

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.039.

王一心, 冯天骄, 肖辉杰, 等. 干旱胁迫和不同株高基径条件下的白刺液流速率特征差异[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 234-240, 249.

WANG Yixin, FENG Tianjiao, XIAO Huijie, et al. Characteristics of Sap Flow Rate of *Nitraria tangutorum* Under Drought Stress and Different Plant Height and Basal Diameter[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 234-240, 249.

干旱胁迫和不同株高基径条件下的 白刺液流速率特征差异

王一心¹, 冯天骄¹, 肖辉杰¹, 李永华², 辛智鸣³, 刘莉苑¹, 王旭佳¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 118300; 2. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091; 3. 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 磴口 015200)

摘要: [目的] 揭示内蒙古荒漠环境中不同株高基径的白刺液流差异, 阐明不同形态白刺对干旱环境的适应情况, 为干旱区荒漠绿洲植被恢复的白刺种植提供参考。[方法] 在乌兰布和沙漠选择高株高组(HS)和粗基径组(BD)的典型白刺, 并模拟防止水分横向流失的隔水处理条件(CG), 采用野外定点观测的方法监测和分析白刺生长季液流速率变化情况及其与环境因子的关系。[结果] (1) 白刺液流速率在月尺度上的大小顺序为 8 月 > 7 月 > 6 月 > 9 月 > 5 月, 隔水组(WS)白刺液流速率较正常组(NW)变化幅度大, 液流速率中值分别为 1.021 g/h, 0.387 g/h; 基径大植株矮组(LS)白刺液流速率较基径小植株高组(SH)变化幅度大, 液流速率中值分别为 0.472 g/h, 0.261 g/h。 (2) 在土壤水分长期匮乏的条件下, 液流速率与气温(Ta)、风速(WVEL)呈显著正相关, 与光合有效辐射(PAR)呈显著负相关, 与空气湿度(RH)相关性不明显, 环境因子对液流速率影响程度依次为: PAR > Ta > VPD > WVEL > RH; 30—150 cm 深度土层土壤含水率对白刺液流速率均呈显著的正相关关系。 (3) 白刺液流速率与环境因子的回归方程表明, LS 组较 SH 组液流速率受气象因子的影响更大, WS 组白刺液流速率仅受 30—50 cm 土层土壤含水率的影响。[结论] 大基径矮植株白刺较小基径高植株的白刺更能适应当地干旱的气候条件, 粗矮形态的白刺更适应在缺水环境下生存。

关键词: 农业工程; 干旱胁迫; 茎干液流; 白刺; 植被形态

中图分类号: S728.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0234-07

Characteristics of Sap Flow Rate of *Nitraria tangutorum* Under Drought Stress and Different Plant Height and Basal Diameter

WANG Yixin¹, FENG Tianjiao¹, XIAO Huijie¹, LI Yonghua²,
XIN Zhiming³, LIU Liyuan¹, WANG Xujia¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: [Objective] The differences in the sap flow of *Nitraria tangutorum* in different plant height base diameters in the desert environment of Inner Mongolia were revealed, and the adaptation of different forms of *Nitraria tangutorum* to arid environment was elucidated, and the planting of *Nitraria tangutorum* in desert oasis vegetation restoration in arid area was provided. [Methods] *Nitraria tangutorum* of the tall plant height group (HS) and coarse basal diameter group (BD) were selected in Wulanbuhe desert, and water sep-

收稿日期: 2022-06-29

修回日期: 2022-07-21

资助项目: 中央高校基本科研业务费(BLX202005); 国家重点研发计划政府间国际创新合作专项中国和美国政府间合作项目(2019YFE0116500)

第一作者: 王一心(1996—), 女, 辽宁丹东人, 硕士研究生, 主要研究方向: 林业生态工程。E-mail: 18843182659@163.com

通信作者: 冯天骄(1991—), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 生态系统水文过程研究。E-mail: fengtianjiao1991@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

aration treatment (CG) was simulated, insitu observation was used to measure and analyze the change of sap flow rate and its relationship with environmental factors during growing season. [Results] (1) The sap flow rate of *Nitraria tangutorum* was in the order: August > July > June > September > May on the monthly scale, and the sap flow rate of *Nitraria tangutorum* in water separation treatment (WS) was larger than that in non water tight treatment (NW), the mean values of sap flow rate were 1.021 g/h and 0.387 g/h, respectively. The sap flow rate of *Nitraria tangutorum* (LS) with large basal diameter was larger than that with small basal diameter and high plant (SH), the mean flow rates were 0.472 g/h and 0.261 g/h, respectively. (2) Under the condition of long-term soil moisture deficiency, the sap flow rate was positively correlated with air temperature (T_a) and wind velocity (WVEL), and negatively correlated with photosynthetic effective radiation (PAR), but not significantly correlated with air humidity (Rh), the influence degree of environmental factors on sap flow rate followed the order: PAR > T_a > VPD > WVEL > Rh, and soil water content in the depth of 30—150 cm had significant positive correlation with sap flow rate of *Nitraria tangutorum*. (3) The regression equation between the sap flow rate of *Nitraria tangutorum* and environmental factors showed that the sap flow rate of LS group was more affected by meteorological factors than that of SH group, and the liquid flow rate of WS group was only affected by the soil moisture content of 30—50 cm soil layer. [Conclusion] Dwarf *Nitraria tangutorum* with large base diameter is more suitable for local arid climatic conditions than high *Nitraria tangutorum* with smaller base diameter, and *Nitraria tangutorum* in large base diameter and dwarf form is more suitable for survival in water-scarce environments.

