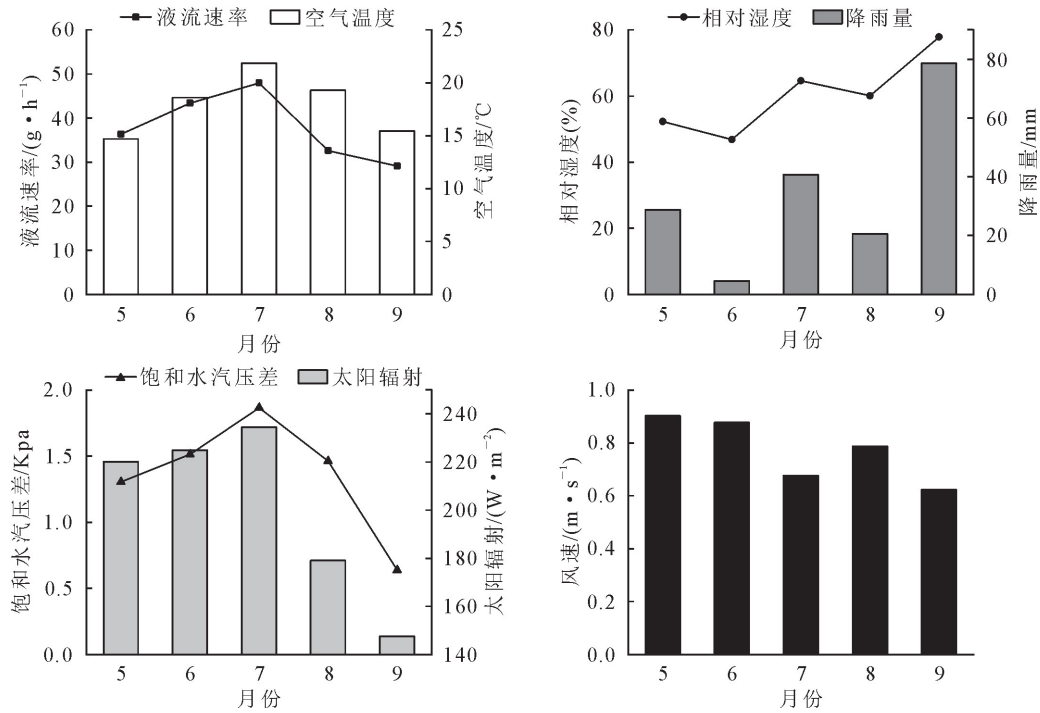


图 3 月尺度上山毛桃液流速率与环境因子变化情况

Fig. 3 Changes of sap flow velocity and environmental factors at monthly scale

月尺度和日尺度下液流速率与环境因子的多元回归分析结果在表 4 中展示。月均液流速率与环境因子的回归方程为 $S_F = 32.804 + 8.631V_{PD}$, 这意味着影响山毛桃月均液流速率的环境因子仅有饱和水汽压差,可解释液流速率 90.2% 的变异。

2.3 日尺度上山毛桃液流速率动态变化及相关性分析

在日尺度上,山毛桃液流速率与各环境因子的

变化情况详见图 4。由图 4 可以看出,液流速率总体上呈现先升高后降低的趋势,在 7 月达到峰值,同空气温度、太阳辐射和饱和水汽压差变化趋势相同,与相对湿度变化趋势相反,8 月下旬开始频繁降雨,土壤水分得到适当补充,空气温度开始逐渐降低,蒸腾速率减小。从相关性分析数据也可以明显看出,液流速率与风速相关关系不显著($P > 0.05$),与其他因子显著性强($P < 0.01$),其中,空气温度、太阳

辐射、饱和水汽压差和液流速率呈正相关,其他因子呈负相关。

根据回归分析结果,在日尺度上,太阳辐射和空气温度与液流速率的关系更为密切,贡献量占比分别为 58.1%和 14.4%。

2.4 小时尺度上山毛桃液流速率动态变化及相关性分析

选择生长季每个月连续 3 天的数据比较液流速率和各环境因子的变化。7 月液流速率变化幅度最大,其次是6月和5月,8、9月液流速率变化不大且

表 3 不同时间尺度下山毛桃液流速率与环境因子相关性差异

Table 3 Differences in the correlation between sap flow velocity and environmental factors at different time scales

