

宁夏引黄灌区次生盐碱地紫穗槐茎干液流分析

曹琪琪 王若水 肖辉杰* 杨本漫 刘 涛

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要 于2017年5—10月采用包裹式液流测量系统,研究宁夏引黄灌区次生盐碱地不同水盐条件下不同基径紫穗槐的液流变化、耗水规律,以及环境因子对液流的影响。结果表明:晴天紫穗槐液流呈“几”字型宽峰曲线,无明显“午休”现象,多云、阴、雨天气呈不规则多峰曲线,夜间存在微弱液流;生长季(5—10月)中,基径约为13、16、22 mm紫穗槐的总液流量分别为138.14、206.06、370.11 kg,6、7月耗水较多,约占全生长季的50%,5、8月次之,9、10月较少;0.5 h和日尺度下,光合有效辐射(PAR)为影响紫穗槐液流的关键因子。第一阶段(5月13日—8月19日),浅层(0~40 cm)土壤水分对不同基径紫穗槐的液流均有显著影响,浅层土壤盐分仅对13 mm紫穗槐液流存在显著抑制作用;第二阶段(8月20日—10月10日),土壤水分、盐分对不同基径紫穗槐液流均无显著影响。综上,基径<13 mm的紫穗槐不适宜在浅层土壤电导率(EC)>2 dS·m⁻¹的盐渍土中栽植,而基径>16 mm的植株可在浅层土壤EC为5 dS·m⁻¹的盐渍土中正常生长,且均需在生长旺盛期进行合理灌溉。

关键词 紫穗槐; 茎干液流; 环境因子; 土壤盐渍化

Sap flow of *Amorpha fruticosa* in the secondary saline-alkali land in Ningxia Yellow River irrigation area, China. CAO Qi-qi, WANG Ruo-shui, XIAO Hui-jie*, YANG Ben-man, LIU Tao (School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China).

Abstract: From May to October in 2017, the sap flow, water consumption and the effects of environmental factors on the sap flow of *Amorpha fruticosa* with different stem diameters under different water and salt conditions were examined with the packaged sap flow measuring system in a secondary saline-alkali land of Ningxia Yellow River irrigation area. The sap flow rate showed a broad peak curve with no obvious phenomenon of ‘midday break’ in sunny days and a multi-peak curve in cloudy, overcast and rainy days. Weak sap flow was found at night. In the growing season (May – October), total sap flow of *A. fruticosa* with basal stem diameters of 13, 16 and 22 mm were 138.14, 206.06, 370.11 kg, respectively. The water consumption was largest in June and July, accounting for about 50% of the whole growing season, followed by May and August, and lowest in September and October. At both 0.5 h and day scales, photosynthetically active radiation (PAR) was the dominant meteorological factor affecting the sap flow. In the first growth stage (May 13th – August 19th), soil water in shallow layer (0–40 cm) had significant effect on the sap flow of *A. fruticosa* with three different diameters, and soil salt in shallow layer had significant inhibitory effect only on *A. fruticosa* with the diameter of 13 mm. In the second growth stage (August 20th – October 10th), soil water and soil salt had no significant effect on *A. fruticosa* with three different diameters. In summary, the *A. fruticosa* with diameters <13 mm was not suitable for planting in saline soil (electrical conductivity (EC) >2 dS·m⁻¹), and individuals with diameters >16 mm could grow well in saline soil (EC=5 dS·m⁻¹). Moreover, reasonable irrigation should be carried out in the vigorous growth stage of the *A. fruticosa*.

Key words: *Amorpha fruticosa*; sap flow; environmental factor; soil salinization.

本文由北京林业大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017PT12)、国家林业公益性行业科研专项(201504402)和基于荒漠化防治和盐碱地改良的海藻肥施用技术项目(2016HXFWSBXY002)资助。This work was supported by the Beijing Forestry University Central University Basic Research Business Expenses Special Funds Project (2017PT12), the Industry of National Public Welfare (Forestry) Scientific Research (201504402), and the Application Techniques of Algal Fertilizer Based on Desertification Control and Saline-alkali Land Improvement Project (2016HXFWSBXY002). 2017-12-28 Received, 2018-04-03 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: herr_xiao@hotmail.com

我国宁夏平原引黄灌区位于黄河上游下段^[1], 该地区灌溉常年采用大引大排的形式^[2], 导致地下水位抬升^[3], 土壤次生盐渍化现象严重。目前, 该区次生盐渍化面积达 $2.4 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占现有耕地面积的 48.9%^[4]。大面积的次生盐碱地不仅对农业生产造成巨大经济损失, 还对当地生态环境构成威胁。改良次生盐碱地一直是该地区土地治理的重点, 并曾先后实施了多种改良措施^[5]。与其他措施相比, 种植耐旱耐盐碱的适生性植物能有效改善土壤理化性质^[6], 成本较低, 不会造成二次污染, 对当地生态环境的良性发展有重要作用。紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*) 是宁夏引黄灌区次生盐碱地主要造林灌木树种之一^[7-8], 具有萌蘖能力强、耐旱、耐盐碱、根系发达等特点, 但由于该区具有降水稀少 (多年平均降雨量 292 mm)^[9]、蒸发量大 (年水面蒸发力 1296 mm)^[9]、土壤次生盐渍化程度高的特点, 使得种植初期的幼龄紫穗槐受水分、盐分胁迫的影响严重, 造林成活率低^[10]。而目前对在盐碱荒地上种植的幼龄紫穗槐初期耐盐耐旱特征尚缺乏深度的认识, 对其耐盐耐旱机理尚待进一步研究。因此, 需利用适当的方法筛选耐盐耐旱性较好的幼龄紫穗槐在该区进行栽植。