Keywords: Hetao irrigation area; *Nitraria tangutorum*; sap flow; drought stress; vegetation morphology

内蒙古河套灌区地处我国北方干旱半干旱地区,属大陆季风气候,受气候变化和人类活动的影响,荒漠化面积不断扩大,水土流失灾害日益严重。在20世纪70年代,国家开始在该区开展一系列的改善生态环境,减少自然灾害的工程。白刺是内蒙古的重要建群种,且为典型的荒漠绿洲植被恢复物种,属于早生、超早生灌木或小灌木,具备耐干旱、耐盐、耐碱、耐风蚀沙埋、生长快、易繁殖等特点,在荒漠地区中起到非常重要的治沙固沙作用。以往研究表明,植物在长期生长过程中由于依赖和适应外界环境变化,其蒸腾耗水特点的变化具有明显的节律性。多名学者曾在阿拉善、民勤沙区、乌兰布和沙漠等地先后开展与白刺及其他干旱地区灌木相关的液流速率的研究,并取得了一定的进展^[1-3]。植被蒸腾耗水特征主要受气象因素、土壤水分因素和生物学结构因素的影响^[4]。乌日娜等发现影响沙木蓼液流速率的主要气象因子有太阳辐射、风速、空气湿度和温度^[5]。目前对太阳辐射、空气湿度、空气温度等环境因子与植物蒸腾相关性的研究多聚焦在日尺度上。

除受气象因子影响外,植物蒸腾也在一定程度上受土壤温度、湿度及土层水分分布度的影响^[6-7],而影响程度大小也与植物种类有关^[8]。当土壤含水量较小的时候,尤其是在干旱地区,气象因素对植物液流速率的影响程度会受土壤水分的影响。多名学者证

实,植被蒸腾与土壤含水率皆呈正相关关系^[9-10],但也有部分研究表明,植物的蒸腾与土壤水分没有明显的相关性^[11]。除了土壤含水率,土壤温度也对液流活动产生重要影响,但对植物蒸腾没有直接影响^[12]。而有学者在较长时间尺度上研究土壤水分对植物蒸腾水平的影响,通过对比发现,由于雨季导致土壤含水率增高,植物在雨季液流速率明显高于旱季^[13]。

植物液流速率与环境因子间的关系随时间尺度的变化而变化^[14];液流速率在较小的时间尺度上容易受气象因子的影响,而随着时间的增大,液流速率的主要影响因素逐渐从气象因子向生态学特性上转移^[15-16]。有学者通过比较不同地径的白刺蒸腾,发现白刺的蒸腾量随着地径不同,表现出显著差异,蒸腾量随地径变大而增大^[1]。有学者分别研究了干旱区梭梭、枸杞、沙棘的基径与液流速率的关系,均得出植物基径与液流速率呈正相关,而且均为强相关关系的结论^[17-20]。

目前在内蒙古磴口县的白刺蒸腾的研究多在日时间尺度上白刺的蒸腾规律、与环境因子变化之间的关系等方面,对结合白刺形态特征、环境变化的液流速率变化规律研究较少,关于时间尺度的白刺植被液流速率和环境因子的相互关系的研究有待进一步加强。为研究白刺沙包植被液流特点并进行更合理白刺种植管理,本研究在研究区开展白刺液流和环境因

子监测,比较同水分条件下植被耗水状况与环境因子的关系,以期揭示其环境适应性和耐受性,为研究区探究植被耗水提供参考依据。

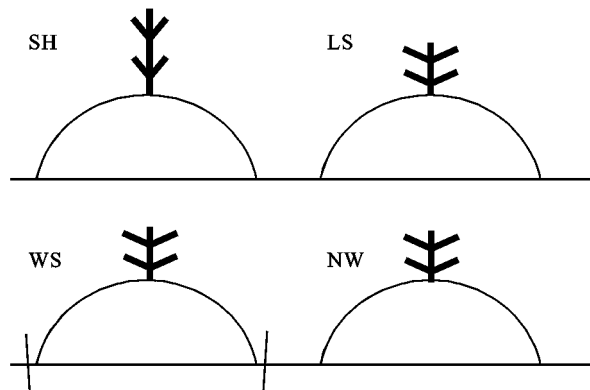
1 材料与方法

1.1 研究区域与样地概况

研究区位于内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位研究站,主要研究区位于中国林业科学研究院沙漠林业试验中心第二试验场内,地理坐标为(106°35′—106°59′E,40°17′—40°29′N),海拔1 040 m。研究区地表为沙包和沙生植物覆盖,为温带大陆性季风气候,全年日照时长超过3 300 h,年均蒸发量2 397.6 mm,而年均降雨量仅有144.5 mm,年均气温7.6℃,生长期昼夜温差14.5℃。日照充足,年日照时间约3 100~3 300 h。大风天气主要出现在4—5月,年均风速3.7 m/s。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 于2018年9月底在试验地内根据样地白刺植株生长情况条件挑选6个白刺沙包,每个沙包各选取1个代表性植株,为防止水分横向流失,根据基径和株高处于均值的2个沙包使用高1.5 m的塑料膜包围,作横向隔水处理(water separation treatment,WS);其余4个沙包与WS的形态特征比较后分为小基径高株高(small basal diameter and high plant height,SH)、大基径矮株高(large basal diameter and short plant height,LS),在不隔水处理的白刺中选择基径株高与隔水组相似的植株,取均值作为不隔水处理(non watertight treatment,NW)的对照组,观察在自然降雨条件下的植物茎流变化情况(图1)。