环境因子	Pearson 相关性分析		
	月尺度 液流速率	日尺度 液流速率	小时尺度 液流速率
空气温度/℃	0.857 [*]	0.711 ^{**}	0.690 ^{**}
相对湿度(%)	-0.643	-0.563 ^{**}	-0.545 ^{**}
太阳辐射/(W·m ⁻²)	0.842 [*]	0.741 ^{**}	0.697 ^{**}
饱和水汽压差/KPa	0.921 ^{**}	0.704 ^{**}	0.763 ^{**}
风速/(m·s ⁻¹)	-0.057	0.063	0.281 ^{**}
降雨量/mm	-0.66	-0.351 ^{**}	-0.064 ^{**}

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

表 4 月、日尺度上液流速率与环境因子多元线性回归分析

Table 4 Multiple linear regression between sap flow velocity and environmental factors at monthly and daily scale

时间尺度	进入顺序	进入因子	R ²	回归方程
月尺度	1	V _{PD}	0.902	S _F =32.804+8.631V _{PD}
日尺度	1	R _A	0.581	S _F =18.165+0.096R _A
	2	T _a	0.725	S _F =3.847+0.066R _A +1.139T _a

注: S_F(液流速率), V_{PD}(饱和水汽压差), R_A(太阳辐射), T_a(空气温度)。

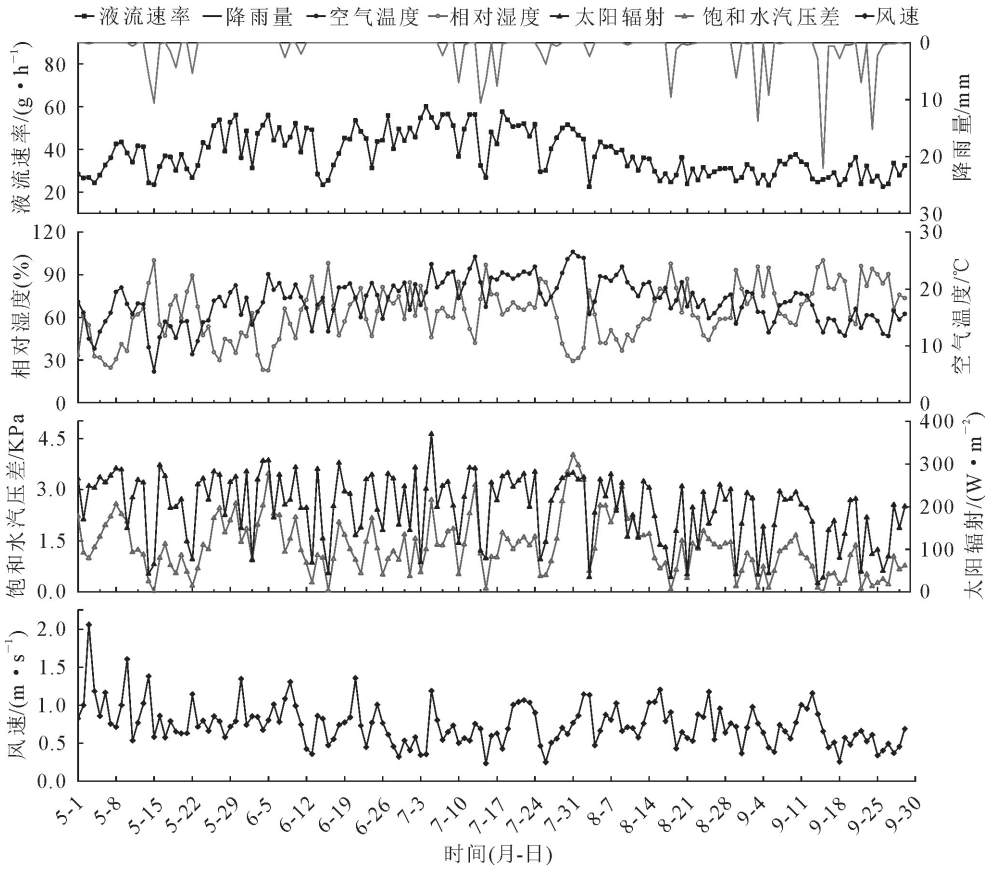


图 4 日尺度上山毛桃液流速率与环境因子变化情况

Fig. 4 Changes of sap flow velocity and environmental factors at daily scale

液流较小。小时液流速率呈现“单峰”或“双峰”曲线,非降雨天液流速率变化明显比降雨天显著。同液流速率变化趋势,6、7月空气温度、饱和水汽压差均值相较其他月份变化较大,最大值出现在7月,且液流启动时间也比其他月份稍早。相对湿度的小时均值变化曲线则基本同液流速率的变化曲线相反。值得注意的是,9月15日日间液流速率出现略微低于夜间的情况,这可能是由于15日前后出现持续性降雨,空气温度降低,太阳辐射减弱,土壤水分含量增大,使液流速率减小。午后随着降雨的不断减弱和气温的回升,液流速率有所增大,到夜间基本恢复到正常夜间水平。

分析小时尺度上山毛桃液流速率与环境因子的相关性发现,在0.01的显著性水平,所有环境因子均与液流速率表现出较强的显著性,相对湿度和降雨量与液流速率呈负相关,其他因子呈正相关,风速

和降雨量的相关系数较小。通过比较月、日、小时尺度下山毛桃树干液流与各环境因子的相关性可以看出,随着时间尺度的减小,与液流速率呈相关关系的环境因子数量增多,饱和水汽压差始终与液流呈极显著正相关($P < 0.01$)。

进一步通过回归分析比较不同月份间液流速率和环境因子在小时尺度上的变化差异,结果显示:各月逐次进入回归方程的环境因子并不相同,说明在较小的时间尺度下环境因子对液流速率的控制因素和影响作用更为复杂。5、6月首先进入线性回归方程与液流速率关系更为密切的环境因子是空气温度,对液流速率变化的贡献量分别为56.6%和48.4%,7、8月首先进入回归方程的环境因子是太阳辐射,贡献量分别为62.4%和61.0%,9月首先进入回归方程的则是饱和水汽压差,贡献量为56.1%,后续进入的环境因子贡献量越来越小。