植物的茎干液流是植物由叶片蒸腾作用引起的将体内水分由根部经木质部运输到叶片的上升流^[11], 其 90% 以上均通过植物叶片的蒸腾作用散失到大气中^[12], 是土壤-植物-大气连续系统的关键水分参数, 可以准确反映植物的生长状况和水盐胁迫耐受能力^[13-14]。大量研究表明, 植物液流特征除与自身生理特性有关外, 还受土壤和气象因子^[15]的影响, 且处于动态变化中。罗凤敏等^[16]发现, 对沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 液流变化起决定作用的环境因子为太阳总辐射 (R_s)、空气相对湿度 (RH)、气温 (T_a)、风速 (S_w) 和 10 cm 处土温 (T_{s-10}); 郭映等^[17]发现, 影响玉米液流变化的主要气象因子依次是光合有效辐射 (PAR)、 T_a 、RH 和 S_w ; Qiang 等^[18]发现, 对山杨 (*Populus davidiana*) 液流变化起决定作用的

因子为 PAR 和叶面积指数 (LAI)。然而, 以往研究多侧重于短时间尺度上 (0.5 h) 植物液流与气象因子的相关关系, 在次生盐碱地中土壤水盐环境变化较大, 植物液流所受影响因素较为复杂, 其液流变化特征及与土壤水盐之间的响应关系尚不明确。

为此, 本文对次生盐碱地中不同基径幼龄紫穗槐的液流变化规律进行研究, 分析其不同天气及不同阶段下与土壤、气象因子间的响应关系, 以期在水盐胁迫环境下幼龄紫穗槐的适生机制研究提供理论基础, 并为筛选适于次生盐碱地种植的幼龄紫穗槐提供技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏青铜峡市树新林场西北盐碱地生态恢复关键技术与示范基地 ($38^\circ 1' 44'' \text{ N}$, $105^\circ 56' 36'' \text{ E}$), 属于宁夏引黄灌区。该区地势平坦, 海拔 1140 m, 全年日照 2955 h, 年平均气温 $8.3 \sim 8.6^\circ \text{C}$, 无霜期 176 d, 年降雨量 260.7 mm, 地下水埋深 0.8~1.0 m, 地表处有明显的盐分聚集现象, 存在盐霜或结皮。紫穗槐为 2016 年 4 月栽植的 2 年生幼龄植株, 地径 1.00 cm, 截干 1.0 m 左右。在该区于春灌之前调查 0~80 cm 土层土壤本底值 (表 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 茎干液流的测定 于 2017 年选取紫穗槐试验地面积 $12 \text{ m} \times 24 \text{ m}$, 株行距 $1.3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 对植株进行每木检尺, 按基径划分将植株生长状况划分为 3 个层次 (表 2), 依据各层次紫穗槐的平均基径、株高、冠幅, 确定代表每个层次的 1 株生长健康的植株为研究对象。采用热平衡包裹式茎干液流测量系统 (美国 Dynamax) 连续监测 5—10 月 3 株紫穗槐的液流速率。为保证试验样株的健康生长, 每 1~2 周对其包裹位置进行晾晒。设置传感器扫描时间为 20 s, 数据采集间隔 30 min。所用传感器探头型号、工作参数和被测样株基本特征见表 3。

表 1 土壤基础理化性质

Table 1 Basic physical and chemical property of soil

土层 Soil layer (cm)	电导率 EC ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	pH	土壤容重 Soil bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水量 Field capacity (%)	各级颗粒含量 Soil particulate content (%)			土壤质地 Soil texture
					砂粒 Sand (0.02~2 mm)	粉粒 Silt (0.002~0.02 mm)	黏粒 Clay ($<0.002 \text{ mm}$)	
0~10	5.87	8.24	1.45	29.0	29.0	70.0	1.0	砂质壤土 Sand loam
10~20	4.91	8.45	1.59	25.7	15.6	81.2	2.2	砂质壤土 Sand loam
20~40	4.03	8.22	1.58	25.9	4.9	92.5	2.7	砂质壤土 Sand loam
40~60	2.71	8.15	1.55	27.8	18.0	79.8	2.2	砂质壤土 Sand loam
60~80	2.54	8.08	1.39	34.4	49.1	16.2	33.7	砂质壤土 Sand loam

表 2 3 个不同层次紫穗槐基本特征
Table 2 *Amorpha fruticosa* basic characteristics at three levels

层次 Level	基径 Stem (mm)	株高 Height (m)	平均冠幅 Average crown width (cm)	所占比例 Percentage
1	9.24~13.50	0.87~1.35	37.4~49.4	25.0
2	13.90~17.23	1.21~1.52	70.7~103.5	33.3
3	18.58~26.74	1.47~1.92	90.4~114.6	41.7

表 3 SGB 探头规格和工作参数及被测样株基本特征
Table 3 Specifications and working parameters of SGB and the basic properties of the measured samples

探头型号 SGB type	电压 Voltage (V)	样株 Sample	测量部位 直径 Diameter of measured part (mm)	测量部位 茎干面积 Stem area of measured part (cm ²)	株高 Height (m)	基径 Stem (mm)
SGB-10	4.0	AF-10	11.82	1.097	1.28	12.86
SGB-13	4.0	AF-13	14.26	1.597	1.43	15.82
SGB-16	4.0	AF-16	17.88	2.511	1.71	21.54

1.2.2 环境因子的测定 使用 HOBO 小型自动气象站(美国),实时监测试验地 PAR、RH、降雨量、 S_w 、 T_a 等气象要素,数据采集间隔时间为 1 min.