注: NW表示不隔水处理白刺组; WS表示隔水处理白刺组; SH表示高株高小基径白刺组; LS表示矮株高大基径白刺组,下同。

图1 样地选择及布设示意图

在生长期,每个沙包按东、南、西、北和沙包顶部选取5个50 cm×50 cm的样方,用游标卡尺在距

地表5 cm高度测量样株基径,精度0.01 mm,并测量安装茎流计的枝条基径横截面积,利用卷尺测量白刺灌丛的高度、冠幅,沙包高度、沙包大小,测量结果如表1所示。

表1 白刺形态及所在沙包形态的基本信息

样地	白刺 株高/cm	白刺 基径/cm	沙包 大小/cm	沙包 高度/cm	分组
1	36	1.96	862 * 1170	136	WS
2	37	1.97	712 * 956	99	WS
3	84	2.11	847 * 1053	118	SH
4	30	3.86	482 * 796	112	LS
5	32	4.81	394 * 474	112	LS
6	80	2.71	549 * 741	96	SH

1.2.2 测定方法

(1) 茎干液流测定。使用Flow32A-1 K包裹式茎流计(Dynagage, Dynamax Inc., Houston, 美国)连续测量白刺茎干液流数据,监测时间为2019年5—10月,Dynagage液流测量系统的详细安装步骤参考文献^[21]。表1中每棵白刺植株安装1个茎流计探头,每个类型各设置6个重复,共计18个探头。仪器安装完成后,每10 min自动记录1次茎流速率平均值。通过数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, 美国)采集并储存数据。

(2) 环境因子测定。在测定白刺液流的时期内,统计同时期站内小型自动气象站(U30-NRC-SYS-PRO, HOBO, 美国)监测距地面2 m内光合有效辐射(PAR)、空气温度(T_a ,℃)、空气相对湿度(RH,%)、风速(WVEL, m/s)等环境数据,数据采集间隔10 min。将TRIME-FM管式TDR(时域反射仪, IMKO, 德国)埋入试验样地内,持续监测0—10 cm(SWC_{0-10} , %), 10—30 cm(SWC_{10-30} , %), 30—50 cm(SWC_{30-50} , %), 50—80 cm(SWC_{50-80} , %), 80—120 cm(SWC_{80-120} , %), 120—150 cm($SWC_{120-150}$, %)土壤含水率,通过数据采集器(CR1 000, Campbell Scientific, 美国)每10 min采集1次数据。

1.2.3 数据采集与处理 自2020年5月起,定期对仪器进行维护,并下载植物液流速率、土壤含水率及气象等数据到计算机中,进行进一步的数据处理和分析。

用Campbell公式计算饱和和水汽压差(VPD)^[22]:

$$VPD = a e^{\left(\frac{b \times T_a}{T_a + c}\right)} (1 - RH)$$

式中: T_a , RH分别为空气温度与相对湿度; a , b , c 为常数,分别为0.611 kPa, 17.502, 240.97℃。

使用LoggerNet 4.5对采集到的液流数据进行处理和分析,使用Excel对所有数据进行整理,运用SPSS 22.0对液流速率与环境变量进行相关性分析,并利用逐