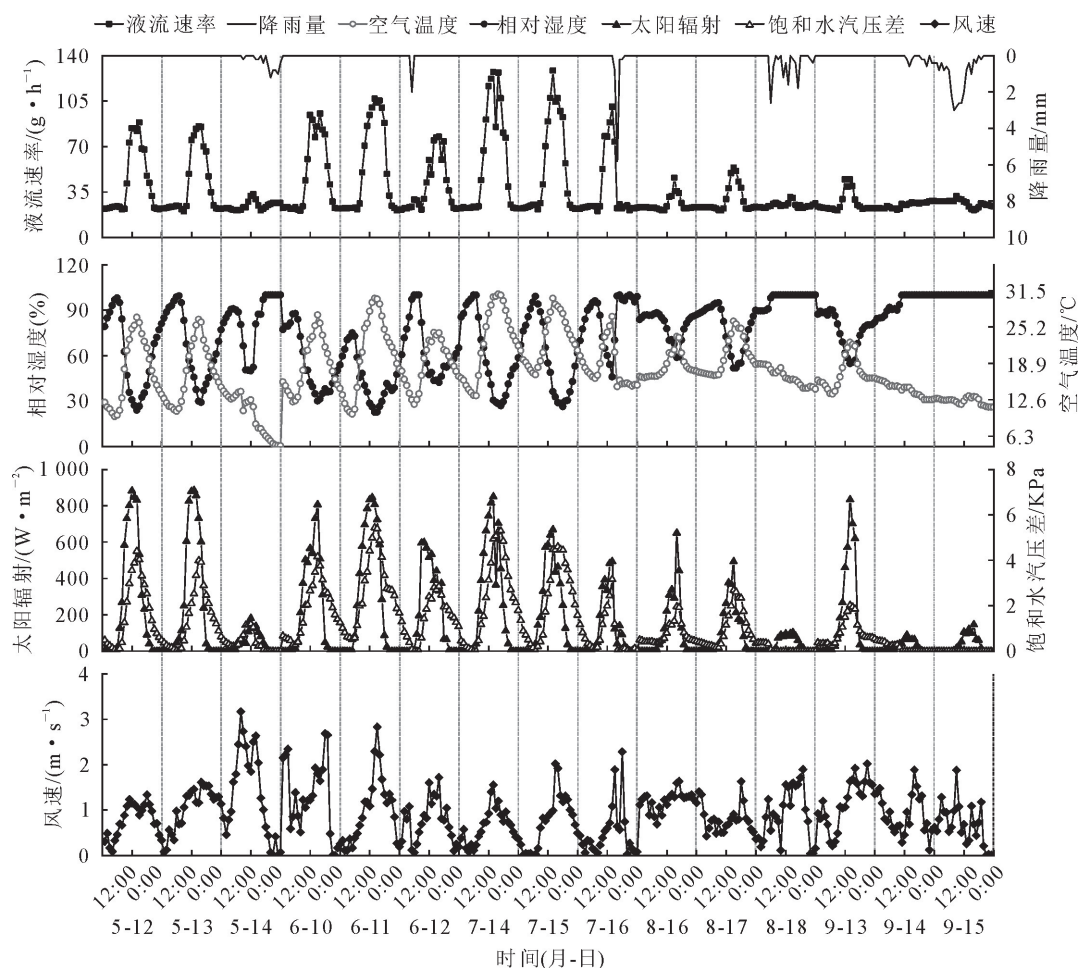


图5 小时尺度上山毛桃液流速率与环境因子变化情况

Fig. 5 Changes of sap flow velocity and environmental factors at hourly scale

根据液流速率与各环境因子的回归模型看,月尺度上 R^2 为0.902,日尺度上 R^2 为0.725,小时尺度上 R^2 为0.567~0.713,表现出在越长时间尺度上的逐步回归拟合度越大,数据预测的可靠性越强。

3 结论与讨论

3.1 结论

半干旱黄土区山毛桃液流速率的变化呈现出昼

表 5 小时尺度上液流速率与环境因子多元线性回归分析

Table 5 Multiple linear regression between sap flow velocity and environmental factors at hourly scale

月份	进入顺序	进入因子	R^2	回归方程
5	1	T_a	0.566	$S_F = -8.402 + 3.079T_a$
	2	R_A	0.606	$S_F = -0.701 + 2.204T_a + 0.023R_A$
	3	R_H	0.612	$S_F = -16.768 + 2.780T_a + 0.021R_A + 0.149R_H$
	4	V_{PD}	0.629	$S_F = -26.016 + 1.528T_a + 0.019R_A + 0.376R_H + 10.435V_{PD}$
6	1	T_a	0.484	$S_F = -25.071 + 3.780T_a$
	2	R_A	0.556	$S_F = -6.671 + 2.303T_a + 0.039R_A$
	3	W_S	0.567	$S_F = -5.471 + 1.999T_a + 0.040R_A + 5.554W_S$
