

DOI: 10.5846/stxb202111303375

洪光宇, 王晓江, 高孝威, 胡尔查, 李梓豪, 李卓凡, 刘婷, 杨海峰, 郝雯, 王乐军. 毛乌素沙地杨柴液流变化对气象因子的响应. 生态学报, 2023, 43(4): 1635-1645.

Hong G Y, Wang X J, Gao X W, Hu E C, Li Z H, Li Z F, Liu T, Yang H F, Xi W, Wang L J. Responses of sap flow of *Hedysarum leave* to climatic factors in Mu Us Sandy land. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1635-1645.

毛乌素沙地杨柴液流变化对气象因子的响应

洪光宇, 王晓江*, 高孝威, 胡尔查, 李梓豪, 李卓凡, 刘婷, 杨海峰, 郝雯, 王乐军

内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010

摘要:采用 FLOW32-1K (Thermal Dissipation Probe) 热平衡包裹式液流仪对毛乌素沙地杨柴 (*Hedysarum leave*) 植株液流速率进行了连续监测, 同步监测灌木林地内气温、太阳辐射、相对湿度和饱和水汽压差 (VPD) 等气象因子, 探讨了在不同时间尺度下杨柴植株液流特征及其与气象因子的关系。结果表明: (1) 不同径级 (3—4 mm、4—6 mm 和 >6 mm) 杨柴植株的日平均液流速率分别为 5.61 g/h、9.29 g/h、35.30 g/h, 平均日液流量分别为 (134.72±82.48) g/d、(223.06±152.20) g/d、(847.23±403.38) g/d。不同天气条件下的树干液流速率晴天>阴天, 液流速率变化呈“昼高夜低”, 不同月份表现为 8 月>7 月>9 月。(2) 影响晴天和雨天杨柴植株液流的首要气象因子都是太阳辐射, 小时尺度下, 太阳辐射、气温、相对湿度和饱和水汽压共同解释杨柴液流的 75% 以上, 在日尺度下, 气象因子可以共同解释其 80.8% 以上; 且随着时间尺度增大, 进入回归方程的气象因子个数呈减小趋势, 但气象因子对杨柴液流变化的解释度呈增加趋势。研究在未来不能进行连续观测的条件下, 通过气象因子和预测模型来估算杨柴液流变化, 进而可指导毛乌素沙地植被恢复与水资源管理。

关键词: 杨柴; 液流; 气象因子; 时间尺度; 毛乌素沙地

Responses of sap flow of *Hedysarum leave* to climatic factors in Mu Us Sandy land

HONG Guangyu, WANG Xiaojang*, GAO Xiaowei, HU Ercha, LI Zihao, LI Zhuofan, LIU Ting, YANG Haifeng, XI Wen, WANG Lejun

Inner Mongolia Forestry Research Institute, Hohhot 010010, China

Abstract: The FLOW32-1K wrapped heat balance sap flow meter was used to conduct long-term continuous observation on the sap flow velocity of *Hedysarum leave* in the Mu Us Sand land. In addition, the meteorological factors including air temperature (T), solar radiation (R), relative humidity (RH), vapor pressure deficit (VPD), and the characteristics of *H. leave* sap flow were investigated. The correlations between environmental factors and different temporal scales were determined. The findings revealed the following: (1) the average daily sap flow rates of different diameter classes (3—4 mm, 4—6 mm, and >6 mm) were 5.61 g/h, 9.29 g/h, and 35.30 g/h, respectively. The average daily sap flow was (134.72±82.48) g/d, (223.06±152.20) g/d, and (847.23±403.38) g/d, respectively. Under different weather conditions, the sap flow rate was higher in sunny days than that in rain days, and the change of sap flow rate was higher in day and lower in night, with different months being August > July > September. (2) Solar radiation was the main meteorological factor affecting plant sap flow in different days. At the hourly scale, solar radiation, temperature, relative humidity and saturated vapor pressure could explain more than 75% of sap flow, whiel at the daily scale, the meteorological factors could explain more than 80.8% of sap flow. With the increase of time scale, the number of meteorological factors

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2019MS03036); 内蒙古重大专项 (2019ZD007, 201601061)

收稿日期: 2021-11-30; 网络出版日期: 2022-10-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xjwang_21cn@163.com

entering the regression equation decreased, but the explanatory degree to the change of sap flow of *H. leave* increased. In this study, the change of *H. leave* sap flow was estimated by meteorological factors and prediction model under the condition that continuous observation could not be carried out in the future, so as to guide vegetation restoration and water resource management in Mu us Sandy land.

Key Words: *Hedysarum leave*; sap flow; meteorological factors; temporal scale; Mu Us Sandy land

植物通过蒸腾引起树干内液流的上升,蒸腾耗水是植物利用水分的主要环节^[1],有研究显示,植物蒸腾所需水分的 99.8% 来自于树干液流^[2-3],树干液流中 90% 以上用于植物的蒸腾^[4-5],因此植物液流量的变化可以反应植物自身的生理生化特性以及水分的消耗利用规律^[6-7]。植物液流变化与环境因子密切相关^[8-10],因此分析掌握植物茎干液流变化特征对环境因子的响应,可以估算植物群落在不同时间与空间尺度上的蒸散量^[11-12]。

近年来,热平衡技术由于其灵敏度高、精度高、无需标定且可连续测定的优点,根据其原理研发的包裹式茎流仪被广泛采用。在干旱半干旱区,已应用于测量河西走廊中段绿洲—荒漠过渡带主要固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)^[13]、河西走廊中段荒漠生态系统典型固沙植物沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)^[14]、柴达木盆地的沙棘(*Hippophae rhamnoides*)^[15]、河西走廊中段典型固沙植物白刺(*Nitraria tangutorum*)^[16]、干旱荒漠区沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)^[17]、毛乌素沙地花棒(*Hedysarum scoparium*)^[18]、毛乌素沙地沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)^[19]、毛乌素沙地沙柳(*Salix psammophila*)^[20]等不同树种的茎干液流研究。有学者对不同时间尺度植物液流的变化特征进行了探讨,桑玉强等^[21]、王卓等^[15]、徐利岗等^[22]、刘毅等^[23]及陈亚鹏^[24]等研究了不同树种在小时、日、月及季节时间上的液流变化规律并分析了与气象因子的相关性。