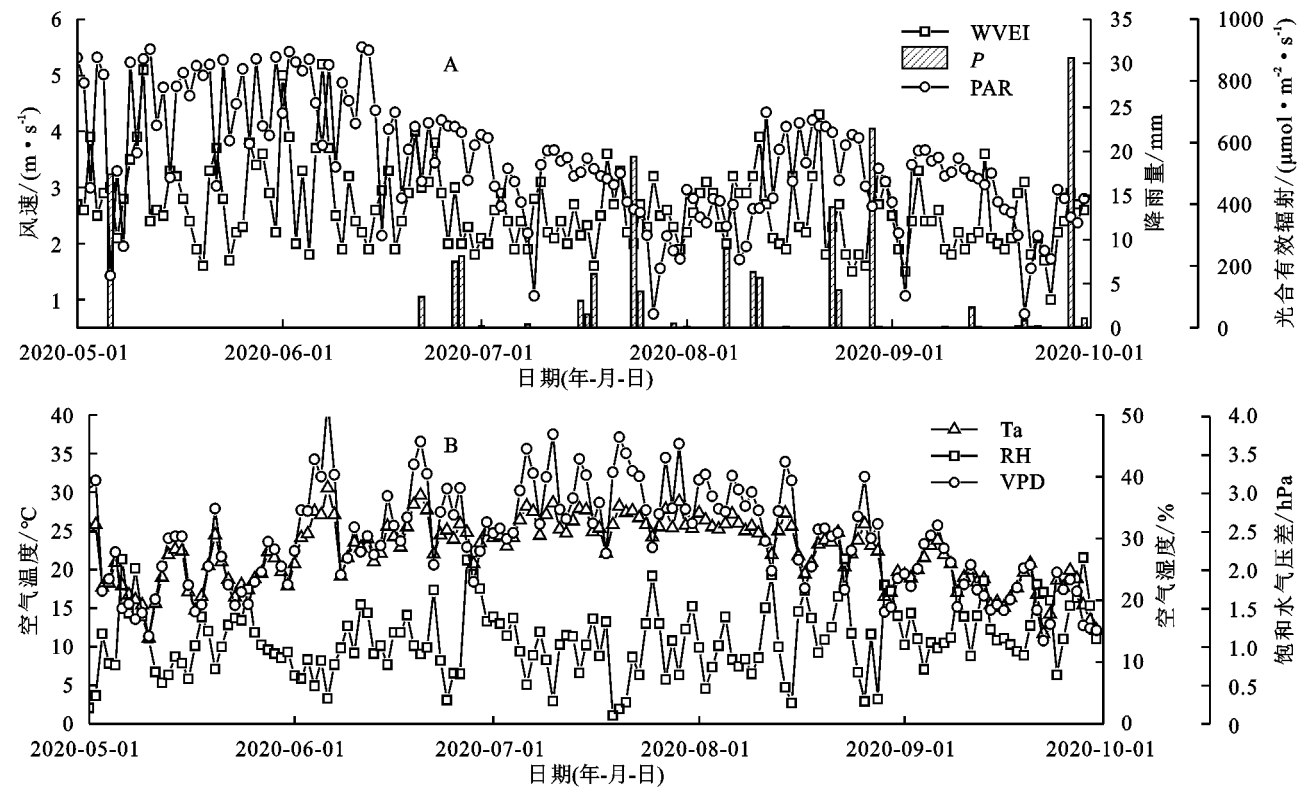
步回归分析方法建立 4 种分组白刺的液流速率与主要环境因子间的回归方程。使用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 生长季内环境因素的变化特征

研究区在观测期间的风速 (wind velocity, WVEL/m/s)、光合有效辐射 (photosynthetic effective radiation, PAR/%)、空气温度 (air temperature, Ta/%)、空气湿度 (air relative humidity, RH/%)、饱和水汽压差 (water vapor pressure , VPD/%) 日均值及降雨量 (precipitation, P/mm) 日变化如图 2 所示。其中,风速在 5—6 月较大,7—9 月较小,2020 年 WVEL 范围为 1~5.2 m/s。由图 2A 可以

看出,5—9 月总降雨量为 169.325 mm,降雨事件发生频率由大到小依次为 8 月>7 月>9 月>6 月>5 月,日最大降雨发生在 9 月 28 日,降雨量为 30.6 mm。从整体来看,PAR 在雨季较小,在旱季较大;由于 2020 年雨季降雨次数较少且降雨量小,PAR 受降雨的影响而产生的变化规律并不明显,变化范围为 44.512~908.88 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。图 2B 表明,Ta 变化范围为 11.1~30.6℃,高温天气主要集中在 7—8 月,2020 年 5—9 月 Ta 日均值最大值在 7 月 29 日,为 30.6℃。RH 变化范围为 1.32%~26.92%,在月尺度范围内没有明显的变化规律,在降雨事件发生时会有小幅度的提升。VPD 变化幅度为 0.125~0.773 hPa,在 7 月、8 月较高,在 5 月、6 月、9 月较低。



注:PAR:光合有效辐射;Ta:空气温度;RH:空气湿度;VPD:饱和水汽压差,下同。

图 2 2020 年研究区生长季气象因子变化

使用等值线图描述了 2020 年白刺生长季土壤含水率在 5—9 月间的变化规律(图 3)。从整体来看,80—150 cm 深度的土壤含水率较高,0—80 cm 土层土壤含水率常年处于低含水率的状态。2020 年雨季 0—80 cm 土壤含水率增加,80—150 cm 土壤含水率有较小的回升,0—80 cm 土壤含水率浮动范围为 0.047%~10.562%,由此可见,80 cm 以下深度土壤含水率较高且较为稳定,浅层土壤长期呈干旱状况且易受降雨影响。

2.2 白刺液流速率日均值变化特征

2.2.1 不同水分处理白刺液流速率比较 5—9 月

NW 和 WS 组白刺液流速率对比的结果如图 4 所示。由折线图可得,所有水分处理的白刺液流速率在 5—6 月均较低,在 7—8 月液流速率总体最高,在 9 月各组液流速率均有所下降,WS 组和 NW 组白刺液流速率最大值分别出现在 8 月 1 日和 8 月 15 日。从提琴图和折线图中均可以看出,WS 组液流速率变化幅度较大,范围为 0.263~2.250 g/h,中值为 1.021 g/h,NW 组相对来说液流速率变化较为平缓,变化范围为 0.051~0.831 g/h,中值为 0.387 g/h,低于 WS 组。

