

不同时间尺度山杏树干液流密度对环境因子的响应

韩新生^{1,2}, 许浩¹, 刘广全², 安钰¹, 王月玲¹, 董立国¹, 郭永忠¹, 万海霞¹

(1. 宁夏农林科学院 林业与草地生态研究所/宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室/宁夏生态修复与多功能林业综合研究中心, 宁夏 银川 750002; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 确定不同时间尺度树干液流的主要影响因素, 对理解液流密度响应环境的驱动机制提供理论基础。以宁夏黄土丘陵区山杏为对象, 在生长季同步监测树干液流密度、气象要素、土壤环境等指标, 分析时、日和月尺度树干液流对环境因子的响应关系。结果表明: 1) 日尺度上, 树干液流与太阳辐射(R_s)、饱和水汽压差(V_{PD})、气温(T_a)、相对湿度(R_H)、风速(W_a)、降雨量(P_{re})、土壤水分(V_{SM})、土壤温度(T_s) 8 个环境因子相关性极显著; 时尺度上, 树干液流与除 W_a 外的其他 7 个环境因子呈极显著相关; 月尺度上, 树干液流仅与 V_{SM} 、 T_a 呈极显著相关。2) 从时尺度到日尺度, 树干液流对 V_{PD} 和 T_s 的响应程度逐渐增强; 从日尺度到月尺度, 树干液流对 R_s 、 V_{PD} 、 T_s 的响应程度逐渐减弱, 而对 V_{SM} 的响应程度逐渐增强; 在 3 个时间尺度, 树干液流对 R_s 、 T_a 、 T_s 、 V_{PD} 呈正响应, 对 R_H 、 W_a 、 V_{SM} 呈负响应。3) 建立了 3 个时间尺度树干液流与环境因子的关系式, 在较小的时尺度, 入选的因子包括 R_s 和 T_a 等 7 个; 在较大的月尺度, 入选的因子仅为 V_{SM} ; 处于中间的日尺度, 入选的因子包括 V_{SM} 、 R_s 等 4 个; 随尺度从时、日到月转变, 树干液流的解释率依次为 61.5%、76.6%、80.5%; 时和日尺度树干液流的首要影响因子均为 R_s , 而月尺度为 V_{SM} 。

关键词: 树干液流; 环境因子; 时间尺度; 山杏

中图分类号: S662.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2023)03-0031-09

Responses of the Tree Trunk Sap Flow Density of *Armeniaca sibirica* to Environmental Factors in Different Time Scales

HAN Xin-sheng^{1,2}, XU Hao¹, LIU Guang-quan², AN Yu¹, WANG Yue-ling¹, DONG Li-guo¹,
GUO Yong-zhong¹, WAN Hai-xia¹

(1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation/Research Center for Ecological Restoration and Multi-Functional Forestry of Ningxia, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The objective of this study was to determine the main influencing factors of tree trunk sap flow (TTSF) at different time scales to provide a theoretical basis for understanding the driving mechanism of liquid flow density in response to the environment. Taking *Armeniaca sibirica* in the loess hilly region of Ningxia as an example, the TTSF density, meteorological elements, soil environment and other indicators were simultaneously monitored during the growing season, and the response relationships of the TTSF on the hourly, daily and monthly scales to environmental factors were analyzed. The results showed that 1) on the daily scale, the TTSF had extremely significant correlations with eight environmental factors, including solar radiation (R_s), saturated vapor pressure deficit (V_{PD}), air temperature (T_a), relative humidity (R_H),

收稿日期: 2022-03-20 修回日期: 2022-07-21

基金项目: 宁夏“青年科技人才托举工程”项目“宁南山区山杏树干液流密度及蒸腾量研究”; IWHR 基本科研业务费专项 (SC0145B012021); 宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题 (NGSB-2021-14-01)、(NGSB-2021-11-06); 宁夏自然科学基金项目 (2019AAC03148); 宁夏重点研发计划 (2021BEG03017)、(2020BCF01001)。

第一作者: 韩新生, 博士, 副研究员。研究方向: 森林生态水文与多功能管理。E-mail: hanxs@caf.ac.cn

wind speed (W_a), precipitation (P_{re}), soil moisture (V_{SM}), and soil temperature (T_s). On the hourly scale, TTSF was extremely and significantly correlated with 7 other environmental factors except for W_a . On the monthly scale, TTSF was extremely and significantly correlated only to V_{SM} and T_a . 2) From the hourly scale to the daily scale, the response degree of TTSF to V_{PD} and T_s gradually increased. From daily to monthly scales, the response of TTSF to R_s , V_{PD} , and T_s gradually weakened, while the response to V_{SM} gradually increased. On three time scales, the TTSF had positive responses to R_s , T_a , T_s , and VPD, and negative responses to R_H , W_a , and V_{SM} . 3) The relationships between TTSF and environmental factors on three time scales were established. At smaller scales (hour), the selected factors included 7 factors, including R_s and T_a , etc. For the larger scale (month), only one factor (V_{SM}) was selected. For the intermediate scale (day), four factors were selected, including V_{SM} and R_s . As the scale changes from hour, day to month, the interpretation rates of TTSF were 61.5%, 76.6%, and 80.5%, respectively. The primary influencing factors of TTSF on the hourly and daily scales were R_s , while it was V_{SM} on the monthly scale.