杨柴(*Hedysarum leave*)广泛分布于我国西北部的干旱半干旱地区^[25],是重要的沙地植物。杨柴因其耐干旱能力强、易萌蘖和耐沙埋等特点成为沙区人工林建植的主要灌木树种。1978 年开始,杨柴在毛乌素沙地进行了飞播造林,早年飞播的杨柴人工林已经出现了群落演替^[26],杨柴群落个体的大小和密度变化呈相反趋势^[27],杨柴个体的有性和无性繁殖受到水和养分的影响^[28],可以分析出在有限的环境条件下,杨柴群落种内的竞争影响着群落的分布格局和群落的演替。近些年,学者主要通过对群落耗水量与土壤水分承载力的相关研究来判定群落的稳定性^[29-30],以此来找到毛乌素沙地人工林可持续经营的方法。

本实验选取了毛乌素沙地典型飞播杨柴人工灌木林为研究对象,对其植株的液流速率及气象因子进行同步连续监测,研究杨柴植株在生长旺季(7—9 月),不同时间尺度下液流特征及其对气象因子的响应,建立杨柴日液流量与气象因子的拟合模型,同时对拟合模型进行验证,以期对毛乌素沙地杨柴人工林生态需水估算、林分建植过程中密度的选择以及林分建植后的可持续经营提供理论依据。

1 研究区概况

毛乌素沙地位于北纬 37°27.5'—39°22.5',东经 107°20'—111°30',海拔 1200—1600 m,包括内蒙古自治区鄂尔多斯市的南部、陕西省榆林市的北部风沙区以及宁夏回族自治区盐池县东北部,本研究位于毛乌素沙地腹地鄂尔多斯市乌审旗乌兰陶勒盖治沙站内。该地区属于温带半干旱大陆性季风气候,年均温 6.0—8.5℃,年均降水量 250—440 mm,年均蒸发量 1800—2500 mm。土壤类型为典型风沙土,易受风沙的强烈侵蚀而形成粗结构。地貌类型包括固定、半固定、半流动、流动沙丘以及丘间地。该地区植被覆盖度低,种类较少,主要以旱柳(*Salix matsudana*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)、沙柳、杨柴和花棒等沙旱生植物为主^[20]。

2 材料与方法

2.1 实验样地的选取

以内蒙古自治区鄂尔多斯市乌审旗乌兰陶勒盖治沙站内飞播 18 a 的杨柴灌木林地为研究对象。通过对

毛乌素沙地不同飞播年限杨柴人工林林分生长变化进行了研究^[26],可知飞播 18 a 的杨柴群落结构较稳定,因此可作为长期研究杨柴液流变化最为理想的样地。经面上踏查和前期工作基础,在杨柴人工林中选取具有代表性的区域,于 2017 年设立杨柴群落长期监测固定样地(20 m×20 m)(图 1)。

在 2018 年的 6 月初对固定样地内的植被进行调查,同时在固定监测样地附近设置 3 个 50 m×50 m 的样方。在每个样方内东南西北四个角和中间位置,共设置 5 个 5 m×5 m 的小样方进行植被调查。根据长期对杨柴群落进行植被调查的数据,可知地径>6 mm 杨柴林龄在 5 年以上,地径范围在 4—6 mm 的杨柴林龄在 3—5 年,地径范围在 3—4 mm 的杨柴多为当年生枝条。根据对样地内杨柴地径调查的结果将杨柴群落的植株分为 3 个径级(3—4 mm、4—6 mm 和>6 mm)(图 2),径级主要分布在 4—6 mm 间,粗径级枝条较少。



图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the studied area

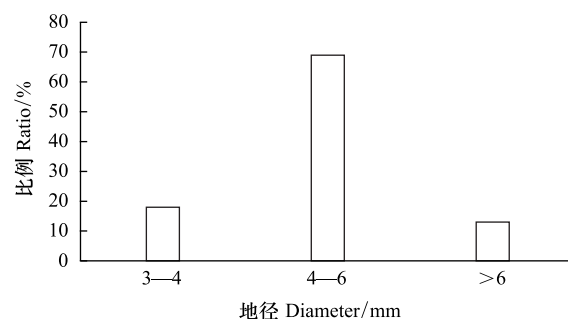


图 2 研究区杨柴地径频率分布

Fig.2 Basal diameter frequency distribution in the sample plots of *H. leave*

2.2 仪器安装与设定

本研究选取美国 Dynamax 公司研发的 Flow32 包裹式植物液流计根据地径分布比例共选取 11 株不同径级杨柴植株液流变化进行测定。测定系统由 2 个 CR1000 数据采集器,11 条 15 m 长的 EXTP-50 连接线,11 组热量扩散传感器,太阳能板等辅助设备构成。通过计算机分别将被测枝条的茎干类型、横截面积、探头电压、起始时间、数据记录间隔等参数输入到数据采集器并设置采集数据时间,本研究的数据采集间隔为 60 s。杨柴植株液流监测时间为 2018 年的 6—10 月。

2.3 气象因子测定

在固定样地内同时安装了 HOBO U30 小型气象站。该气象站监测并采集试验区气象因子的时间与液流监测时间同步,包括大气温度(T)、降雨量(P)、太阳辐射强度(R)、大气相对湿度(RH)、地表温度(T_d)等进行测定。每 30 min 记录 1 次数据并进行存储。定义持续高温及其强辐射的天气为晴天,出现降雨事件则为雨天。

2.4 饱和水汽压差(VPD)

饱和水汽压差是指在一定温度下,饱和水汽压与空气中的实际水汽压之间的差值,它表示的是实际空气距离水汽饱和状态的程度,即空气的干燥程度。饱和水汽压差影响着植物气孔的闭合,从而控制植物蒸腾、光合等生理过程,这对森林生态系统蒸散过程以及水分利用效率有着重要影响。饱和水汽压差(VPD)计算方法为:

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

$$VPD = 0.61078E(1 - RH)$$

式中, E 是饱和空气压力, RH 是相对湿度, t 为空气温度。

2.5 数据处理

Excel 2007 软件对枝条液流数据以及气象因子数据进行处理和绘图。为了准确分析不同天气杨柴液流速率的日动态变化,分别选择杨柴完全展叶期时的晴天和雨天。选取 3 天内无降雨并且太阳辐射高的天气为

晴天代表,选取白天某时间段有连续降雨过程并且水汽压亏缺较高的天气为雨天代表。因此,选取 8 月 3 日—5 日为晴天代表天气,7 月 10 日、15 及 17 日为雨天代表天气,对不同天气情况下树干液流的动态变化进行分析。杨柴不同径级月液流速率变化是通过杨柴每月日液流速率平均值所得。

采用 SPSS 19.0 软件的 Pearson 相关处理和回归分析法对特定时刻点的液流速率与应时间点的气象因子数据、每日液流量与每日气象因子的平均数据进行处理分析。

3 结果与分析

3.1 杨柴液流速率变化特征及其与气象因子的关系

3.1.1 日尺度下晴天和雨天杨柴植株液流速率特征

雨天和晴天时,杨柴液流速率呈明显的昼夜变化(图 3),白天高于夜晚。晴天,液流速率变化较平稳,径级 >6 mm 的杨柴植株液流速率波动呈“双峰”曲线,径级 4—6 mm 和 2—4 mm 呈“几”字形曲线。雨天液流速率波动较剧烈,尤其是在白天变化幅度较大,呈“多峰”曲线。

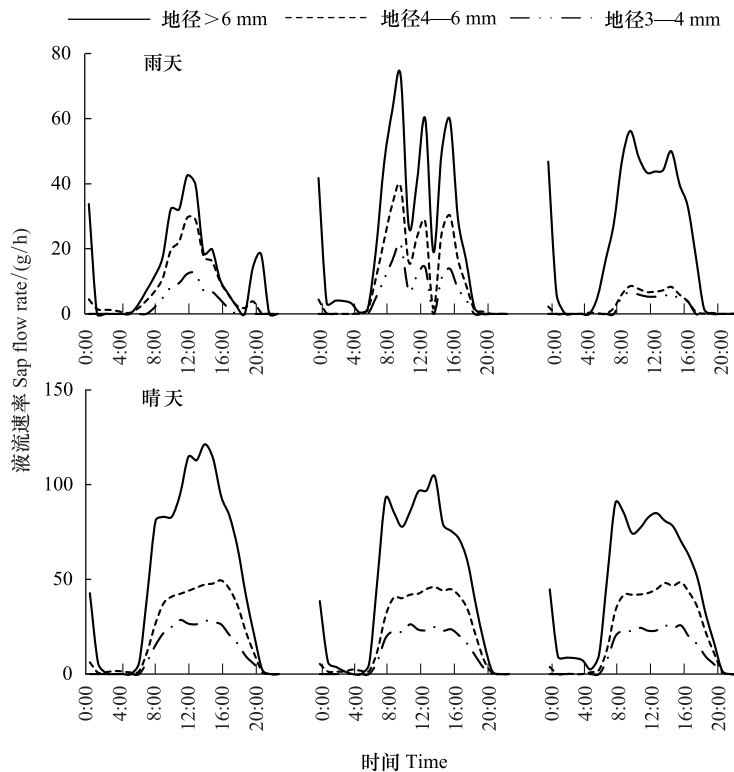


图 3 不同径级杨柴液流速率日变化趋势

Fig.3 Diurnal variation of stems sap flow in *Hedysarum* leave branch at different diameter class

晴天时,杨柴植株随着径级的增加液流速率逐渐增大,径级 >6 mm 的杨柴植株在 21:00—23:00 间液流速率接近于 0,在 0:00 液流速率瞬时增大到 44.8 g/h,1:00—5:00 间液流速率维持在一个较低值,并且随着时间的变化呈减小趋势,6:00 左右液流速率开始升高,8:00 时达到了最大值 90.5 g/h,而后液流速率逐渐减小,在 11:00 时液流速率上升,13:00 达到了一个峰值 84.9 g/h,而后液流速率随着时间逐渐减小。径级 4—6 mm 的杨柴植株在 21:00—5:00 间液流速率接近于 0,在 0:00 时出现了明显的液流现象,液流速率为 3.8 g/h,6:00 左右液流速率开始升高,14:00—16:00 间达到了较大值在 47.7 g/h,而后液流速率随着时间逐渐减小。径级 2—4 mm 的杨柴植株在 21:00—6:00 间液流速率接近于 0,7:00 左右液流开始启动并逐渐增大,14:00—16:00 间达到了较大值在 25.2 g/h 左右,而后液流速率随着时间逐渐减小。在雨天条件下,径级 >6 mm 的杨

柴植株平均液流速率为 23.5 g/h, 径级 4—6 mm 的杨柴植株平均液流速率为 11.1 g/h, 径级 2—4 mm 的杨柴植株平均液流速率为 5.1 g/h。杨柴植株全天液流速率低于晴天, 液流速率变化波动较大。

3.1.2 月尺度杨柴液流速率变化特征

选取 7—9 月每月杨柴日平均液流速率进行研究(图 4), 对比分析不同月份杨柴液流速率的变化趋势, 可以看出径级 >6 mm 杨柴液流平均速率 8 月 > 9 月 > 7 月, 径级 4—6 mm 和 3—4 mm 杨柴液流平均速率 7 月 > 8 月 > 9 月。径级 >6 mm 和 4—6 mm 杨柴液流速率到达峰值的时间逐渐提前, 峰值时间分别为 14:00、13:00 和 11:00, 径级 3—4 mm 杨柴液流速率峰值出现的时间先提前在推后, 7—9 月份峰值出现的时间分别为 14:00、15:00 和 11:00。杨柴植株液流持续时间逐渐缩短, 回落到低值的时间均提前。