2.2.2 不同株高基径特征的白刺液流速率比较

5—9 月 SH 和 LS 组白刺液流速率的对比结果如图 5 所

示。由折线图可得,所有水分处理的白刺液流速率变化规律同图4,在5—6月均较低,在7—8月有所提升,液流速率日均值在9月有所下降,LS组和SH组白刺液流速率最大值分别出现在8月30日和8月15日。从提琴图可以看出,LS组液流速率变化范围为0.096~1.199 g/h,中值为0.472 g/h,液流速率整体高于SH组,且在每次降雨事件发生后波动较明显。SH组相对来说液流速率变化较为平缓,变化范围为0.006~0.792 g/h,中值为0.261 g/h,低于LS组液流速率。

2.3 白刺茎干液流对环境因素的响应特征

将不同分组白刺液流速率均值和气象因子、0—150 cm 土层土壤含水率进行 Pearson 相关性分析(表2),从整体来看,白刺液流速率较30 cm 以下深度土壤含水率的影响较大,风速、空气湿度、饱和水汽压差和光合有效辐射在不同程度上抑制了白刺的液流速率,空气温度、10—150 cm 土层土壤含水率对所有白刺的蒸腾都有较强的显著正相关关系;风速、饱

和水气压差与白刺液流速率间呈显著的负相关关系,空气湿度对白刺液流速率相关性不明显。

通过逐步回归分析,建立了液流速率与主要环境因子的回归方程。WVEL, PAR, VPD, T_a 及各土层土壤含水率均参与构建模型,所得结果如表3所示。

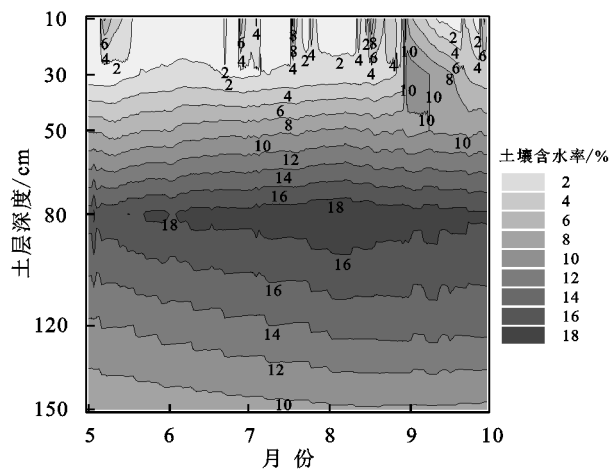


图3 土壤含水率等值线

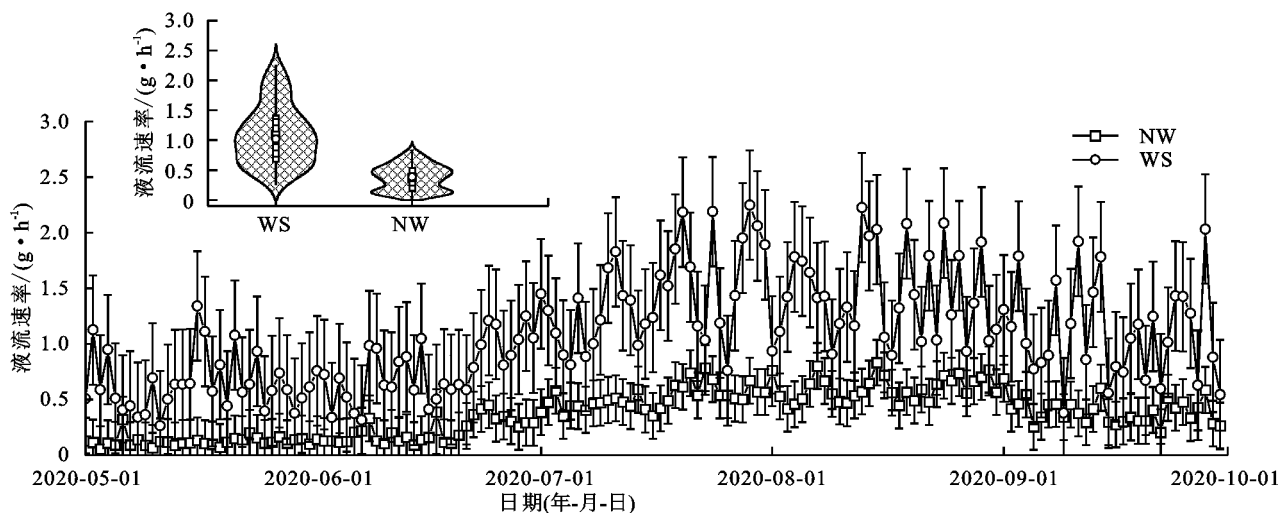


图4 不同控制处理白刺液流速率比较

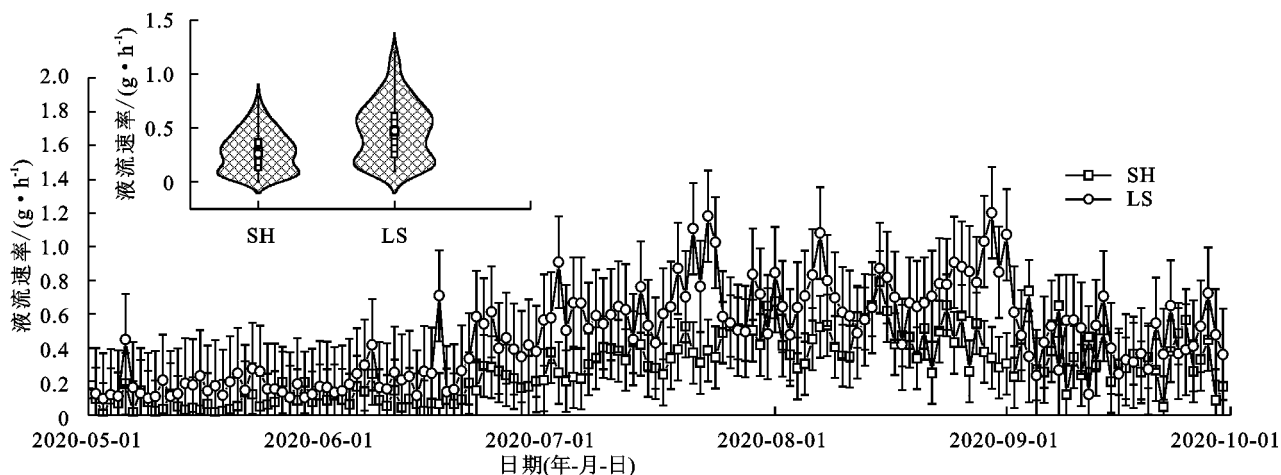


图5 不同形态白刺液流速率比较

回归方程的相关系数和回归系数 t 检验表明, $p < 0.001$, 回归方程能更好地反映4种分类白刺液流速率

与环境因子的关系。

从表3可以看出,所有组的白刺液流速率受土壤

含水率影响较大,而受气象因子影响较小。RH, Ta, SWC₁₂₀₋₁₅₀, SWC₁₀₋₃₀可以解释 NW 组液流速率 69.8% 的变化,对液流速率影响最大的是 SWC₁₂₀₋₁₅₀; RH, SWC₁₀₋₃₀可以解释 WS 组 62.3% 的变化; SWC₁₂₀₋₁₅₀, SWC₁₀₋₃₀, RH 可以解释 80.3% 的 SH 组液流速率,对液流速率影响最大的是 SWC₁₂₀₋₁₅₀; 对于 LS 组而言, SWC₃₀₋₅₀对液流速率影响最大,可以解释 72.0% 的液流速率变化。

表 2 白刺液流速率与环境因子的 Pearson 相关性分析

参数		WVEL	Ta	RH	VPD	PAR	SWC ₁₀₋₃₀	SWC ₃₀₋₅₀	SWC ₅₀₋₈₀	SWC ₈₀₋₁₂₀	SWC ₁₂₀₋₁₅₀
NW	相关性	-0.219 **	0.303 **	-0.024	0.274 **	-0.513 **	0.266 **	0.802 **	0.707 **	0.774 **	0.797 **