土壤取样深度为 80 cm,分为 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm 5 层,分别在每株紫穗槐根部东、西、南、北 4 个方向距树干 30 cm 处采集土样,每株相同深度的土样采集后混合,分别测定其土壤含水量(SWC)和土壤电导率(EC),由于 3 株紫穗槐根区 SWC 和土壤 EC 差异不大,故所用 SWC 和土壤 EC 为 3 株根区的平均值.取土选择晴天进行,开始时间为 2017 年 5 月 13 日,结束时间为 10 月 10 日,间隔时间为 5 d,灌水和降雨前后分别取土监测.土样自然风干过 1 mm 筛后带回室内进行分析.

SWC 采用烘干法测定,土壤 EC 使用电导率仪(上海雷磁 DDS-307A 型)对其饱和泥浆提取液^[14]进行测定.有研究表明,幼龄紫穗槐负责吸水的根系主要分布于 0~40 cm 土层,起固持作用的主根则分布于 40~80 cm 土层^[24],故将 SWC 和土壤 EC 分为 0~40、40~80 cm 2 层进行分析.

1.2.3 典型天气的选择 结合观测和气象条件的划分^[21-22],定义瞬时 PAR 值达到 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 为晴天, $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 为多云天,低于 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 为阴天,存在持续或短暂降雨发生为雨天.

1.2.4 研究阶段的划分 结合观测和紫穗槐物候期^[23],划分从展叶盛期到开花末期为第一阶段(5

月 13 日—8 月 19 日),开花末期到落叶始期为第二阶段(8 月 20 日—10 月 10 日).

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 对数据进行统计分析和作图,采用 Ri386 进行相关性分析和多元线性逐步回归分析.采用平均日变化法(mean diurnal variation, MDV)^[24]对因晾晒植株等导致的液流缺损值进行插补.植株日液流累积量由每 0.5 h 测得的液流累积量累加值除以 2 求得^[17].

2 结果与分析

2.1 土壤水盐动态变化特征

由图 1 可知,土壤 SWC 受灌水和降雨综合作用的影响,在一个灌水周期内呈现先升后降的趋势;0~40 cm 土层 SWC 总体低于 40~80 cm 土层且波动幅度大于 40~80 cm 土层;第一阶段,同一灌水周期内,土壤 EC 主要在灌水和降雨的淋洗作用下,在 0~40 cm 土层呈现先降后升的趋势,在灌水后 5 d 左右降至最低值,而后逐渐上升;而在 40~80 cm 土层土壤 EC 的波动幅度较小,在灌水和地下水的共同

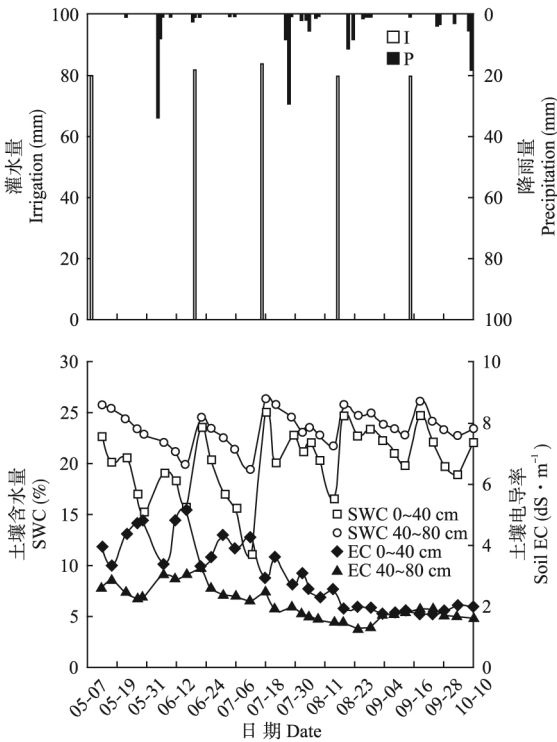


图 1 5—10 月试验地灌水和降雨分布及土壤水盐平均值变化

Fig.1 Irrigation and rainfall distribution and changes of the average values of soil water and salt in the study area from May to October.

I: 灌水量 Irrigation; P: 降雨量 Precipitation.

作用下,同一灌水周期内呈先升后降再升的趋势.降雨量为 7.4~33.4 mm 时,0~40 cm 土层 EC 呈降低趋势,而在 40~80 cm 土层则略有升高;而当降雨量小于 5 mm 时,两层土壤 EC 无明显变化.总体上,在大量灌水和降雨的作用下,各土层 EC 均呈现降低的趋势.第二阶段,各土层 EC 变化幅度减小且维持在较低水平,0~40 和 40~80 cm 土层土壤 EC 平均值分别比第一阶段降低 47.6%和27.4%.