3.1.3 日尺度杨柴液流变化与气象因子的相关性

将各气象因子与杨柴液流速率进行曲线拟合, 选择拟合度最高的模型(表 1)。总体而言, 太阳辐射与杨柴液流速率的拟合度晴天高于雨天, 而其它气象因子则为雨天高于晴天。雨天不同径级杨柴液流速率与气象因子拟合度相对较高, 各气象因子解释液流速率的变化均超过 0.7, 其中饱和水汽压差的拟合度最高。晴天不同径级杨柴液流速率与气象因子拟合度不同, 径级 >6 mm 杨柴液流速率日与太阳辐射拟合度最高, 径级 4—6 mm 杨柴液流速率与太阳辐射、温度、相对湿度和饱和水汽压差的拟合度较高, 径级 3—4 mm 杨柴液流速率与太阳辐射、气温和饱和水汽压差的拟合度较高。不论在雨天和晴天, 径级 4—6 mm 杨柴液流速率与各气象因子的系数高于其它径级。

表 1 不同天气液流速率变化与气象因子关系模型

Table 1 The relationship model between the stem flow rate and meteorological factors in different weather

天气 Weather	径级/mm Diameter lass	因子 Parameters	回归方程 Regression equation	R^2	P
雨天 Rainy day	>6	T	$Y=0.919T^2-33.167T+297.093$	0.710	0.000
		R	$Y=2.693\times 10^{-7}R^3+0.0001R^2+0.205R+4.534$	0.719	0.004
		RH	$Y=0.0001RH^3-9.741RH+646.448$	0.805	0.000
		VPD	$Y=-209.990VPD^3+400.637VPD^2-129.509VPD+12.539$	0.851	0.000
	4—6	T	$Y=0.588T^2-21.858T+200.692$	0.837	0.000
		R	$Y=1.756\times 10^{-7}R^3+1\times 10^{-4}R^2+0.117R+0.400$	0.809	0.000
		RH	$Y=1\times 10^{-4}RH^3-6.042RH+390.087$	0.848	0.000
		VPD	$Y=-136.986VPD^3+265.940VPD^2-98.363VPD+9.198$	0.941	0.000
	3—4	T	$Y=0.358T^2-13.878T+133.794$	0.836	0.000
		R	$Y=1.260\times 10^{-7}R^3+0.0001R^2+0.062R-0.134$	0.798	0.000
		RH	$Y=1\times 10^{-4}RH^3-3.657RH+229.930$	0.875	0.000
		VPD	$Y=-61.830VPD^3+125.849VPD^2-48.209VPD+4.436$	0.943	0.000
晴天 Clear day	>6	T	$Y=5.718T-105.05$	0.639	0.000
		R	$Y=3.679\times 10^{-7}R^3-0.001R^2+0.373R+7.954$	0.899	0.001
		RH	$Y=-1.412RH+132.044$	0.505	0.000
		VPD	$Y=-1.533VPD^3+3.941VPD^2+28.939VPD+0.789$	0.560	0.000
	4—6	T	$Y=0.081T^2-1.078T-9.376$	0.831	0.000
		R	$Y=1.111\times 10^{-7}R^3+0.0001R^2+0.169R+2.670$	0.891	0.000
		RH	$Y=0.009RH^2-1.993RH+103.999$	0.715	0.000
		VPD	$Y=-1.938VPD^3+9.840VPD^2+2.139VPD+0.779$	0.773	0.000
	3—4	T	$Y=0.0001T^3+0.05T^2-16.533$	0.775	0.000
		R	$Y=3.315\times 10^{-8}R^3-8.999\times 10^{-5}R^2+0.081R+0.694$	0.930	0.000
		RH	$Y=0.003RH^2-0.847RH+49.528$	0.644	0.001
		VPD	$Y=-0.792VPD^3+3.422VPD^2+4.940VPD-1.369$	0.705	0.001

T : 气温 Air temperature; R : 太阳辐射 Solar radiation; RH : 相对湿度 Relative humidity; VPD : 饱和水汽压差 Vapor pressure deficit