Key words: stem sap flow; environmental factor; time scale; *Armeniaca sibirica*

林木蒸腾是森林水量平衡的重要组分,在半干旱区占降水量的 40%~70%^[1-2],与光合作用关系紧密,进而影响林木生长。树干液流可反映树体的蒸腾情况及其相关生理功能^[3],液流密度受林木生物学结构影响外^[4-5],还与气象因子^[6-9]、土壤特性^[10]、地形条件^[11]等密切相关,生物学结构、土壤供水能力、气象因子分别决定树干液流的潜力、总体水平、瞬间变动^[12],地形条件通过改变微气象及土壤环境状况进而影响树干液流。研究土壤环境和气象条件对树干液流密度的影响,对阐明林木水分利用效率具有重要的理论价值。

目前树干液流密度的相关研究较为丰富,主要集中在分析小时或日单一尺度树干液流变化特征及主控因子(气象、土壤、地形、植物生长等)。前人在小时尺度上研究显示,白桦(*Betula platyphylla*)液流密度与环境因子相关系数的大小顺序依次为:太阳辐射、气温、饱和水汽压差(V_{PD})、相对湿度^[7],针阔混交林液流密度主控因子为太阳辐射和饱和水汽压差^[13];在日尺度上,旱柳(*Salix matsudana*)和小叶杨(*Populus simonii*)液流密度与大气辐射、气温的相关性最好^[14],青海云杉(*Picea crassifolia*)液流密度与太阳辐射、 V_{PD} 、气温、空气湿度、降雨量显著相关^[15]。环境因子随时间尺度变化(扩大或缩小)对液流密度的影响会产生差异,以往对不同时间尺度树干液流的探讨还较少。在为数不多的研究中发现,时尺度上影响杉木(*Cunninghamia lanceolata*)树干液流的主要因子为太阳辐射和气温,日尺度上为气温、土壤水分、太阳辐射,月尺度上为气温、相对湿度^[16];苹果林液流密度的主要影响因子在时、日、月尺度上分别为 V_{PD} 、地表温度和 V_{PD} 、地表温度^[17];但相关研究覆盖的区域和树种较少,特别是在环境因子多变的干旱区尚显不足,这就限制了林

分生态耗水的精确测算和林水协调管理。

山杏(*Armeniaca sibirica*)是黄土丘陵区的主要造林树种之一,对区域水土保持与生态修复等起到不可替代的作用,量化其蒸腾速率,是实现科学恢复森林、协调林水综合管理、发挥多种服务功能的需要。目前有关山杏蒸腾的报道较少,缺乏对山杏树干液流密度及环境影响因子的时间尺度差异研究。因此,在宁南黄土丘陵区于生长季内对山杏树干液流密度和环境因子进行同步监测,确定了不同时间尺度的主要影响因子,并建立了相应的数量关系,为实现山杏人工林蒸腾耗水的精确测算和尺度转换提供理论基础。

1 研究区概况

研究区位于宁夏固原市彭阳县,沟壑纵横,梁峁相间,最高海拔 2 418 m,最低海拔 1 248 m。属于典型的温带半干旱大陆性季风气候,年均气温 7.4~8.5℃,无霜期 140~170 d;年均降水量 350~550 mm,主要集中在 6—9 月。土壤类型以黄绵土和黑垆土为主。植被类型属典型干草原,主要由百里香(*Thymus mongolicus*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、本氏针茅(*Stipa capillata*)等组成;分布的主要树种为山杏、柠条(*Caragana korshinskii*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等。

2 研究方法

2.1 样地布设

在彭阳县草庙乡牛湾村,设置 1 个正方形(投影面积为 900 m²)山杏纯林样地,地理坐标为 106°45'30"E、35°56'59"N,海拔 1 714 m,坡向西北 28°,坡位中上,坡度 18°。林龄 19 a,林木密度为 503 株·

hm^{-2} , 平均树高 3.93 m, 平均地径 11.82 cm, 林冠郁闭度 0.36, 东西冠幅 3.85 m, 南北冠幅 3.24 m; 冠层重叠度低, 林下没有灌丛, 草本层盖度 67%。

2.2 样树选择与树干液流密度测定

样地内选择 4 株生长良好、无被挤压的林木作为观测样树, 其生长指标见表 1。山杏主干低、地径小且边材厚度薄, 在样树上安装 1 组 2 针的 SF-L 热扩散探针(长度为 20 mm, 基本覆盖边材)。

表 1 样树生长特征

Table 1 The growing features of samples trees

样树 编号	树高 /m	地径 /cm	枝下高 /m	冠幅直径 /m
1	6.3	16.4	1.2	3.9
2	4.5	12.1	1.4	3.8
3	5.1	14.6	1.7	6.0
4	6.0	18.8	1.5	5.7

于 2020 年 4 月 1 日至 10 月 16 日连续监测树干液流密度, 计算公式如下:

$$J_s = 0.714 \times [(d_{t_{\max}}/d_{t_{\text{act}}}) - 1]^{1.231} \quad (1)$$

式中: J_s 为树干液流密度 ($\text{ml} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$); $d_{t_{\max}}$ 为液流为 0 时的最大温差, 一般指夜间相对湿度为 100% 或树干直径停止变化、状态相对稳定的 d_t 值, 即最大的 d_t 值, 计算时, 每天选择一个最大的 d_t 值; $d_{t_{\text{act}}}$ 为加热探针与参考探针的瞬时温差。采用 4 株样树的算术平均值代表树干液流密度。

2.3 气象因子监测

在距样地 100 m 的林外开阔处, 架设 1 台 HOB 自动连续观测的气象站, 监测空气温度 (T_a , $^{\circ}\text{C}$)、太阳辐射 (R_s , $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)、相对湿度 (R_H , $\%$)、风速 (W_a , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、降雨 (P_{re} , mm) 等气象因子, 每 30 min 自记数据 1 次, 饱和水汽压差 (V_{PD} , kPa) 由空气温度和相对湿度计算得出, 公式如下:

$$V_{PD} = 0.611 \times (1 - R_H) \times E_{XP} [17.502 \times T_a / (T_a + 240.97)] \quad (2)$$

式中: E_{XP} 表示以自然常数 e 为底的对数函数。

2.4 土壤水分及土壤温度测定

在样地的中间位置安装 1 套 Insentek 智墒传感器, 用于观测土壤水分 (V_{SM} , $\%$) 和土壤温度 (T_s , $^{\circ}\text{C}$), 深度为 100 cm, 每 10 cm 一层, 共 10 层, 每 60 min 自记 1 次数据, 采用 100 cm 的平均值作为样地的土壤环境状况进行分析。

2.5 数据分析

将环境因子和树干液流密度转换成小时、日、月尺度的对应数值, 3 个时间尺度液流的单位分别转换成 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$, 降雨量转换成 3 个时间尺度求和值。