	显著性	0.006	0.000	0.770	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
WS	相关性	-0.251 **	0.279 **	-0.106	0.263 **	-0.374 **	0.138	0.602 **	0.567 **	0.562 * *	0.598 **
	显著性	0.002	0.000	0.193	0.001	0.000	0.089	0.000	0.000	0.000	0.000
SH	相关性	-0.217 **	0.266 **	-0.064	0.241 **	-0.486 **	0.295 **	0.743 **	0.638 **	0.743 **	0.770 **
	显著性	0.007	0.001	0.432	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
LS	相关性	-0.188 *	0.281 **	0.007	0.254 **	-0.453 **	0.206 *	0.720 **	0.646 **	0.677 **	0.694 **
	显著性	0.020	0.000	0.932	0.002	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000

注: * 代表显著相关($p<0.05$); ** 代表极显著相关($p<0.01$)。

表 3 各分组白刺液流速率与环境因子的回归方程

分组	回归方程	相关系数
NW	$SFV_{NW} = -3.964 + 0.477 SWC_{120-150} - 0.02 SWC_{10-30} - 0.004 RH$	0.698
WS	$SFV_{WS} = -1.835 + 0.339 SWC_{30-50} - 0.014 RH$	0.623
SH	$SFV_{SH} = -3.319 + 0.397 SWC_{120-150} - 0.013 SWC_{10-30} - 0.005 RH$	0.803
LS	$SFV_{LS} = -1.52 + 0.217 SWC_{30-50}$	0.720

3 讨论

3.1 白刺液流速率日均值变化

本研究发现,白刺液流速率呈现出明显的季节性规律,白刺月尺度上的液流速率大小顺序为 8 月>7 月>6 月>9 月>5 月,这与赵晨光在阿拉善对白刺的研究结果相同^[1],但总体来说,液流速率变化都受季节降水的影响,在生长初期的旱季,液流速率较小,在雨季白刺生长旺盛,液流速率也随之增大,且在降雨事件后液流速率往往有大幅度的波动。有研究证实,植物会通过增加蒸腾作用以适应干旱的环境条件^[23],而降雨后的水蒸气阻隔可以致使大气温度、光合有效辐射短时间内降低。有学者通过对比沙柳在旱季和雨季的液流变化情况,发现春季和夏季的干旱对液流都有抑制作用,而夏季后期降雨增多,茎干液流量也保持在较高的状态^[24]。这可能是由于当环境水分较低时,白刺通过关闭气孔等方式降低液流速率,减少自身需水量,提高水分利用率,从而适应环境的干旱胁迫^[25]。其中,在自然环境中的 LS 组液流速率较同生境 SH 组的更高,且变化幅度更大,说明 LS 组表现出更好的环境适应性。