7	1	R_A	0.624	$S_F = 26.937 + 0.103R_A$
	2	T_a	0.701	$S_F = -26.577 + 0.062R_A + 3.069T_a$
	3	R_H	0.703	$S_F = -51.478 + 0.060R_A + 3.783T_a + 0.155R_H$
	4	V_{PD}	0.709	$S_F = -71.062 + 0.059R_A + 2.913T_a + 0.510R_H + 8.868V_{PD}$
	5	W_S	0.711	$S_F = -65.390 + 0.060R_A + 2.407T_a + 0.514R_H + 9.550V_{PD} + 4.916W_S$
8	1	R_A	0.610	$S_F = 23.443 + 0.055R_A$
	2	T_a	0.673	$S_F = -1.967 + 0.032R_A + 1.583T_a$
	3	R_H	0.683	$S_F = -26.429 + 0.032R_A + 2.260T_a + 0.172R_H$
	4	V_{PD}	0.713	$S_F = -48.110 + 0.027R_A + 1.162T_a + 0.569R_H + 11.680V_{PD}$
9	1	V_{PD}	0.561	$S_F = 21.667 + 12.084V_{PD}$
	2	R_A	0.608	$S_F = 21.327 + 8.570V_{PD} + 0.019R_A$
	3	R_H	0.633	$S_F = -20.670 + 18.608V_{PD} + 0.018R_A + 0.440R_H$
	4	W_S	0.643	$S_F = -26.470 + 18.604V_{PD} + 0.017R_A + 0.485R_H + 3.685W_S$