采用 SPSS21.0 中双尾检验的 Pearson 法进行 3 个时间尺度液流与环境因子的相关分析。

探讨树干液流对环境因子的响应时, 为排除其他因子干扰, 采用上外包线进行分析^[11], 外包线计算方法采用 Duke University 的 Ram Oren's H_2O Ecology Group 设计的宏程序。采用 SPSS 中的曲线估计法得到回归方程中 R^2 和 K 这 2 个参数, 其中, R^2 为决定系数, 取值在 0~1 之间, 越接近 1 表明拟合效果越好, 反之越差; K 为斜率, 显示树干液流对环境因子的响应程度, $K > 0$ 时为正响应, $K < 0$ 时为负响应^[18]。

采用 SPSS 对树干液流与环境因子进行逐步回归分析, 因子进入越早, 表明影响越大, 对于月尺度仅有一次逐步回归分析, 容易确定; 在小时和日尺度上是分月份进行的, 各因子会出现不同的进入顺序, 为判断其影响大小, 计算各因子在不同月份逐步回归进入顺序之和, 并按照进入顺序之和的大小, 判别各因子的作用, 和越大, 表明对树干液流的影响较小, 反之, 则影响较大; 某些因子在有些月份分析中没有进入, 给其赋值为 9 (因有 8 个因子, 各因子进入顺序最大为 8)^[19]。

3 结果与分析

3.1 环境因子变化

日均气温和土壤温度均呈先升—再稳—后降的波浪状变化(图 1); 日均太阳辐射的变异系数为 49.83%; 而日均相对湿度的变异系数为 32.99%。日均 V_{PD} 为 0.80 kPa, 日均风速平均为 $0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。总降雨量为 426.6 mm, 6—9 月占 85.47%; 土壤水分呈波浪状变化, 仅在 8 月 17 日(29.8 mm)降雨后土壤水分明显升高且之后保持在较高水平。

3.2 树干液流密度的季节变化

4 月 1 日至 5 月 14 日液流密度呈上升趋势但整体较低(图 2), 这与该时段温度和 V_{PD} 变化(和液流密度相同)有关; 5 月 21 日至 7 月 27 日液流密度表现出微弱降低的整体变化, 该时段土壤湿度较低, 降雨对土壤水分的补给有限, 波动是由阴雨天林木蒸腾需求较弱引起的; 7 月底 8 月初有几个液流密度很高, 是因雨后土壤水分得到有效补充而上升; 之后虽然土壤水分较高, 但因温度及太阳辐射等的限制, 液流密度呈逐渐减弱的波浪状变化。月均液流密度呈先升后降的变化趋势, 5—8 月较高, 变幅在 $3567 \sim 4747 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$, 其余月份较低, 变幅在 $207 \sim 900 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$, 可能是由气温等因子导致的。

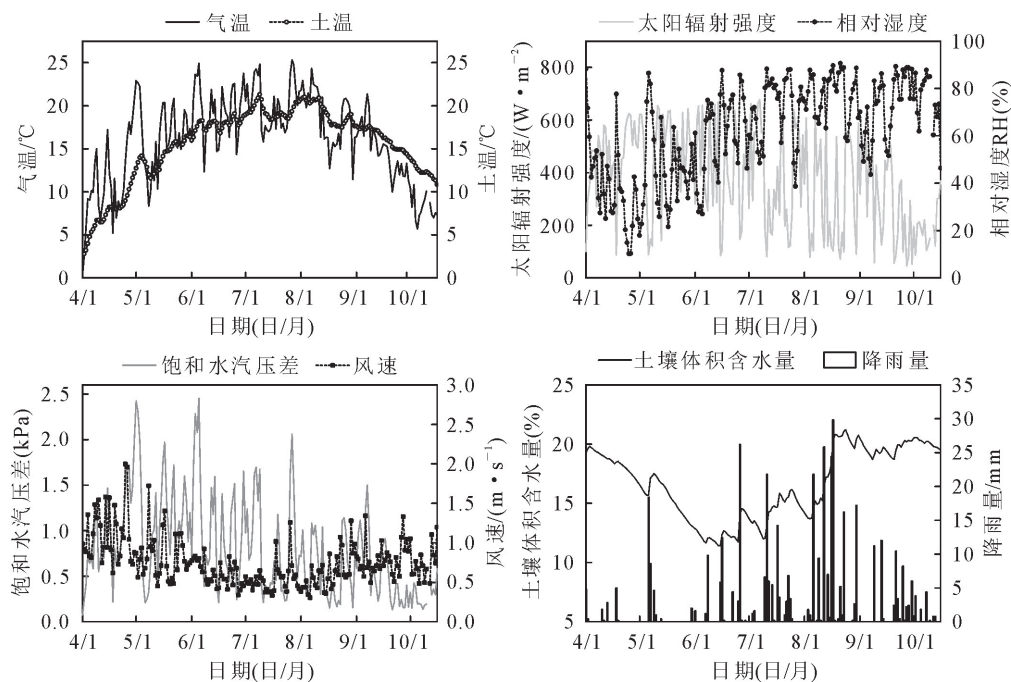


图1 研究期间环境因子的日变化

Fig. 1 Variations of daily environmental factors during the study period

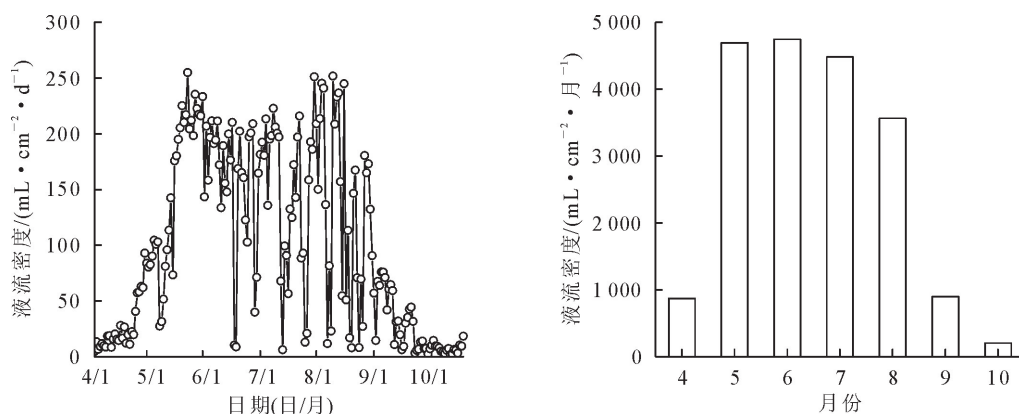


图2 研究期间液流密度的日变化和月变化

Fig. 2 Variations of daily and monthly of sap flow density during the study period