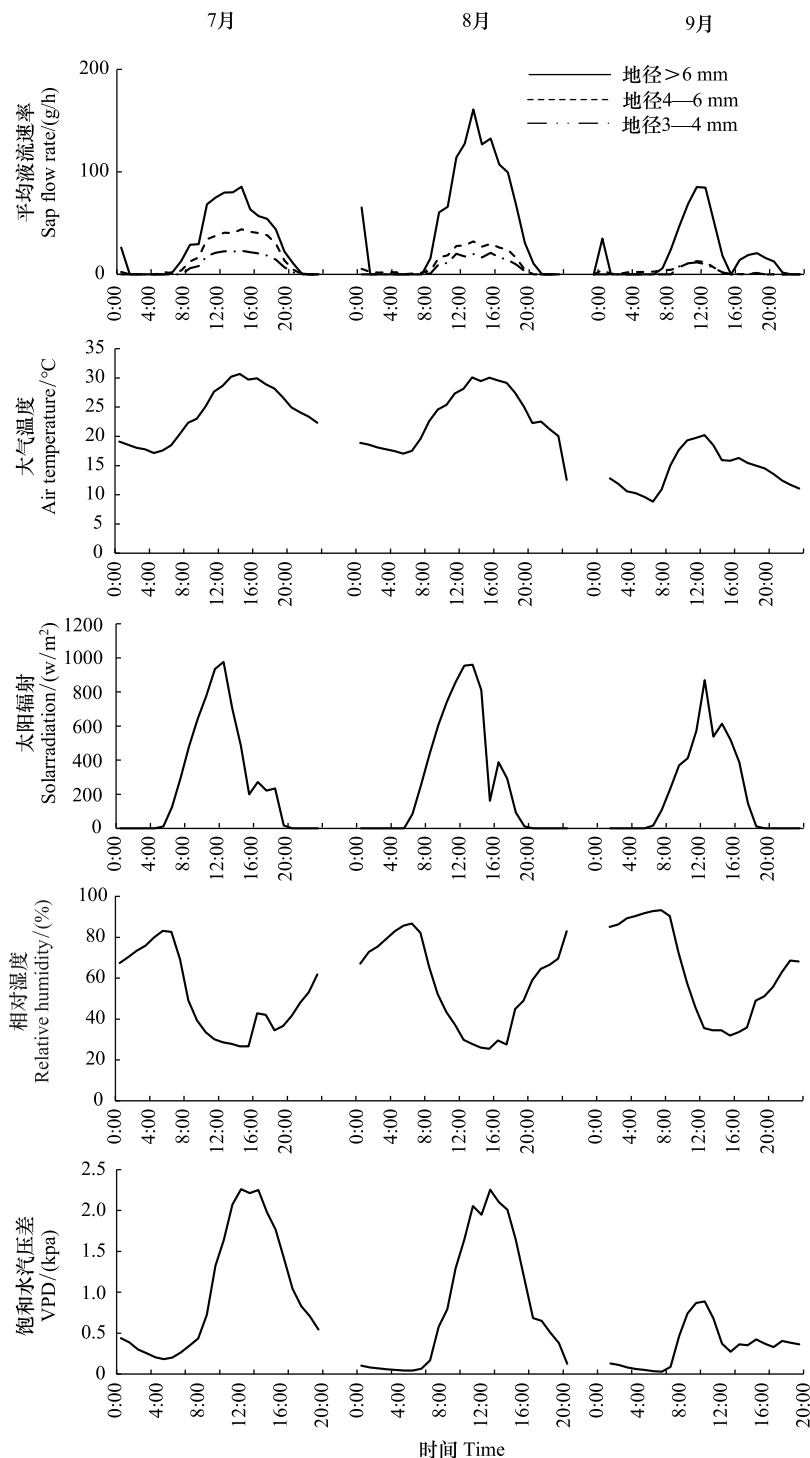


图 4 不同月份杨柴液流速率及气象因子日变化特征

Fig.4 Diurnal variation of stems sap flow and meteorological factors of different month
VPD: 饱和水汽压差 Vapor pressure deficit

为了探讨不同天气条件下气象因子对杨柴液流变化的复合影响,建立杨柴日液流量与气象因子的关系,以气温、太阳辐射、相对湿度和饱和水汽压差为自变量,杨柴日液流量为因变量,根据步进法标准,利用多元线性逐步回归分析建立杨柴日液流量与多气象因子间的综合关系模型(表 2)。回归方程中杨柴样地解释度均大于 0.8($P<0.01$),说明能较好地预测在不同天气时杨柴日液流量的变化情况。从关系模型可以看出,雨天

时,太阳辐射、气温和饱和水汽压差是控制地径<6 mm 杨柴日液流量的主要因子,相对湿度和太阳辐射是控制地径>6 mm 杨柴日液流量的主要因子。晴天时气温、太阳辐射和相对湿度是控制地径<6 mm 杨柴日液流量主要因子,饱和水汽压差是控制地径>6 mm 杨柴日液流量的主要因子。

表 2 不同天气条件下液流量与气象因子的多元回归模型

Table 2 Multiple regression models of stem flow and meteorological factors under different weather conditions				
天气 Weather	径级/mm Diameter lass	回归方程 Regression equation	R^2	P
雨天 Rainy day	>6	$Y = -11.307RH + 2.627R + 1152.824$	0.835	<0.01
	4—6	$Y = 148.642VPD + 13.057T + 0.711R - 252.717$	0.881	<0.01
	3—4	$Y = 94.796VPD + 0.491R + 4.982T - 118.74$	0.941	<0.01
晴天 Clear day	>6	$Y = 352.606VPD + 780.878$	0.864	<0.01
	4—6	$Y = 26.353T + 0.542R - 3.918RH - 113.590$	0.863	<0.01
	3—4	$Y = 12.597T + 0.278R - 2.428RH + 0.278$	0.868	<0.01

3.2 月尺度下杨柴日蒸腾耗水变化特征及与气象因子的关系研究

2018 年 7 月—9 月间杨柴日液流量波动趋势具有明显季节性(图 5),杨柴日蒸腾耗水随着时间呈先增加后减小的趋势。径级>6 mm 杨柴日蒸腾耗水波动幅度较大,日蒸腾耗水明显大于其它两个径级。径级>6 mm 杨柴日蒸腾耗水峰值主要出现在 8 月中下旬,在 1404.7—1615.8 g 之间。径级 4—6 mm 和 3—4 mm 的杨柴日蒸腾耗水峰值主要出现在 7 月底和 8 月初之间,分别在 467.7—523.0 g 和 268.9—313.8 g 之间。径级>6 mm 杨柴日蒸腾耗水峰值平均值为(847.23±403.38) g/d,径级 4—6 mm 杨柴日蒸腾耗水峰值平均值为(223.06±152.20) g/d,径级 2—4 mm 杨柴日蒸腾耗水流峰值平均值为(134.72±82.48) g/d。9 月 25 日以后杨柴日蒸腾耗水逐渐减小,最后趋于 0。

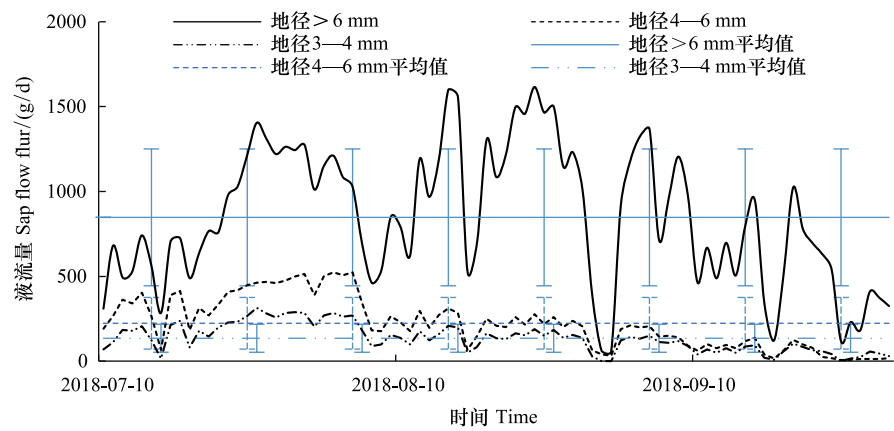


图 5 不同径级杨柴日蒸腾耗水变化

Fig.5 Diurnal variation of transpiration in *Hedysarum* leave branch at different diameter class