3.2 环境因子对白刺液流速率的影响

在本研究中,影响茎干液流速率的主要环境因子有风速、太阳辐射、空气温度、空气湿度、和土壤含水率等,其中 30—150 cm 土层含水率对所有白刺的液流速率都有较显著的正相关关系。郝少荣研究了民勤绿洲

荒漠过渡带上沙柳的蒸腾,发现在月尺度下土壤温度和土壤湿度是影响蒸腾的主要因子^[26],与本文结论相同。除了土壤含水率,空气湿度也对白刺液流速率有所影响。以往学者在研究干旱地区灌木对干旱胁迫的适应性时,多分析气象因素和蒸腾耗水的关系,而在降水稀少的地区,灌木的水分来源主要在土壤。有学者研究发现,当土壤水分含量较低时,油蒿可以通过节约用水适应干旱环境,且土壤水分控制油蒿液流对生物物理因子日变化的响应^[26]。本研究的结果表明,土壤含水率与白刺液流速率有很强的相关性,而气象因子对液流速率的影响不大,说明土壤含水率是影响研究区白刺液流速率的主要因素。在长期干旱胁迫条件下,有些旱生植物会通过减少水分流失、保持水分吸收的方式应对干旱胁迫,这种抗旱机理为“高水势延迟脱水”^[27]。值得注意的是,PAR 与液流速率成反比,这是因为当水分条件较低时,白刺会通过尽可能地降低蒸腾来提高自身水分利用率,因而使液流速率降低^[28]。本研究中,WS 组液流速率与环境因子间的相关性低于 NW 组,相较于正常组白刺液流速率与环境因子的相关性更低,且回归方程也表现出同种规律,但液流速率中值和变化幅度明显高于正常组白刺,这可能是由于 WS 组处理能更有效的拦蓄降雨,使降雨后 NW 组内土壤水分短暂升高,使其液流速率有短时间内的大幅度变化,而水分条件一直相对较低的 NW 组白刺通过关闭更多气孔的方式降低了植物蒸腾^[29],并提高贮水、输水能力,保证最基本的代谢^[27]。本研究表明,虽

然白刺抗干旱胁迫能力较强,但长期干旱仍有影响白刺正常生长发育的可能。

3.3 株高基径差异对白刺液流速率的影响

已有研究证实,植被蒸腾耗水规律受自身形态学特征和环境条件的影响^[1,29],李浩在对比了干旱区不同生境的梭梭液流后,发现即使是同种植物,在不同环境水分环境中的耗水量、耗水日过程等方面也会有明显差异^[17]。有学者对比了白刺、沙棘基径和蒸腾之间的关系,发现基径越大,蒸腾量越大,且日变化越剧烈^[1,17],在梭梭和怪柳上也发现了类似的结论^[2]。本研究对比自然环境下两组白刺液流速率日均值,发现LS较SH组整体液流速率变化幅度更剧烈,且这种变化往往出现在降雨事件后。而SH组白刺则一直维持较低的日液流速率值,且液流速率变化较LS组平稳。结果表明植株较矮基径较大的白刺植株对水分条件要求较低,可以适应更干旱的气候条件,而基径较小植株较高的白刺则更容易受水分条件的影响,且在干旱胁迫条件下更不容易恢复。

4 结论

(1) 白刺植株月尺度上的液流速率大小顺序为8月>7月>6月>9月>5月,在缺水条件下的白刺液流速率较正常水分条件白刺变化幅度更大。基径大植株矮的白刺比基径小植株高的白刺植株液流速率变化幅度大,且整体液流速率较高。

(2) 白刺液流速率与空气温度、10—150 cm 土层土壤含水率呈显著的正相关,且受30 cm以下深度土壤含水率的影响较大,风速和光合有效辐射与白刺的液流速率呈负相关关系,空气湿度对白刺液流速率相关性不明显。相关分析显示,气象因子对白刺液流速率影响程度由大到小分别为:光合有效辐射>空气温度>饱和水汽压差>风速>空气湿度,且干旱程度越严重,白刺液流对环境因子的响应越不明显。且从白刺液流对环境因子的回归分析可以看出,所有白刺液流速率受土壤含水率影响较大,受气象因子影响较小。

(3) 结果表明,大基径矮植株白刺较小基径高植株的白刺更能适应当地干旱的气候条件。此外,虽然白刺抗干旱胁迫能力较强,但长期的过度干旱仍有影响白刺正常生长发育的可能。

参考文献:

- [1] 赵晨光, 庞德胜. 阿拉善白刺生长季需水量估算[J]. 防护林科技, 2018(4): 24-27.
- [2] 袁得润, 徐先英. 民勤沙区6种防护树种液流特征及其生态需水量估算[J]. 甘肃科技, 2010, 26(17): 172-175, 150.
- [3] 李清河, 刘建锋, 张景波, 等. 乌兰布和沙漠东北部8种

沙生灌木生长季末期的光合生理特性[J]. 西北植物学报, 2006, 26(11): 2318-2323.