注: S_F (液流速率), T_a (空气温度), R_A (太阳辐射), R_H (相对湿度), V_{PD} (饱和水汽压差), W_S (风速)。

高夜低的规律,且在非降雨天主要受 100 cm 以下深层土壤水分影响,降雨过后则主要与 100 cm 和 120 cm 的土壤水分有关,环境因子对于液流速率的影响和控制存在时间尺度上的显著差异。在月尺度上,仅有饱和水汽压差可对液流速率的月均变化进行解释;在日尺度上,太阳辐射是影响日均液流速率最主要的环境因子,其次是空气温度;在小时尺度上,不同月份间液流速率的主要控制因子也存在一定差异。5、6 月是空气温度对液流速率的影响最大,7、8 月是太阳辐射对液流速率的影响最大,而 9 月则主要是饱和水汽压差影响液流速率最为强烈。随着时间尺度的扩展,与液流速率相关的环境因子数量减少,但对液流速率的影响愈加强烈。本研究可以为半干旱黄土区植物蒸腾的时间尺度转换推演、区域水土保持调控和全球气候变化背景下植物蒸腾耗水预测提供理论依据。

3.2 讨论

本研究中,山毛桃液流速率呈现出昼高夜低的变化规律,夜间仍维持着微弱液流,这与徐先英等^[17]、黄雅茹等^[18]、程静等^[19]研究结果相同,夜间液流可补充日间水分消耗^[20]。

不同时间尺度下,液流速率对环境因子的响应存在明显不同。本研究发现,在月尺度下众多环境

因子中只有饱和水汽压差进入了线性回归方程,与黄雅茹等^[21]的研究结果一致,他们认为饱和水汽压差是影响桤柳树干液流速率变化的主要控制因素。在日尺度下,与液流速率变化关系最为密切的环境因子是太阳辐射,其次是空气温度。黄磊等^[22]、郭跃等^[23]分别对油蒿(*Artemisia ordosica*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)的日均液流速率进行分析,发现对其影响最大的环境因子是太阳辐射。Zheng 等^[24]的研究结果表明太阳辐射与干旱区梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的日均液流速率呈极显著正相关关系,且其相关系数最大。吴鹏等^[25]对天峨槭(*Acer wangchii*)树干液流特征研究表明日尺度下太阳辐射对天峨槭液流的直接影响最大。这些研究结果都与本研究在日尺度上的结论如出一辙。本研究发现,不同月份对于小时平均液流速率影响最大、控制作用最强的环境因子分别是空气温度、太阳辐射强度和饱和水汽压差。王强民等^[26]选取典型晴天沙柳液流速率数据进行分析,结果表明在小时尺度下液流速率与饱和水汽压差、太阳辐射强度及空气温度相关。姚依强等^[11]研究结果显示饱和水汽压差、太阳辐射、相对湿度对小时平均液流速率起关键作用,而饱和水汽压差是空气温度和相对湿度协同作用的结果,又与太阳辐射相互影响,故而与