不同径级杨柴蒸腾耗水对气象因子的响应关系(表 3)。7 月、8 月和 9 月杨柴日蒸腾耗水与日平均气温、太阳辐射、饱和水汽压差呈极显著正相关关系,与日平均相对湿度呈极显著负相关关系。总体而言,杨柴蒸腾耗水与饱和水汽压差、太阳辐射、气温呈极显著正相关关系,与相对湿度呈极显著负相关关系。

7 月份,杨柴日蒸腾耗水对饱和水汽压差和相对湿度响应较高,且高于其它月份,相关系数绝对值均大于 0.86,其次是太阳辐射和气温。8 月份,径级>6 mm 杨柴液流量对相对湿度、的响应最大,其次是太阳辐射和饱和水汽压差,相关系数分别为-0.779、0.738 和 0.662;径级 4—6 mm 杨柴日蒸腾耗水对气温和饱和水汽压差的响应较高,系数均大于 0.85,其次是太阳辐射和相对湿度,相关系数分别为 0.772 和-0.75;径级 3—4 mm

杨柴日蒸腾耗水对气温和饱和水汽压差、太阳辐射和相对湿度的响应较高,系数绝对值均大于 0.85,对气温的响应最低相关系数为 0.82。9 月份,径级>6 mm 杨柴日蒸腾耗水对饱和水汽压差和太阳辐射的响应程度最大,其次是相对湿度和气温,相关系数分别为 0.869、0.725、-0.628 及 0.416。径级 4—6 mm 和 3—4 mm 杨柴日蒸腾耗水对气象因子的响应趋势与 8 月份相同,但系数均减小。

表 3 杨柴日蒸腾耗水与气象因子的相关系数

Table 3 The correlation coefficient between the transpiration in different ground diameters and meteorological factors

月份 Month	径级/mm diameter lass	气温 <i>T</i> /℃	相对湿度 <i>RH</i> /%	太阳辐射 <i>R</i> /(w/m ²)	饱和水汽压差 VPD/hPa
7	>6	0.629 **	-0.875 **	0.673 **	0.869 **
	4—6	0.755 **	-0.929 **	0.827 **	0.939 **
	3—4	0.766 **	-0.926 **	0.834 **	0.944 **
8	>6	0.233	-0.779 **	0.738 **	0.662 **
	4—6	0.882 **	-0.750 **	0.772 **	0.859 **
	3—4	0.820 **	-0.850 **	0.861 **	0.908 **
9	>6	0.416 *	-0.628 **	0.725 **	0.869 **
	4—6	0.621 **	-0.419 *	0.612 **	0.707 **
	3—4	0.465 **	-0.636 **	0.777 **	0.878 **

* * 表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关,* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

根据多元线性回归分析中步进法进行分析,建立杨柴日蒸腾耗水与多气象因子的多元回归模型(表 4)。拟合公式中 R^2 均大于 0.85($P<0.01$),达到了显著水平,模型均可以通过气象因子较好的预测杨柴日蒸腾耗水在不同月份的变化情况。从关系模型可以看出,径级>6 mm 杨柴日蒸腾耗水在 7 月单独被太阳辐射控制,8 月份被相对湿度、气温、太阳辐射和饱和水汽压差共同控制,9 月份被相对湿度和水汽压差共同控制;径级 4—6 mm 和 3—4 mm 杨柴日蒸腾耗水在 7 月和 9 月间共同被气温、太阳辐射和饱和水汽压差控制,8 月份径级 4—6 mm 杨柴日蒸腾耗水被气温和饱和水汽压差共同控制,径级 3—4 mm 杨柴日蒸腾耗水被太阳辐射和饱和水汽压差共同控制。

表 4 杨柴日蒸腾耗水与气象因子的多元回归模型

Table 4 A multivariate regression model of transpiration and meteorological factors

月份 Month	径级/mm diameter lass	回归方程 Regression equation	R^2	P
7	>6	$Y=3.616R-12.330$	0.910	0.000
	4—6	$Y=170.868VPD+0.505R+13.875T-224.2$	0.911	0.000
	3—4	$Y=100.599VPD+13.051T+0.383R-281.255$	0.901	0.000
8	>6	$Y=-56.8RH-41.763T+3.88R-1025.503VPD+6309.197$	0.808	0.000
	4—6	$Y=25.619T+139.201VPD-429.775$	0.875	0.000
	3—4	$Y=0.517R+91.584VPD-19.231$	0.920	0.000
9	>6	$Y=2572.169VPD+24.164RH-2350.265$	0.857	0.000
	4—6	$Y=90.641VPD+7.709T+0.378R-112.525$	0.922	0.000
	3—4	$Y=95.391VPD+3.19T+0.159R-43.602$	0.931	0.000

4 讨论

4.1 杨柴液流速率动态变化规律

本研究中,杨柴液流速率日变化表现为晴天>雨天,不同径级的杨柴植株液流速率日变化也呈现明显的差异。晴天时,随着径级的增加杨柴液流速率日由“几”字形曲逐渐变化成“双峰”曲线,杨柴液流速率也呈增大趋势,径级<6 mm 的杨柴植株没有明显的“午休”现象,一般在干旱半干旱区的植物在多气象因子共同影响

下,植物叶表面饱和水汽压亏缺接近平衡,气孔开度决定不了蒸腾,主要由太阳辐射对其产生影响^[31-32],而径级>6 mm 的杨柴植株出现明显的“午休”现象,是由于干旱半干旱区午间的光合有效辐射强度大、气温相对较高,植物做出调控策略,自身气孔关闭防止体内水分流失剧烈^[33],因此中午时刻液流速率出现短暂液流回流现象。