2.2 不同典型天气条件下紫穗槐日液流特征

2.2.1 晴天 由图 2 可以看出,晴天条件下,紫穗槐

的液流速率呈宽峰曲线,无明显峰值,且具明显的昼夜节律性.各基径紫穗槐液流启动时间约为 6:30 (日出时间 6:00 左右),之后迅速上升至峰值(9:00—17:30),18:00 左右开始下降,20:00 左右降到极低值,而 20:00—次日 6:00 存在微弱液流;AF-10、AF-13 和 AF-16 峰值分别为 102~117、120~190和 322~366 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$;AF-10 和 AF-13 的夜间(20:00—次日 6:00)液流速率差异小于 5 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$,且均低于 10 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$,而 AF-16 的夜间平均液流速率为 20.60 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$,约为另外两株的 2 倍.

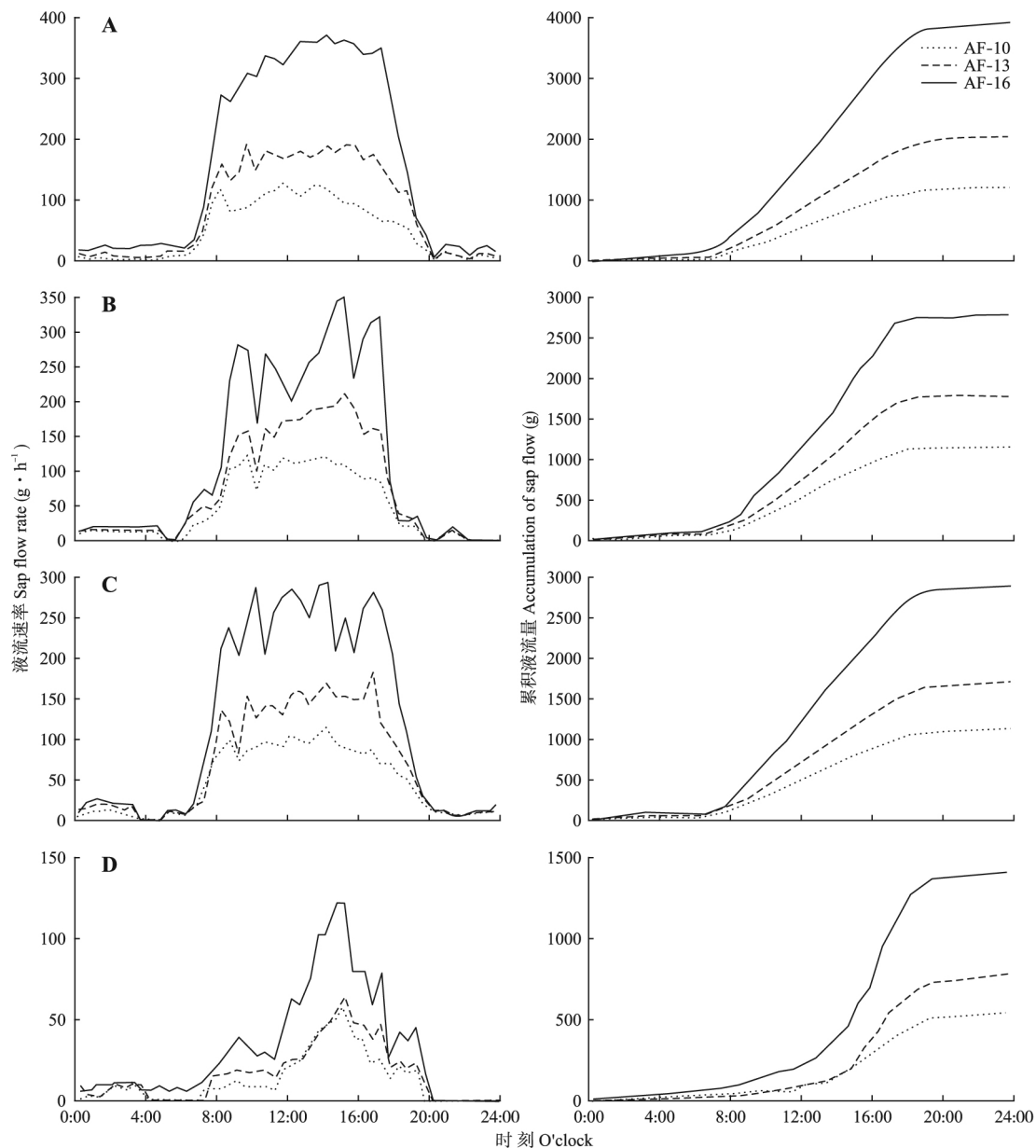


图 2 不同天气条件下紫穗槐液流速率和累积液流量特征

Fig.2 Sap flow rate and accumulation of sap flow of *Amorpha fruticosa* in different weather conditions.

AF-10、AF-13、AF-16 为样株 Sample. 下同 The same below. A: 晴天 Sunny day; B: 多云天 Cloudy day; C: 阴天 Overcast day; D: 雨天 Rainy day.