3.3 时尺度液流密度与环境因子的关系

相关分析表明,除风速外,时液流密度与其他气环境因子呈极显著相关(表2),包括呈极显著正相关的气温、太阳辐射、 V_{PD} 和土壤温度;呈极显著负相关的相对湿度、土壤水分及降雨量;气温、太阳辐射和 V_{PD} 相关系数较高,降雨量较低。从各月看,除4月风速和降雨量、6月和7月土壤水分、8月风速、10月太阳辐射和降雨量外,液流密度与其他环境条件基本呈极显著相关。液流密度与气象因子的相关系数整体高于土壤环境,随月份变化基本呈先升后降的规律,而土壤条件大致表现出相反的趋势。

使用上外包线分析时液流密度对单一因子的响应(图3)。随气温、太阳辐射、 V_{PD} 和土壤温度增加液流密度逐渐升高,这与3个气象因子能促进叶片气孔开张及土壤温度能增强根系吸水活力等有关;

随相对湿度、风速、降雨量、土壤水分增加液流密度逐渐降低,这是因相对湿度和风速较高时抑制叶片气孔开张,瞬间降雨及土壤水分较高时气温、太阳辐射等因子较低导致液流密度较微弱。从决定系数(R^2)看,液流密度与气温、太阳辐射、土壤温度的拟合效果较好;从斜率(K)角度出发,液流密度与 V_{PD} 、降雨量的响应关系剧烈。

逐步回归分析(表3)表明,入选的因子依次为太阳辐射、气温等7个环境因子能够解释液流61.5%的变异。不同月份入选的首要变量为 V_{PD} 和太阳辐射,显示液流密度受上述2个因子的影响较大。各月的决定系数呈先升后降的变化,7月达到最高,因此,分析环境因子对液流密度影响的最佳月份为7月,环境因子最高可解释86.2%的液流密度变化。

表 2 不同月份液流密度与环境条件在小时尺度上的相关性

Table 2 Correlation between sap flow density and environmental conditions in each month on hourly scale

J_s	T_a	R_H	W_a	R_s	V_{PD}	T_s	V_{SM}	P_{re}
4 月 ($n=720$)	0.583**	-0.341**	0.063	0.355**	0.637**	0.533**	-0.528**	-0.035
5 月 ($n=744$)	0.632**	-0.383**	0.151**	0.756**	0.513**	0.360**	-0.285**	-0.083*
6 月 ($n=720$)	0.770**	-0.548**	0.247**	0.847**	0.654**	0.186**	-0.067	-0.153**
7 月 ($n=744$)	0.823**	-0.640**	0.373**	0.868**	0.691**	0.270**	-0.067	-0.117**
8 月 ($n=744$)	0.733**	-0.762**	0.069	0.826**	0.799**	0.256**	-0.165**	-0.143**
9 月 ($n=720$)	0.800**	-0.680**	0.206**	0.698**	0.817**	0.465**	-0.107**	-0.106**
10 月 ($n=384$)	0.233**	-0.354**	0.163**	0.053	0.393**	-0.112*	-0.207**	0.032
研究期间 ($n=4\ 776$)	0.670**	-0.340**	0.015	0.673**	0.611**	0.312**	-0.383**	-0.091**

注: * 表示 $P<0.05$ (呈显著相关), ** 表示 $P<0.01$ (呈极显著相关)。下同。

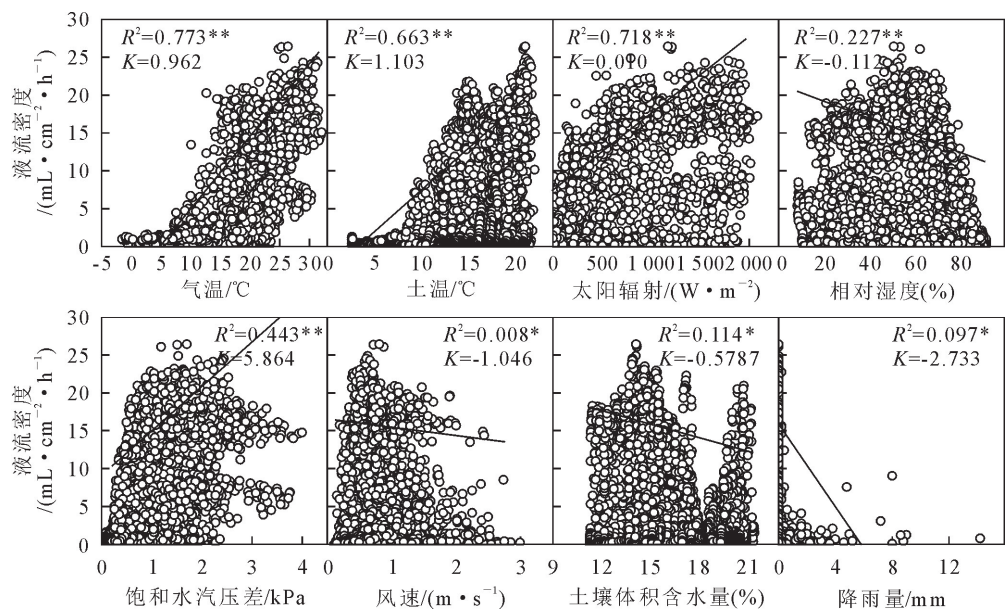


图 3 时尺度液流密度与环境因子的关系

Fig. 3 The relationship between sap flow density and environmental factors on hourly scale