本研究结果没有本质差别。由于地理位置、环境因子、时间尺度等因子的不同,即使处于同一生境中的同一物种,各环境因子对液流速率的影响仍旧有很大不同^[27]。由于不同月份环境差异性大,在小时尺度下,液流对环境因子的敏感程度不同,所以环境因子对植物液流的影响相较于时间尺度更为复杂。

参考文献:

- [1] 陈永金,陈亚宁,薛燕. 干旱区植物耗水量的研究与进展[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(6):152-158.
CHEN Y J, CHEN Y N, XUE Y. The progress and perspective of study on water consumption of vegetation in arid region[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2004, 18(6): 152-158. (in Chinese)
- [2] 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 gordejewii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3205-3213. (in Chinese)
- [3] 余峰,陈林,王峰,等. 宁夏中部干旱带人工柠条茎流及蒸腾特征研究[J]. 水土保持研究,2011,18(2):143-147.
YU F, CHEN L, WANG F, et al. The study on sap flow and transpiration of artificial *Caragana korshinskii* in the arid area of central Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(2): 143-147. (in Chinese)
- [4] 李思静,查天山,秦树高,等. 油蒿(*Artemisia ordosica*)液流动态及其环境控制因子[J]. 生态学杂志,2014,33(1):112-118.
LI S J, ZHA T S, QIN S G, et al. Temporal patterns and environmental controls of sap flow in *Artemisia ordosica* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(1): 112-118. (in Chinese)
- [5] 刘大海. 定西市安定区山毛桃植苗造林技术初探[J]. 南方农机,2020,51(1):87-89.
- [6] 张利刚,曾凡江,刘镇,等. 极端干旱区3种植物液流特征及其对环境因子的响应[J]. 干旱区研究,2013,30(1):115-121.
ZHANG L G, ZENG F J, LIU Z, et al. Sap flow characteristics of three plant species and their responses to environmental factors in an extremely arid region[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(1): 115-121. (in Chinese)
- [7] HUANG J, ZHOU Y, YIN L, et al. Climatic controls on sap flow dynamics and used water sources of *Salix psammophila* in a semi-arid environment in Northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(1): 289-301.
- [8] 杨文新. 玛纳斯河流域典型荒漠植物光合蒸腾及耗水规律研究[D]. 石河子:石河子大学,2014.
- [9] 韩兆敏,姚云峰,郭月峰,等. 砭砂岩区油松的液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报,2017,26(7):1145-1151.
HAN Z M, YAO Y F, GUO Y F, et al. Sap flow characteristics of *Pinus tabulaeformis* in soft rock area and its relationship with environmental factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(7): 1145-1151. (in Chinese)
- [10] 苏军德,李国霞. 祁连山东部祁连圆柏树干液流变化特征及其与环境因子的响应研究[J]. 安徽农业科学,2020,48(2):98-102.
- SU J D, LI G X. Characteristics of sap flow of *Sabina przewalskii* and its response to meteorological factors in Eastern Qilian Mountains[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(2): 98-102. (in Chinese)
- [11] 姚依强,陈珂,王彦辉,等. 华北落叶松树干液流速率主要影响因素及关系的时间尺度变化[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(2):155-161.
YAO Y Q, CHEN K, WANG Y H, et al. Relationships between sap flow velocity of *Larix principis-rupprechtii* and environmental factors and their variation with time scales[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(2): 155-161. (in Chinese)
- [12] 张少华. 定西市岷口林业试验场有害生物综合防治措施探究[J]. 南方农业,2020,14(11):69-71.
- [13] 王引乾,孙保平,李锦荣,等. 定西市安定区退耕还林地植物群落特征研究[J]. 中国农学通报,2010,26(19):333-338.
WANG Y Q, SUN B P, LI J R, et al. Community characteristics of returning farmland to forest land in Anding district Dingxi city[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(19): 333-338. (in Chinese)
- [14] LU P, URBAN L, ZHAO P. Granier's thermal dissipation probe(TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 631-646.
- [15] 裴志永,郝少荣,乔敬伟,等. 毛乌素沙地沙柳枝条茎流特征[J]. 生态环境学报,2019,28(1):48-56.
PEI Z Y, HAO S R, QIAO J W, et al. Characteristics of stem flow of *Salix psammophila*'s branch in Mu Us Sandland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(1): 48-56. (in Chinese)
- [16] 贾天宇,刘廷玺,段利民,等. 半干旱沙丘草甸过渡带人工杨树蒸腾耗水规律[J]. 生态学杂志,2020,39(10):3255-3264.
JIA T Y, LIU T X, DUAN L M, et al. Transpiration and water consumption of poplar trees in semi-arid dune meadow transition zone[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3255-3264. (in Chinese)
- [17] 徐先英,孙保平,丁国栋,等. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态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 areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 895-905. (in Chinese)
- [18] 黄雅茹,马迎宾,辛智鸣,等. 柽柳不同季节树干液流特征及其与土壤含水量及土壤温度的关系[J]. 西北林学院学报,2021,36(5):1-10.
HUANG Y R, MA Y B, XIN Z M, et al. Flow characteristics of *Tamarix chinensis* tree trunk fluid in different seasons and the relationships with soil water content and soil temperature[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5): 1-10. (in Chinese)
- [19] 程静,欧阳旭,黄德卫,等. 李跃林. 鼎湖山针阔叶混交林4种优势树种树干液流特征[J]. 生态学报,2015,35(12):4097-4104.