晴天紫穗槐的日液流累积量呈 S 型曲线,其积累的主要时间段为 8:00—18:00. AF-10、AF-13、AF-16 日累积液流量大小依次为 1201.11、2032.59、3888.77 g. S 型曲线在 4:00 和 20:00 存在 2 条渐近线,为日累积液流量平缓阶段,此时液流速率趋近于 $0 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$.

2.2.2 多云天和阴天 多云和阴天条件下,紫穗槐的液流变化均为多峰曲线.多云条件下,液流峰值波动明显,且峰值差异较大,AF-10、AF-13、AF-16 的最高峰值分别为 131.67 、 212.16 、 $350.22 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$,最低值为 97.49 、 119.88 、 $166.69 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$;阴天条件下其峰值波动较小,AF-10、AF-13、AF-16 液流峰值分别为 $92 \sim 115$ 、 $132 \sim 169$ 、 $240 \sim 290 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$.与晴天相比,多云和阴天条件下液流启动时间、达到峰值时间均延长 $0.5 \sim 1 \text{ h}$,且 AF-10、AF-13、AF-16 液流日累积总量分别较晴天时降低 $3.4\% \sim 16.7\%$ 、 $11.4\% \sim 28.2\%$ 、 $25.4\% \sim 40.8\%$,且 3 株不同基径紫穗槐之间日累积量的差异较晴天条件降低 $10.2\% \sim 13.2\%$.

2.2.3 雨天 雨天条件下,紫穗槐的日液流速率呈多峰型变化,且夜间存在微弱液流.液流启动时间较无降雨天气条件下延长 $5 \sim 6 \text{ h}$;液流速率日间波动较大,但一直处于较低状态,AF-10、AF-13、AF-16 液流速率最大值分别为其他天气条件下日液流速率最大值的 $43.8\% \sim 50.5\%$ 、 $29.9\% \sim 35.1\%$ 、 $23.6\% \sim 41.7\%$;雨天条件下,AF-10、AF-13、AF-16 液流日累积总量分别为 537.85 、 774.21 、 1402.84 g ,仅为晴天条件下的 36.1% 、 38.1% 、 44.8% .

2.3 紫穗槐生长期内液流变化特征

由图 3 可知,不同基径紫穗槐生长季的日液流累积量变化规律基本一致,随基径的增大而增大;各基径紫穗槐 6、7 月液流累积量较高,7 月最高,5、8 月相近,9、10 月较低;7 月 AF-10、AF-13、AF-16 月液流累积量分别为 33.91 、 53.38 、 94.70 kg ,6—7 月 3 株紫穗槐月液流累积总量高达总生长期的 $47.7\% \sim 50.4\%$;5、8 月占比 $14.9\% \sim 19.3\%$,9 月为 $12.9\% \sim 14.1\%$,10 月累积量最低,AF-10、AF-13、AF-16 平均日液流累积量仅为 0.34 、 0.45 、 0.89 kg .全生长期 AF-10、AF-13、AF-16 的总液流量依次为 138.14 、 206.06 、 370.11 kg .

2.4 不同时间尺度下紫穗槐液流特征与环境因子的相关性

由表 4 可以看出,0.5 h 尺度下,不同基径紫穗

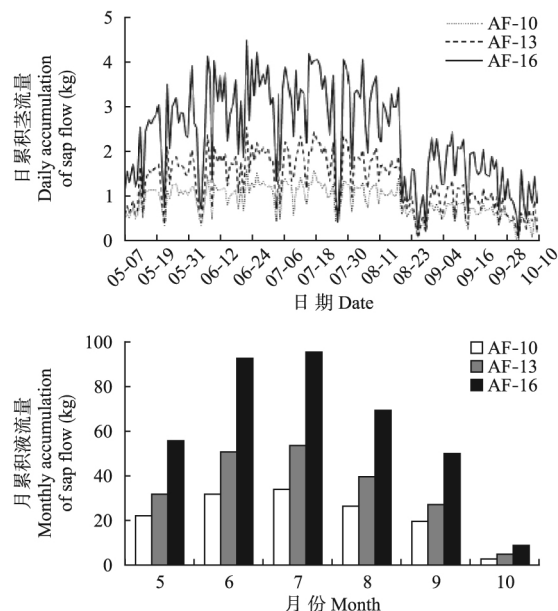


图 3 紫穗槐生长季日累积液流量和 5—10 月月液流累积量

Fig.3 Daily accumulation of sap flow in the whole growth periods and monthly accumulation of sap flow of *Amorpha fruticosa* from May to October.

槐的液流速率与各气象因子均呈显著相关关系,其中与 PAR 、 T_a 、 S_w 呈正相关,与 RH 呈负相关.日尺度下,第一阶段紫穗槐的日平均液流速率除与风速相关性不显著外与其他气象因子均存在显著相关关系;此外,与浅层 ($0 \sim 40 \text{ cm}$) SWC 呈显著正相关关系,而与深层 ($40 \sim 80 \text{ cm}$) SWC 相关性不显著;AF-10 液流速率与浅层土壤 EC 呈显著负相关,与深层土壤 EC 的相关性不显著,另外两株紫穗槐与各层土壤 EC 均不存在显著相关关系.第二阶段各基径紫穗槐的日平均液流速率均与 PAR 和 T_a 呈显著正相关,与其他因子相关性均不显著.