表 3 时尺度上液流密度与环境因子的逐步回归分析

Table 3 Stepwise regression between sap flow density and environmental factors on hourly scale

时间	回归方程	R^2	P
4 月	$J_s=10.071+3.513V_{PD}+0.041R_H-0.673V_{SM}-0.127T_a+2.57\times10^{-4}R_s$	0.552	<0.01
5 月	$J_s=-15.246+8.08\times10^{-3}R_s+1.267T_s$	0.655	<0.01
6 月	$J_s=9.985+7.48\times10^{-3}R_s+1.151T_a-6.390V_{PD}-0.108R_H+1.836W_a-0.688T_s-0.358V_{SM}$	0.808	<0.01
7 月	$J_s=8.590+6.45\times10^{-3}R_s+1.760T_a-9.123V_{PD}-0.136R_H-1.016T_s+1.414W_a-0.309V_{SM}$	0.862	<0.01
8 月	$J_s=-3.629+7.77\times10^{-3}R_s+0.617T_s-0.129R_H+0.196T_a+1.087W_a$	0.759	<0.01
9 月	$J_s=-22.335+6.034V_{PD}+0.100R_H+0.489V_{SM}+0.202T_s+5.34\times10^{-4}R_s$	0.79	<0.01
10 月	$J_s=-0.821+2.166V_{PD}+4.77\times10^{-4}R_s+0.018R_H-0.068T_s+0.143W_a$	0.288	<0.01
研究期间	$J_s=0.109+5.49\times10^{-3}R_s+0.103T_a-0.365V_{SM}+0.142T_s+2.430V_{PD}+0.037R_H-0.410P_{re}$	0.615	<0.01

将各月和研究期间逐步回归中各因子的进入顺序相累加,值越小,表明其逐步回归进入越早,对液流密度影响越大。在时尺度上,太阳辐射对液流密度的影响最大(图 4),其次为 V_{PD} ,依次为相对湿度、土壤温度、气温、土壤水分、风速,降雨量的影响最小。

3.4 日尺度液流密度与环境因子的关系

日和时液流密度与环境因子的相关性基本相同

(表 2 和表 4)。从各月来说,除 4 月风速和降雨量、5 月风速和 V_{PD} 、6—7 月 3 个因子(风速、土壤温度、土壤水分)、8—9 月风速和土壤水分、10 月 4 个因子(气温、土壤温度、土壤水分、降雨量)外,日液流密度与其他环境因子呈(极)显著相关;随月份变化日液流密度与气象因子相关系数的绝对值基本呈先升后降,与土壤环境条件相关系数的绝对值大致呈先降

后升;从相关系数看,4月和5月土壤环境起主要作用,6—10月气象因子起主要作用。

日液流密度对环境条件的响应规律与时尺度相同(图5)。从决定系数看,液流密度与土壤温度、太阳辐射等的拟合效果较好;从斜率来说,与 V_{PD} 、风速的响应关系剧烈。

逐步回归分析显示(表5),进入的环境因子依次为土壤水分、太阳辐射等4个,共同解释液流密度76.6%的变异,决定系数随月份推进呈微弱的波浪状变化。

环境因子对日液流密度的影响见图6。太阳辐射最大,其次为土壤温度和降雨量,然后依次为土壤

水分、 V_{PD} 、气温及风速,相对湿度最小。

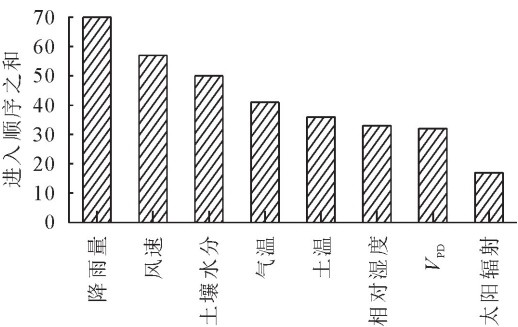


图4 时尺度环境因子对液流密度影响的重要性
Fig. 4 The importance of environmental factors influences to sap flow density on hourly scale

表4 不同月份液流密度与环境条件在日尺度上的相关性

时间	T_a	R_H	W_a	R_s	V_{PD}	T_s	V_{SM}	P
4月($n=30$)	0.728**	-0.533**	-0.005	0.539**	0.783**	0.818**	-0.893**	-0.291
5月($n=31$)	0.414*	-0.383*	-0.083	0.469**	0.300	0.751**	-0.680**	-0.525**
6月($n=30$)	0.763**	-0.750**	0.315	0.831**	0.729**	0.118	-0.191	-0.674**
7月($n=31$)	0.840**	-0.767**	0.262	0.897**	0.754**	0.339	-0.144	-0.588**
8月($n=31$)	0.717**	-0.795**	-0.290	0.803**	0.851**	0.415*	-0.339	-0.572**
9月($n=30$)	0.851**	-0.860**	-0.019	0.837**	0.887**	0.700**	-0.170	-0.500**
10月($n=16$)	-0.045	-0.598*	0.556*	0.694**	0.606*	-0.281	-0.357	0.019
研究期间($n=199$)	0.742**	-0.274**	-0.289**	0.594**	0.577**	0.525**	-0.686**	-0.282**