- [4] 孙慧珍, 李夷平, 王翠, 等. 不同木材结构树干液流对比研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1434-1439.
- [5] 乌日娜, 丁国栋, 吴斌, 等. 沙木蓼蒸腾耗水特性及环境影响因子研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 68-72.
- [6] 姚小英, 蒲金涌, 王澄海, 等. 甘肃黄土高原40 a来土壤水分蒸散量变化特征[J]. 冰川冻土, 2007(1): 126-130.
- [7] 于界芬. 树木蒸腾耗水特点及解剖结构的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.
- [8] 吕金林. 黄土丘陵区两典型森林群落及主要建群种蒸腾耗水特征研究[D]. 陕西杨凌: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2021.
- [9] 温杰, 陈云明, 唐亚坤, 等. 黄土丘陵区油松、沙棘生长旺盛期树干液流密度特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 763-771.
- [10] 徐军亮, 马履一. 土壤温度对油松(*Pinus tabulaeformis*)树干液流活动的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6107-6112.
- [11] 杨洁, 吕金林, 何秋月, 等. 黄土丘陵区辽东栎和刺槐树干液流时滞效应与蒸腾特征的关联性[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2607-2613.
- [12] 孙慧珍. 东北东部山区主要树种树干液流动态及与环境因子关系[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2002.
- [13] 王慧梅, 孙伟, 祖元刚, 等. 不同环境因子对兴安落叶松树干液流的时滞效应复杂性及其综合影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3109-3116.
- [14] 孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6901-6909.
- [15] 徐利岗, 杜历, 汤英, 等. 干旱区枸杞蒸腾耗水变化特征及其影响因子响应分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1282-1290.
- [16] 罗凤敏, 辛智鸣, 高君亮, 等. 沙棘液流动态变化及影响因素分析[J]. 草业科学, 2015, 32(11): 1871-1877.
- [17] 夏永辉, 梁凤超, 师庆东, 等. 准噶尔西部人工碳汇林原生荒漠植被梭梭蒸腾耗水研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11755-11759.
- [18] 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.
- [19] 单立山, 李毅, 张希明, 等. 灌溉对3种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5692-5702.
- [20] 杨强. 降雨对毛乌素沙地油蒿和沙柳蒸腾特性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [21] 郝少荣, 裴志永, 段广东, 等. 不同时间尺度下环境因子与沙柳茎流关系的差异研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3): 152-158.
- [22] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(3): 92-100.

(下转第249页)

- [27] 梁彩群, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土高原人工刺槐林土壤团聚体中不同活性有机碳从南到北的变化特征[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 1095-1102.
- [28] Soinne H, Hyvaluoma J, Ketoja E, et al. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 158: 1-9.
- [29] 华娟, 赵世伟, 张扬, 等. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4613-4619.
- [30] Haynes R J, Beare M H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(11/12): 1647-1653.
- [31] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [32] Segoli M, De Gryze S, Dou F, et al. AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies [J]. *Ecological Modelling*, 2013, 263: 1-9.
- [33] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 406-413.
- [34] 张富荣. 植被恢复对土壤有机碳固存及其周转速度的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [35] Malik A A, Puissant J, Buckeridge K M, et al. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3591.
- [36] Zeng Q C, Liu D, An S S. Decoupled diversity patterns in microbial geographic distributions on the arid area (the Loess Plateau) [J]. *Catena*, 2021, 196: 104922.
- [37] Xu M P, Li W J, Wang J Y, et al. Soil ecoenzymatic stoichiometry reveals microbial phosphorus limitation after vegetation restoration on the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815: 152918.
- [38] Cui Y X, Moorhead D L, Wang X X, et al. Decreasing microbial phosphorus limitation increases soil carbon release [J]. *Geoderma*, 2022, 419: 115868.

(上接第 233 页)

- [28] Bi S B, Qiu X K, Wang G J, et al. Spatial distribution characteristics of drought disasters in Hunan Province of China from 1644 to 1911 based on EOF and REOF methods [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(16): 533.
- [29] Xu X R, Tian H Y, Tian W S, et al. The spatiotemporal patterns of the upper-tropospheric water vapor over the Tibetan plateau in summer based on EOF analysis [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(15): 5033-5051.
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [31] 刘慧媛, 邹磊, 邢万里. 1961—2018 年海河流域极端降水时空演变特征 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(12): 1-6.
- [32] 任建成, 王峰, 卢晓宁. 基于 EOF 和小波分析的山东省年降水时空变化特征 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 179-183.
- [33] 南庆红, 杨舵, 杨青. 应用 EOF 方法分析新疆降水变化特征 [J]. *中国沙漠*, 2003(5): 78-83.

(上接第 240 页)

- [23] Du S, Wang Y L, Kume T, et al. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 1-10.
- [24] 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): 951-960.
- [25] Meinzer F C, James S A, Goldstein G. Dynamics of transpiration, sap flow and use of stored water in tropical forest canopy trees [J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(8): 901-909.
- [26] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics (Second Edition) [M]. New York: Springer, 1998.
- [27] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [28] 种培芳. 荒漠植物红砂、白刺和沙拐枣抗旱指标及抗旱性综合评价研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [29] Kozlowski T T. Water deficit and plant growth. Vol. 1. Development, control and measurement [M]. New York, London: Academic Press, 1968.