本文发现杨柴植株夜间有液流发生,随着径级的增加呈增大趋势,并且不同径级杨柴夜间液流也存在明显的差异,>6 mm 杨柴植株在夜间出现短时较大的液流,径级 4—6 mm 杨柴植株在夜间出现液流持续时间较长,但总液流量小于>6 mm 杨柴植株,径级 3—4 mm 杨柴植株基本上没有出现夜间液流,说明杨柴在各生长阶段都需要通过黎明启动前储存水分来缓解日蒸腾水分的亏缺^[34],通过液流进行茎干补水,增加了茎干和叶片水势,有利于气孔导度提前开启,并且蒸腾作用时可以优先利用茎干储存的水分,有效地缓解了干旱胁迫对光合作用的影响,这是干旱、半干旱区植物特有的特性,可以使植物的碳固定顺利进行,减少植物木质部的栓塞化,维持旱季的叶片生命^[35]。雨天时,空气相对湿度较大,饱和水汽压差降低,阻碍枝条气孔开放,导致土壤水分不能充分的运输到杨柴地上部供杨柴植株吸收利用,这与 Hayat 等^[36]、张晓艳等^[13]的研究结果一致,由于雨天,叶片表面的湿润度高或者气孔出现关闭的次数增多,叶片内外的水气交换过程减弱,因此限制了植物的蒸腾速率。

4.2 杨柴耗水量特征

杨柴液流变化呈明显的季节性波动,7—9 月间,杨柴日液流变化差异显著,径级>6 mm 的杨柴液流速率随着时间序列呈先增加后减小的趋势。监测期间日液流波动的峰值主要集中在 8 月份,由于 8 月份正是干旱区植物的生长旺季,杨柴处于完全展叶期,叶面积指数大,而径级>6 mm 的杨柴液流速率在 7 月份仅受太阳辐射的影响较大,但是在 8 月份受气象因子共同影响,该月份相对湿度较小、气温较高、太阳辐射较强,促进了杨柴蒸腾耗水。<6 mm 杨柴液流速率随着时间序列逐渐减小,这与该径级内杨柴自身的生理特性有关,通常地径<6 mm 杨柴植株大多数属于当年萌生植株,即使是同树种但是生物学结构不同,因此对环境因子的响应不同,因此液流速率的变化趋势不同,并且降雨量主要集中在 7 月和 8 月间,但 8 月的温度和太阳辐射显著高于 7 月,因此导致了土壤水分的亏缺,因此会限制生长盛期植物的蒸腾作用。9 月底杨柴液流量逐渐减小最后趋于 0,杨柴在该月份由于受到环境和其自身的生理生化特性,生理活性降低,植株枯死,因此蒸腾减小。

4.3 环境因子对杨柴蒸腾耗水的影响

不同天气及时间尺度下,不同径级杨柴液流变化对气象因子的响应不同,在晴天条件下,太阳辐射、相对湿度和气温对地径<6 mm 的杨柴植株蒸腾影响较大,饱和水汽压对地径>6 mm 的杨柴植株蒸腾影响较大,这与天峨械^[37]、桤柳^[38]等的研究结果相近。雨天饱和水汽压差和太阳辐射决定了杨柴液流速率变化,这与 Hayat 等^[36]、姚依强等^[39]和 Pei 等^[40]研究结果基本一致,太阳辐射和饱和水汽压差对沙生灌木的液流起主导作用,决定了植物进行光合作用的能力,饱和水汽压差驱动着植物进行水汽交换,促进植物的蒸腾。

月尺度下,7 月杨柴处于生长旺季初期,该月份降雨开始变得频繁,土壤水分含量相对 8 月较高,太阳辐射成为影响杨柴液流变化的敏感因子;8 月总体降水量占全年比例最高,但气温和太阳辐射较高导致植被蒸腾耗水量较大,土壤水分含量相对较低,相对湿度也影响了植株气孔开放,杨柴植株受气象因子的综合影响比较大,且波动较为剧烈;9 月份杨柴植株自身代谢开始降低,太阳辐射和气温开始变小,杨柴植株对土壤水分的消耗减小,此时饱和水汽压是带动杨柴日液流量变化的主要因子^[41]。可以看出不同月份及不同径级的杨柴受气象因子的影响存在较大的差异,因为不同生理结构的植物液流变化对气象因子对的响应关系比较复杂,因此影响植物液流的气象因子有一定的差异。

5 结论

(1) 杨柴植株液流速率呈昼高夜低的趋势,晴天液流速率随着径级增加从宽峰型曲线向双峰曲线变化。雨天液流速率呈多峰,并且曲线的变化幅度较大,日液流量明显小于晴天。

(2)不同径级杨柴液流生长季波动较大,随着直径增加波动幅度越大。不同径级杨柴日液流量值在7—9月间有明显的差异,>6 mm 杨柴液流量呈先增后降的趋势,<6 mm 杨柴液流量呈递减趋势。

(3)径级>6 mm 和4—6 mm 杨柴液流速率随着月份到达峰值的时间逐渐提前,径级3—4 mm 杨柴液流速率峰值出现的时间先提前在推后。7—9月间杨柴植株液流持续时间逐渐缩短,回落到低值的时间均提前。

(4)雨天时,杨柴液流速率受饱和水汽压差和太阳辐射共同影响;晴天时,杨柴液流速率受气温、太阳辐射和相对湿度共同影响。月尺度下,不同径级杨柴植株日液流量受到环境因子的影响存在差异,多气象因子共同控制杨柴日液流量。本研究的结果拟合效果均理想,可在不同时间尺度下预测杨柴蒸腾耗水特征。

参考文献 (References):