- CHENG J, OUYANG X, HUANG D W, *et al.* Sap flow characteristics of four dominant tree species in a mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4097-4104. (in Chinese)
- [20] 隋旭红, 张建军, 文万荣. 晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4791-4798.
- SUI X H, ZHANG J J, WEN W R. Study on sap flow in forest of *Quercus liaotungensis* and *Populus davidiana* by using the TDP method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4791-4798. (in Chinese)
- [21] 黄雅茹, 李永华, 辛智鸣, 等. 不同时间尺度环境因子与怪柳树干液流关系研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(11): 149-154.
- HUANG Y R, LI Y H, XIN Z M, *et al.* Relationships between meteorological factors and *Tamarix chinensis* sap flow at different time scales[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(11): 149-154. (in Chinese)
- [22] 黄磊, 张志山. 荒漠人工植被区柠条和油蒿茎干液流动态研究[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(3): 683-688.
- HUANG L, ZHANG Z S. Stem sap flow of *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* in a revegetated desert area[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(3): 683-688. (in Chinese)
- [23] 郭跃, 丁国栋, 吴斌, 等. 毛乌素沙地花棒茎干液流规律研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 110-113.
- GUO Y, DING G D, WU B, *et al.* Research on stem sap flow dynamics of *Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey in Mu Us sandy area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 110-113. (in Chinese)
- [24] ZHENG C, WANG Q. Water-use response to climate factors at whole tree and branch scale for a dominant desert species in central Asia: *Haloxylon ammodendron* [J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(1): 56-63.
- [25] 吴鹏, 杨文斌, 崔迎春, 等. 喀斯特区天峨槭(*Acer wangchii*)树干液流特征及其与环境因子的相关分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7552-7567.
- WU P, YANG W B, CUI Y C, *et al.* Characteristics of sap flow and correlation analysis with environmental factors of *Acer wangchii* in the Karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7552-7567. (in Chinese)
- [26] 王强民, 王文科, 王周锋, 等. 旱区沙柳蒸腾规律及其对环境因子的响应[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(4): 771-775.
- WANG Q M, WANG W K, WANG Z F, *et al.* Transpiration of *Salix psammophila* and its response to meteorological factors in arid area[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(4): 771-775. (in Chinese)
- [27] 崔鸿侠, 唐万鹏, 胡文杰, 等. 神农架 2 树种树干液流特征及与环境因子关系[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(1): 37-44.
- CUI H X, TANG W P, HU W J, *et al.* Characteristics of the sap flow and correlation analysis with environmental factors of two tree species in Shennongjia[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1): 37-44. (in Chinese)