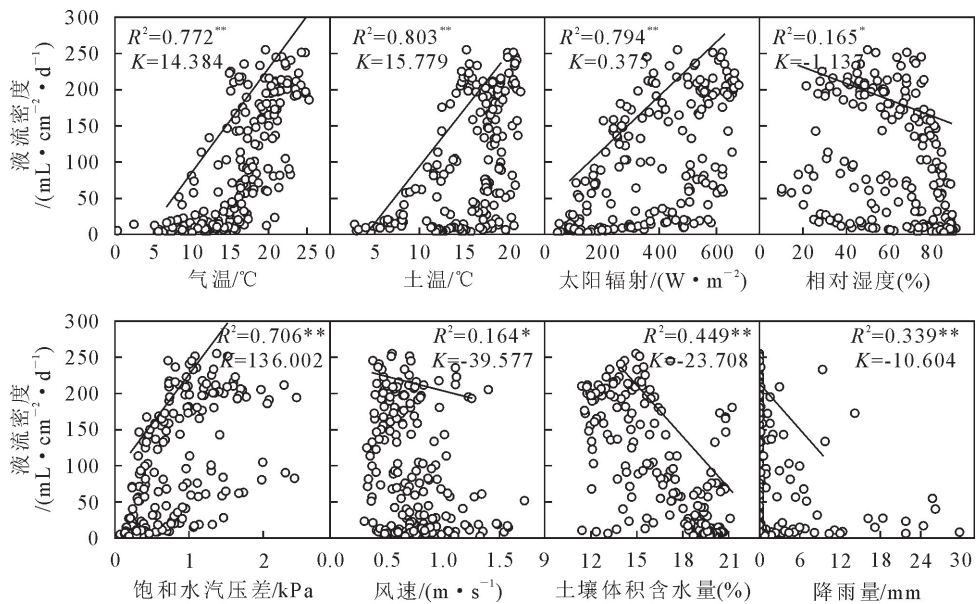


图5 日尺度液流密度与环境因子的关系

Fig. 5 The relationship between sap flow density and environmental factors on daily scale

3.5 月尺度液流密度与环境因子的关系

月液流密度($n=7$)仅与土壤水分、气温呈极显著相关,相关系数分别为 -0.897 和 0.877 。液流密度随气温、太阳辐射、 V_{PD} 、土壤温度和降雨量(正效应)增加而逐渐升高(图7),随相对湿度、风速和土壤水分(负效应)增加呈下降的趋势。从决定系数

看,气温和土壤水分与液流密度的拟合效果较好;从斜率看,液流密度对 V_{PD} 和风速的响应剧烈。采用逐步回归法构建月液流密度对环境因子的响应关系式,方程为 $J_s = 13\,569.481 - 637.442V_{SM}$ ($P < 0.01$),土壤水分是能够进入的唯一环境因子,单独解释液流密度80.5%的变异。

表 5 日尺度上液流密度与环境因子的逐步回归分析

Table 5 Stepwise regression between sap flow density and environmental factors on daily scale

时间	回归方程	R^2	P
4 月	$J_s = 955.472 - 47.128V_{SM} - 11.161T_s + 2.746T_a$	0.901	<0.01
5 月	$J_s = -320.579 + 30.899T_s + 0.180R_s - 5.329P_{re} - 34.160V_{PD}$	0.786	<0.01
6 月	$J_s = -257.325 + 0.164R_s - 4.747P_{re} + 127.208W_a + 15.744T_s$	0.868	<0.01
7 月	$J_s = 48.188 + 0.274R_s - 2.917P_{re}$	0.838	<0.01
8 月	$J_s = 52.934 + 206.916V_{PD} - 81.087W_a$	0.775	<0.01
9 月	$J_s = -339.343 + 51.117V_{PD} + 6.857T_s + 11.720V_{SM}$	0.867	<0.01
10 月	$J_s = -14.975 + 0.063R_s + 2.087P_{re} + 0.961T_a$	0.817	<0.01
研究期间	$J_s = 96.992 - 10.744V_{SM} + 0.195R_s + 7.307T_s - 2.054P_{re}$	0.766	<0.01

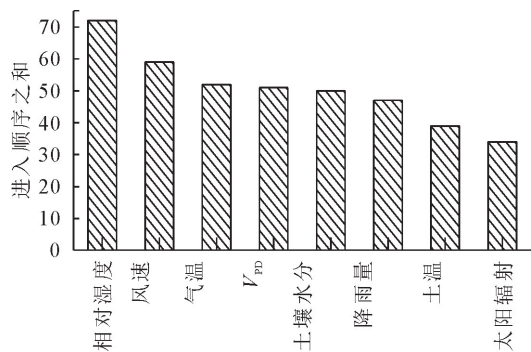


图 6 日尺度环境因子对液流密度影响的重要性
Fig. 6 The importance of environmental factors influences to sap flow density on daily scale

4 结论与讨论

4.1 结论

山杏时液流密度的主控因子为太阳辐射,回归分析依次入选的为太阳辐射、气温等 7 个因子,共同解释液流 61.5% 的变异;日液流密度的主控因子为太阳辐射和土壤温度,依次进入的因子为土壤水分、太阳辐射等 4 个,共同解释液流 76.6% 的变化;月液流密度的主控因子为土壤水分,单独解释液流 80.5% 的变异。随研究尺度增加,树干液流的影响因子从气象条件转换成土壤环境,构建回归方程考虑的因子数量逐渐减少,而决定系数逐渐增大。

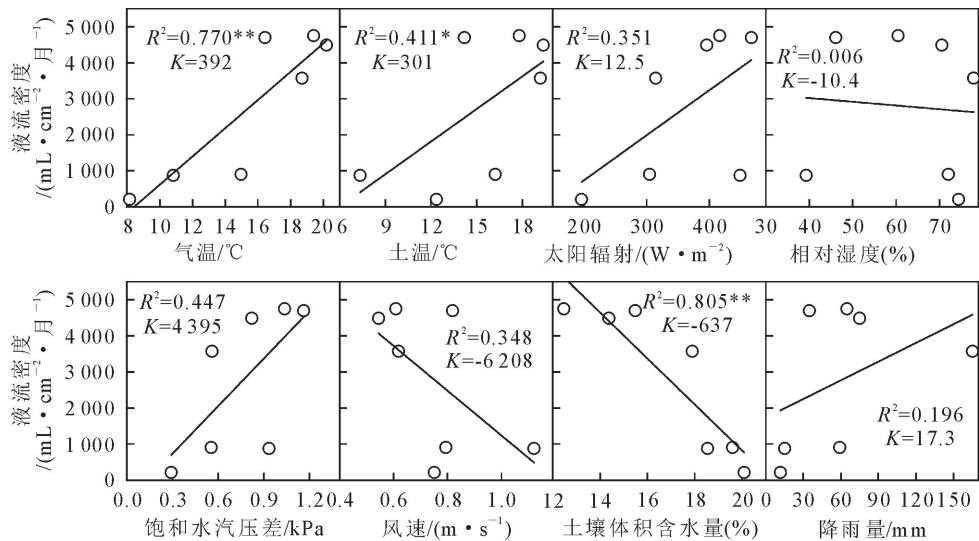


图 7 月尺度液流密度与环境因子的关系

Fig. 7 The relationship between sap flow density and environmental factors on month scale