- [1] 张继澍. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [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 Landes forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 51(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] Swanson R H. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 72(1/2): 113-132.
- [5] Wullschlegel A D. A Review of Whole-Plant Use Studies in Trees. *Tree Physiology*, 1998(8-9): 499-512.
- [6] Oberbauer S F, Strain B R, Riechers G H. Field water relations of a wet-tropical forest tree species, *Pentaclethra macroloba* (Mimosaceae). *Oecologia*, 1987, 71(3): 369-374.
- [7] Bleby T M, McElrone A J, Jackson R B. Water uptake and hydraulic redistribution across large woody root systems to 20? m depth. *Plant, Cell & Environment*, 2010, 33(12): 2132-2148.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 蒋高明. 植物生理生态学. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [12] 于贵瑞. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学. 北京: 科学出版社, 2010.
- [13] 张晓艳, 褚建民, 孟平, 姚增旺, 王鹤松, 李得禄, 姜生秀. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭 (*Haloxylon ammodendron* (C.A.Mey) bunge) 树干液流特征及其对环境因子的响应. *生态学报*, 2017, 37(5): 1525-1536.
- [14] 徐世琴, 吉喜斌, 金博文. 典型荒漠植物沙拐枣茎干液流密度动态及其对环境因子的响应. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 345-353.
- [15] 王卓, 郭月峰, 祁伟, 姚云峰, 仲宸, 刘璐, 王佳坤. 不同灌水梯度下沙棘液流特征与环境因子的关系. *干旱区研究*, 2020, 37(4): 1018-1025.
- [16] 徐世琴, 吉喜斌, 金博文. 西北干旱区典型固沙植物夜间耗水及其影响因素. *西北植物学报*, 2015, 35(7): 1443-1450.
- [17] 郭树江, 徐先英, 杨自辉, 李爱德, 李得禄, 柴成武, 王多泽. 干旱荒漠区沙冬青茎干液流变化特征及其与气象因子的关系. *西北植物学报*, 2011, 31(5): 1003-1010.
- [18] 郭跃, 丁国栋, 吴斌, 张宇清, 韦立伟, 王卓, 毛振华. 毛乌素沙地花棒茎干液流规律研究. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 110-113.
- [19] 郭跃, 丁国栋, 吴斌, 张宇清, 韦立伟, 梁文俊, 王志波, 毛振华. 毛乌素沙地沙木蓼茎干液流规律研究. *水土保持通报*, 2010, 30(5): 22-26.
- [20] 洪光宇, 王晓江, 刘果厚, 张雷, 高孝威, 李卓凡, 刘铁山, 刘辰明, 李梓豪. 毛乌素沙地沙柳液流特征及其对环境因子的响应. *干旱区研究*, 2021, 38(3): 794-801.
- [21] 桑玉强, 张劲松. 华北山区核桃液流变化特征及对不同时间尺度参考作物蒸散量的响应. *生态学报*, 2014, 34(23): 6828-6836.
- [22] 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): 5519-5527.
- [23] 刘毅, 金谦, 桂东伟, 薛杰, 孙怀卫, 严冬, 曾凡江. 新疆南部矮化红枣树干液流特征及其对环境因子的响应. *干旱区研究*, 2019, 36(5): 1146-1152.
- [24] 陈亚鹏, 周洪华, 朱成刚. 塔里木河下游胡杨水分传输过程研究综述. *干旱区地理*, 2021, 44(3): 612-619.
- [25] 内蒙古植物志编写组. 内蒙古植物志 第三卷. 内蒙古人民出版社, 1977.

- [26] 洪光宇,王晓江,张雷.毛乌素沙地不同飞播年限杨柴灌木林结构特征变化研究//联合国防治荒漠化公约第十三次缔约大会"防沙治沙与精准扶贫"边会. 2017:72-80.
- [27] 肖洒,王刚,李良.毛乌素沙地油蒿与杨柴异速生长模式及个体大小的种内竞争调节. 中国沙漠, 2003, 23(1): 67-72.
- [28] 朱雅娟,阿拉腾宝,董鸣,黄振英.增加水分与养分对克隆植物羊柴自然种群繁殖权衡的影响. 植物生态学报, 2007, 31(4): 658-664.
- [29] 段广东,苏雅拉巴雅尔,裴志永.毛乌素沙地沙柳人工林经营所面临的问题及科学的应对措施. 农家参谋, 2019(7): 124.
- [30] 陈国鹏,赵文智.毛乌素沙地南缘沙柳(*Salix psammophila*)丛生枝年龄结构与动态特征. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1520-1526.
- [31] Xu X Y, Tong L, Li F S, Kang S Z, Qu Y P. Sap flow of irrigated *Populus alba* var. *pyramidalis* and its relationship with environmental factors and leaf area index in an arid region of Northwest China. *Journal of Forest Research*, 2011, 16(2): 144-152.
- [32] 贾国栋,陈立欣,李瀚之,刘自强,余新晓.北方土石山区典型树种耗水特征及环境影响因子. 生态学报, 2018, 38(10): 3441-3452.
- [33] Qian D, Zha T S, Jia X, Wu B, Zhang Y Q, Bourque C P A, Qin S G, Peltola H. Adaptive, water-conserving strategies in *Hedysarum mongolicum* endemic to a desert shrubland ecosystem. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(7): 6039-6046.
- [34] Goldstein G, Andrade J L, Meinzer F C, Holbrook N M, Cavellier J, Jackson P, Celis A. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell and Environment*, 1998, 21(4): 397-406.
- [35] Nilsen E T, Sharifi M R, Rundel P W, Forseth I N, Ehleringer J R. Water relations of stem succulent trees in north-central Baja California. *Oecologia*, 1990, 82(3): 299-303.
- [36] Hayat M, Zha T S, Jia X, Iqbal S, Qian D, Bourque C P A, Khan A, Tian Y, Bai Y J, Liu P, Yang R Z. A multiple-temporal scale analysis of biophysical control of sap flow in *Salix psammophila* growing in a semiarid shrubland ecosystem of northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 288/289: 107985.
- [37] 吴鹏,杨文斌,崔迎春,赵文君,舒德远,侯贻菊,丁访军.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. 生态学报, 2017, 37(22): 7552-7567.
- [38] 黄雅茹,李永华,辛智鸣,董雪,张正国,马迎宾.不同时间尺度气象因子与怪柳树干液流关系研究. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 149-154.
- [39] 姚依强,陈珂,王彦辉,王艳兵,李振华,徐丽宏,韩新生.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. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 155-161.
- [40] Pei Z Y, Hao S R, Pang G H, Wang K, Liu T J. Sap flow of *Salix psammophila* and its principal influencing factors at different slope positions in the Mu Us desert. *PLoS One*, 2019, 14(12): e0225653.
- [41] 王卓,郭月峰,祁伟,姚云峰,仲宸,刘璐,王佳坤.不同灌水梯度下沙棘液流特征与环境因子的关系. 干旱区研究, 2020, 37(4): 1018-1025.