采用多元逐步回归分析方法,以 5% 的可靠性作为变量入选和剔除临界值,建立不同时间尺度紫穗槐液流速率与环境因子的回归方程(表 5),各方程的 R^2 值为 $0.72 \sim 0.88$,且均达到了显著水平.由方程中标准化系数绝对值大小(表 6)可知,各基径植株在 0.5 h 和日尺度第二阶段,PAR 均对其液流速率起主要影响作用, T_a 次之.日尺度下第一阶段,各环境因子对 AF-10 的液流速率影响大小依次为: $0 \sim 40 \text{ cm}$ 土层 SWC 、 PAR 、 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 土层 EC 、 T_a ;对于 AF-13 和 AF-16,各环境因子影响大小则为: PAR 、 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 土层 SWC 、 T_a .

表 4 0.5 h 和日尺度下紫穗槐液流速率与环境因子的相关性
Table 4 Correlation of sap flow rate of *Amorpha fruticosa* at 0.5 h and day scales with environmental factors

尺度 Scale	样株 Sample	EC _(0~40)	EC _(40~80)	SWC _(0~40)	SWC _(40~80)	PAR	T _a	RH	S _{w mean}	
0.5 h (n = 384)	AF-10					0.907 ^{∗ ∗}	0.766 ^{∗ ∗}	−0.590 ^{∗ ∗}	0.269 ^{∗ ∗}	
	AF-13					0.893 ^{∗ ∗}	0.807 ^{∗ ∗}	−0.617 ^{∗ ∗}	0.268 ^{∗ ∗}	
	AF-16					0.905 ^{∗ ∗}	0.792 ^{∗ ∗}	−0.588 ^{∗ ∗}	0.228 ^{∗ ∗}	
日 Day	阶段	AF-10	−0.502 [∗]	0.155	0.626 ^{∗ ∗}	0.416	0.584 ^{∗ ∗}	0.551 ^{∗ ∗}	−0.431 [∗]	0.037
	Stage I (n = 21)	AF-13	−0.267	0.246	0.502 [∗]	0.257	0.662 ^{∗ ∗}	0.552 ^{∗ ∗}	−0.501 [∗]	0.081
		AF-16	−0.394	0.147	0.553 ^{∗ ∗}	0.221	0.784 ^{∗ ∗}	0.610 ^{∗ ∗}	−0.468 [∗]	−0.084
	阶段	AF-10	−0.182	−0.122	0.197	0.436	0.774 ^{∗ ∗}	0.635 [∗]	−0.492	−0.222
	Stage II (n = 10)	AF-13	−0.225	0.016	0.227	0.478	0.764 ^{∗ ∗}	0.653 [∗]	−0.505	−0.082
		AF-16	−0.083	−0.180	0.104	0.331	0.780 ^{∗ ∗}	0.678 [∗]	−0.276	0.129

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. EC_(0~40): 0~40 cm 土壤电导率平均值 Mean soil electrical conductivity in 0~40 cm soil layer; EC_(40~80): 40~80 cm 土壤电导率平均值 Mean soil electrical conductivity in 40~80 cm soil layer; SWC_(0~40): 0~40 cm 土壤含水量平均值 Mean soil water content in 0~40 cm soil layer; SWC_(40~80): 40~80 cm 土壤含水量平均值 Mean soil water content in 40~80 cm soil layer; PAR: 光合有效辐射 Photosynthetically active radiation; T_a: 气温 Air temperature; RH: 相对湿度 Relative humidity; S_{w mean}: 平均风速 Mean wind speed. 下同 The same below.

表 5 0.5 h 和日尺度下紫穗槐液流速率与环境因子的逐步回归方程
Table 5 Stepwise regression equations between daily cumulative sap flow rate at 0.5 h and day scales and environmental factors

尺度 Scale	样株 Sample	逐步回归方程 Stepwise regression equation	R ²	
0.5 h (n = 384)	AF-10	$V_{SF} = -28.06 + 0.06PAR + 1.86T_a$	0.86 ^{**}	
	AF-13	$V_{SF} = -62.89 + 0.08PAR + 3.84T_a$	0.87 ^{**}	
	AF-16	$V_{SF} = -103.10 + 0.16PAR + 6.15T_a$	0.88 ^{**}	
日 Day	阶段	AF-10	$V_{SF\ mean} = -6.38 - 1.07EC_{(0-40)} + 1.15SWC_{(0-40)} + 0.04PAR + 0.70T_a$	0.68 ^{**}
	Stage I (n = 21)	AF-13	$V_{SF\ mean} = -34.48 + 1.49SWC_{(0-40)} + 0.13PAR + 0.73T_a$	0.72 ^{**}
		AF-16	$V_{SF\ mean} = -123.57 + 3.18SWC_{(0-40)} + 0.32PAR + 1.26T_a$	0.82 ^{**}
	阶段	AF-10	$V_{SF\ mean} = -3.87 + 0.046PAR + 0.79T_a$	0.82 ^{**}
	Stage II	AF-13	$V_{SF\ mean} = -0.95 + 0.041PAR + 0.76T_a$	0.82 ^{**}
	(n = 10)	AF-16	$V_{SF\ mean} = 13.62 + 0.078PAR + 1.48T_a$	0.87 ^{**}

V_{SF}: 瞬时液流速率(0.5 h) Instantaneous sap flow rate (0.5 h); V_{SF mean}: 平均液流速率(1 day) Mean sap flow rate (1 day).