4.2 讨论

树干液流的发生主要由蒸腾拉力驱动^[20],用于叶片或不同组织的光合作用和呼吸作用等生物化学反应;空气与植物组织内部(土壤与根系内部)的湿度差等均能导致树干液流产生波动^[21]。因此,太阳辐射、气温、土壤环境等能直接或间接影响上述过程的环境因子均是树干液流产生的诱因。多项研究显示,在时尺度上,树干液流(即液流密度的瞬时变动)

主要受气象要素影响,太阳辐射是植物光合作用的能量来源之一,其强弱决定气孔的开张程度,进而影响液流密度的大小,是瞬时驱动植物进行水汽交换的最主要因子,当 V_{PD} 和气温增加时,气孔导度继续增大,空气阻力减弱,叶表面水汽交换加快,植被蒸腾拉力增大,引起蒸腾速率增加^[22],当 V_{PD} 增加到一定程度后,液流密度趋向饱和^[23]。本研究发现,时尺度上树干液流主要受太阳辐射和 V_{PD} 等因子的

影响,这与刘朋飞等^[24]、李青华等^[25]、赵春彦等^[26]分别在沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、苹果、胡杨(*Populus euphratica*)上的研究结论相似。回归分析依次入选的因子为太阳辐射、气温、土壤水分、土壤温度、 V_{PD} 、相对湿度、降雨量,可共同解释液流密度 61.5% 的变异,表明在时尺度上多数环境因子均能进入,对液流密度变化起到一定的作用。而有学者在兴安落叶松(*Larix gmelinii*)上发现,影响时液流密度入选的因子依次为光照、土壤温度、相对湿度、气温,可解释液流密度 40.3% 的变化^[19],这与研究区域不同(本研究区位于半干旱区,土壤水分作用较大,而兴安落叶松的研究在较为湿润地区,土壤水分限制较弱)、树种的生物学特性存在差异有关。

日尺度上,不同天气(晴天、阴天、雨天)条件下太阳辐射、土壤因子等环境条件变化剧烈是造成日液流密度变化复杂的主要原因。本研究显示,太阳辐射和土壤温度等是引起液流密度日变化的重要因素,王艳兵等^[11]分析华北落叶松日液流密度得出,在土壤水势较高(较低)的下坡位(上坡位),贡献最大的因子为太阳辐射和土壤水势(土壤水势和 V_{PD});王文杰等^[19]研究显示土壤温度、光照和气温是导致兴安落叶松液流日变化的主要环境因子,与本研究结论相似。气象因子位于地表上部,可直接接触到树木叶片表面,主要影响树干液流的瞬时变动;土壤环境条件位于地表以下,通过影响树木根系活动进而间接对树干液流产生作用,对液流密度的影响是较为漫长的过程,因此,时间长短较为适中的日尺度树干液流变化受气象因子与土壤环境的共同影响。月尺度上,液流密度的总体水平受土壤因子的影响较大,以往研究表明,土壤水分^[18]、土壤温度^[19]等是影响液流月变化的重要条件,这与土壤因子对液流密度的长期作用等密切相关。

树干液流密度的瞬时变化、总体水平分别受气象条件、土壤因子的影响^[12],随研究的时间尺度增大,树干液流的作用因子从地上的气象条件逐渐转换为地下的土壤环境。如在时尺度上树干液流的主要影响因子为太阳辐射和 V_{PD} ,日尺度为太阳辐射和土壤温度,月尺度为土壤水分条件,主要是因在较大的时间尺度,与根系吸水(水分供应相关过程)直接相关的作用因子对液流密度影响大;在较小的时间尺度,与叶片等蒸散水分(水分耗散相关过程)直接相关的作用因子对液流密度影响大。随研究的时间尺度减小,土壤因子对液流密度的作用减小,太阳辐射等气象因子对液流密度的作用增大;月尺度,土壤水分单独解释液流密度 80.5% 的变异;日尺度,土壤水分和太阳辐射等 4 个因子共同解释液流