表 6 0.5 h 和日尺度下逐步回归方程的标准化系数
Table 6 Standardized coefficients of stepwise regression equations at 0.5 h and daily scales

尺度 Scale	样株 Sample	EC _(0~40)	SWC _(0~40)	PAR	T _a	
0.5 h (n = 384)	AF-10			0.719	0.275	
	AF-13			0.640	0.370	
	AF-16			0.682	0.326	
日	阶段	AF-10	-0.136	0.524	0.236	0.114
Day	Stage I	AF-13		0.390	0.463	0.216
	(n = 21)	AF-16		0.422	0.596	0.188
	阶段	AF-10			0.661	0.478
	Stage II	AF-13			0.646	0.500
	(n = 10)	AF-16			0.656	0.522

3 讨 论

3.1 气象因子对紫穗槐植株茎干液流的影响

本研究发现,0.5 h 尺度下,紫穗槐的液流速率与各气象因子均呈显著相关关系,这是不同天气下液流速率特征差异较大的重要原因.晴天 PAR 呈单峰曲线,且 PAR 和 T_a 均于午间达到最高,紫穗槐为

避免过度失水,通过关闭叶片部分气孔或减小开合程度以降低叶片蒸腾强度,故午间其液流速率始终在一个较小的范围内波动^[21].由于多云、阴天时云层的不规律遮挡且 PAR 较低,但变化基本保持在能够控制叶片气孔开合的范围之内,因此其液流速率与 PAR 的变化规律基本一致.雨天 PAR 和 T_a 均偏低且日间 RH 较高,故致使其液流速率一直处于较低状态.日尺度下,第一阶段各基径紫穗槐的日平均液流速率与 PAR、T_a、RH 均呈显著相关,第二阶段,各基径紫穗槐的日平均液流速率与 PAR、T_a 呈显著相关,与 RH、S_w 的相关性不显著;在不同时间尺度下逐步回归方程中,PAR 对各基径紫穗槐液流速率起主要作用,T_a 次之,这与其他植物研究结果类似^[25-27].

3.2 土壤因子对紫穗槐植株茎干液流的影响

土壤水分和盐分是盐渍化土壤的重要参数,也是表征土壤质量的重要状态变量^[14,28].罗超等^[13]、Qiang 等^[18] 研究发现,植物液流速率仅在其受到干

旱胁迫时才会与根系层 SWC 存在显著正相关关系。本研究中,第一阶段各基径紫穗槐日平均液流速率均与浅层土壤水分呈显著正相关,与深层土壤水分关系不显著;第二阶段其与两层土壤水分均无显著相关关系。这可能与在高温强辐射且植株耗水较多的第一阶段,土壤水分散失较快,而此时土壤盐分含量较高,故土壤渗透势较低,使土壤总水势进一步降低,植物水分匮乏严重,所以此阶段水分对植株液流影响较大;而紫穗槐幼龄植株根系主要分布在浅层土壤^[24],故仅浅层土壤水分对植株液流存在显著促进作用。第二阶段因土壤水分散失较慢,盐分含量低且紫穗槐耗水量大幅减少,植株往往尚未出现水分匮乏就遇到降雨或进行灌水,所以土壤水分对其液流的影响较小。这说明在次生盐碱地上利用紫穗槐进行造林时需让土壤水分保持在合理范围内,从而保证其生理生长活动正常进行。

本研究发现,仅 AF-10 的日平均液流速率与第一阶段的浅层土壤盐分呈显著负相关。有研究表明,紫穗槐在根际层土壤含盐量 0.3%~0.5% (土壤电导率为 4~8 dS·m⁻¹)^[29-31] 的范围内能正常生长,而在第一阶段,浅层土壤 EC 为 2.09~5.42 dS·m⁻¹,土壤盐分对 AF-10 的液流存在显著抑制作用,对 AF-13 和 AF-16 则没有显著影响。这可能与生长健壮的植株盐分耐受能力较高有关^[31]。而本研究中,AF-13 与 AF-16 的长势明显好于 AF-10,而 AF-10 在第一阶段受到盐分胁迫时会发生叶片变黄的现象,这与穆永光^[32] 研究发现的盐胁迫下紫穗槐幼苗生长量和叶绿素含量均显著降低的现象类似。第二阶段,根系层土壤 EC 为 1.70~2.04 dS·m⁻¹,土壤盐分对 AF-10 的液流无显著抑制作用,这可能与第二阶段土壤 EC 较低,未达到 AF-10 的最大盐分耐受度有关。而在整个生长阶段,在浅层土壤盐分为 1.38~5.42 dS·m⁻¹ 时,土壤盐分对 AF-13 和 AF-16 的液流均无显著抑制作用,说明其盐分耐受范围大于 5.42 dS·m⁻¹。表明基径较大的紫穗槐 (AF-13 和 AF-16) 可在表层土壤盐分为 5 dS·m⁻¹ 左右的中度盐渍土中栽植,而 AF-10 适于在根系层土壤 EC 小于 2 dS·m⁻¹ 的轻度盐渍土中栽植。而在土壤盐分大于 5 dS·m⁻¹ 的盐渍土中,AF-13 和 AF-16 的液流变化特征以及与土壤含盐量之间响应关系的问题还有待进一步研究。