76.6% 的变化;时尺度,太阳辐射和气温等 7 个因子共同解释液流 61.5% 的变异;构建回归方程考虑的因子数量逐渐增加,而决定系数逐渐减少。

排除其他因子干扰的单因素分析表明,3 个时间尺度山杏树干液流密度随气温、太阳辐射、 V_{PD} 、土壤温度增加而升高,随相对湿度和风速的增加而降低,这与很多研究结果相似^[4,11-12,16-19,27]。日和月尺度树干液流对降雨量呈负响应,主要因瞬时降雨和日降雨量较大时,太阳辐射、气温等因子均较低,导致液流较微弱;而月尺度树干液流对降雨量呈正响应,与 6—8 月降雨量较高、液流密度较大有关。山杏树干液流对土壤水分呈负响应,与冬季融雪(及上年秋季土壤水分储量较多)导致生长季前期土壤水分较高、生长季后期因降雨增多和蒸腾减弱引起土壤水分升高等有关,且生长季前期和后期太阳辐射弱、温度低限制了林木蒸腾,也有很多研究^[28-29]在其他区域和树种上得到相同的结论。本研究仅为 1 个完整的生长季,未来应持续更长时间连续监测,以获得更大尺度液流密度的变化及主控因子,为揭示气候变化背景下林木蒸腾适应环境的机理提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 苏建平,康博文.我国树木蒸腾耗水研究进展[J].水土保持研究,2004,11(2):177-179,186.
- [2] ZHAO W Z, LIU B, CHANG X X, et al. Evapotranspiration partitioning, stomatal conductance, and components of the water balance: a special case of a desert ecosystem in China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 538: 374-386.
- [3] STEPPE K, VANDEGEHUCHTE M W, TONGETTI R, et al. Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning[J]. Tree Physiology, 2015, 35(4): 341-345.
- [4] LIU X Z, KANG S Z, LI F S. Simulation of artificial neural network model for trunk sap flow of *Pyrus pyrifolia* and its comparison with multiple-linear regression [J]. Agricultural Water Management, 2009(96): 939-945.
- [5] 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.
- [6] TIE Q, HU H, TIAN F, et al. Environmental and physiological controls on sap flow in a subhumid mountainous catchment in north China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 240: 46-57.
- [7] 王媛,魏江生,刘兵兵,等.环境因子对大兴安岭南段白桦树干液流变化特征的影响[J].东北林业大学学报,2021,49(2):11-17.
WANG Y, WEI J S, LIU B B, et al. Effect of environmental factors on characteristics of sap flow of *Betula platyphylla* in southern Daxing'an Mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(2): 11-17. (in Chinese)
- [8] 魏志刚,夏德安,王瑞琪,等.小兴安岭带岭地区不同类型次生林下红松种源试验研究[J].森林工程,2021,37(3):1-11.
- [9] 王志超,杜阿朋.尾巨桉树干液流动态及其影响因子分析[J].

- 东北林业大学学报,2016,44(5):24-28.
- WANG Z C, DU A P. Characteristics of stem sap flow of *Eucalyptus* and its relation to environmental factors[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(5): 24-28. (in Chinese)
- [10] 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 *Pinus taeda* trees[J]. Tree Physiology, 2004, 24(9): 941-950.
- [11] 王艳兵, 王彦辉, 熊伟, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松树干液流速率及主要影响因子的坡位差异[J]. 林业科学, 2017, 53(6): 10-20.
- WANG Y B, WANG Y H, XIONG W, *et al.* Variation in the sap flow velocity of *Larix principis-rupprechtii* and its impact factors in different slope positions in a semi-arid region of Liupan Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(6): 10-20. (in Chinese)
- [12] 吴鹏, 杨文斌, 崔迎春, 等. 喀斯特区天峨峨(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)
- [13] 鄢春华, 王蓓, 邹振东, 等. 九寨沟针阔混交林的夜间液流及其分配特征研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2020, 56(4): 732-738.
- YAN C H, WANG B, ZOU Z D, *et al.* Characteristics of nighttime sap flow and its partition in a mixed forest in Jiuzhaigou Valley[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(4): 732-738. (in Chinese)
- [14] 徐丹丹, 尹立河, 侯光才, 等. 毛乌素沙地旱柳和小叶杨树树干液流密度及其与气象因子的关系[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 375-382.
- [15] 万艳芳, 于澎涛, 刘贤德, 等. 祁连山青海云杉树干液流密度的优势度差异[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3106-3114.
- WAN Y F, YU P T, LIU X D, *et al.* Variation in sap flow density among levels of tree dominance in *Picea crassifolia* in the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3106-3114. (in Chinese)
- [16] 赵仲辉, 康文星, 田大伦, 等. 湖南会同杉木液流变化及其与环境因子的关系[J]. 林业科学, 2009, 45(7): 127-132.
- ZHAO Z H, KANG W X, TIAN D L, *et al.* Sap flow rate and its relationship with environmental factors of Chinese fir plantation in Huitong, Hunan Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(7): 127-132. (in Chinese)
- [17] 张静, 王力, 韩雪, 等. 不同时间尺度下黄土塬区19年生苹果树干液流速率与环境因子的关系[J]. 中国农业科学, 2016, 49(13): 2583-2592.
- [18] 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.
- [19] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 等. 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[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 77-85.
- WANG W J, SUN W, QIU L, *et al.* Relations between stem sap flow density of *Larix gmelinii* and environmental factors under different temporal scale[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(1): 77-85. (in Chinese)
- [20] FORD C R, HUBBARD R M, KLOEPEL B D, *et al.* A comparison of sap flux-based evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145 (3/4): 176-185.
- [21] NICOLAS E, TORRECILLAS A, ORTUNO M F, *et al.* Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements[J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(2): 131-145.
- [22] 孔喆, 陈胜楠, 律江, 等. 欧美杨单株液流昼夜组成及其影响因素分析[J]. 林业科学, 2020, 56(3): 8-20.
- KONG Z, CHEN S N, LÜ J, *et al.* Characteristics of *Populus euramericana* sap flow over day and night and its influencing factors[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(3): 8-20. (in Chinese)
- [23] ZEPPEL M J B, MURRAY B R, BARTON C, *et al.* Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia[J]. Functional Plant Biology, 2004, 31(5): 461-470.
- [24] 刘朋飞, 郭浩, 辛智鸣. 乌兰布和沙漠沙枣树干液流与环境因子关系[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(9): 177-184.
- LIU P F, GUO H, XIN Z M. The relationship between the stem sap flow of *Elaeagnus angustifolia* Linn. and environmental factors in Ulan Buh Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(9): 177-184. (in Chinese)
- [25] 李青华, 穆艳, 王延平. 黄土丘陵沟壑区山地苹果林蒸散特征[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2818-2828.
- [26] 赵春彦, 司建华, 鱼腾飞, 等. 胡杨树树干液流进程与太阳辐射的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 99-104.
- ZHAO C Y, SI J H, YU T F, *et al.* Relationship between process of xylem sap flow of *Populus euphratica* and solar radiation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(5): 99-104. (in Chinese)
- [27] 赵梦炯, 吴文俊, 马超, 等. 陇南地区土壤水分及气象因子对橄榄树干液流的响应特征[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 104-109.
- ZHAO M J, WU W J, MA C, *et al.* Influence of soil moisture and meteorological factors on stem sap flow of Olive in southern Gansu[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 104-109. (in Chinese)
- [28] 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 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)
- [29] 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子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)