4 结 论

不同天气条件下,紫穗槐呈现不同液流变化特征,晴天呈“几”字型宽峰曲线,无明显“午休”现象,

多云、阴、雨天气呈不规则多峰曲线;夜间存在微弱液流。紫穗槐耗水量与基径呈正相关,6、7 月耗水较多,约占全生长期的 50%,5、8 月次之,9、10 月较低。气象因子方面,0.5 h 尺度下,紫穗槐液流速率与各气象因子均呈显著相关关系,且对其影响大小依次为: PAR、 T_a 、RH、 S_w ; 日尺度下,由多元逐步回归方程可知,PAR 和 T_a 是影响紫穗槐液流的关键因子。土壤因子方面,第一阶段,浅层土壤水分对 3 株紫穗槐的液流速率均有显著影响;此外,仅第一阶段浅层土壤盐分对 AF-10 的液流存在一定的抑制作用。综上,建议基径<13 mm 的紫穗槐不宜在浅层土壤 EC>2 dS·m⁻¹ 的盐渍土中栽植,而基径>16 mm 的紫穗槐可栽植于浅层土壤 EC 约为 5 dS·m⁻¹ 的盐渍土中;此外,在次生盐碱地上利用紫穗槐进行造林时需在其生长旺盛期进行合理灌溉。

参考文献

- [1] Song S-S (宋沙沙), Gou Y-B (苟宇波), He X-Y (何新燕), et al. Effects of modifier application on saline-alkali land amelioration and weeping willow growth. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2017, 39(5): 89-97 (in Chinese)
- [2] Dong S-D (董世德), Wan S-Q (万书勤), Kang Y-H (康跃虎), et al. Effect of different soil matrix potentials on distribution of soil salt and growth of poplar (*Populus*) by drip irrigation in low-lying saline area. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2017, 31(1): 236-242 (in Chinese)
- [3] Li M (李岷). Underground Water Resources Evaluation and Water Table Regulation Study for Qingtongxia-Yellow River Irrigation in Ningxia Province. Master Thesis. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003 (in Chinese)
- [4] Fan L-Q (樊丽琴), Yang J-G (杨建国), Xu X (许兴), et al. Salinity characteristics of soil and correlation of saline-alkali soil in Ningxia irrigation district. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2012, 28(35): 221-225 (in Chinese)
- [5] Lei X-P (雷晓萍), Liu X-F (刘晓峰). Comprehensive improvement and control measures for saline land in Yinbei area of Ningxia. *China Engineering Consulting* (中国工程咨询), 2016(8): 53-55 (in Chinese)
- [6] Marcar N, Ismail S, Hossain A, et al. Trees, Shrubs and Grasses for Salt Lands: An Annotated Bibliography. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 1999
- [7] Zhang L-G (张利刚), Zeng F-J (曾凡江), Liu Z (刘镇), et al. Sap flow characteristics of three plant species and their responses to environmental factors in an extremely arid region. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2013, 30(1): 115-121 (in Chinese)
- [8] Liu B, Zhao W, Yang R, et al. Characteristics and spatial heterogeneity of *Tamarix ramosissima* Nebkhas in desert-oasis ecotones. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28: 1446-1455
- [9] Li X-L (李小龙). Movement of Soil Salts in Qingtongxia Irrigation Area. Master Thesis. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003 (in Chinese)

- [10] Fan X-X (范晓旭). Discussion on the improvement measures of saline alkali in Ningxia Yellow River irrigation area. *Innovation and Application of Science and Technology* (科技创新与应用), 2016(35): 249 (in Chinese)
- [11] Jiang G-M (蒋高明). Plant Physiology and Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2007 (in Chinese)
- [12] Xu S-Q (徐世琴), Ji X-B (吉喜斌), Jin B-W (金博文), et al. Dynamics of sap flow rate in stems of typical desert shrub *Calligonum mongolicum* and its responses to environmental variables. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, 27(2): 345–353 (in Chinese)
- [13] Xia JB, Zhang SY, Guo J, et al. Critical effects of gas exchange parameters in *Tamarix chinensis* Lour on soil water and its relevant environmental factors on a shell ridge island in China's Yellow River Delta. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 36–46
- [14] Kong Q-X (孔庆仙), Xia J-B (夏江宝), Zhao Z-G (赵自国), et al. Effects of groundwater salinity on the characteristics of leaf photosynthesis and stem sap flow in *Tamarix chinensis*. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2016, 40(12): 1298–1309 (in Chinese)
- [15] Luo C (罗超), Zha T-G (查同刚), Zhu M-X (朱梦洵), et al. Influence of shallow ground water on sap flow of riparian poplar plantations in northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, 27(5): 1401–1407 (in Chinese)
- [16] Luo F-M (罗凤敏), Xin Z-M (辛智鸣), Gao J-L (高君亮), et al. Sap flow dynamic variations of *Hippophae rhamnoides* and its response of meteorological factors. *Pratacultural Science* (草业科学), 2015, 32(11): 1871–1877 (in Chinese)
- [17] Guo Y (郭映), Dong Y (董阳), Zhou Z-F (周振方), et al. The sap flow of corn during the growth period and its response to meteorological factors in semi-arid area. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2014, 28(9): 94–99 (in Chinese)
- [18] Qiang T, Hu HC, Tian FQ, et al. Environmental and physiological controls on sap flow in a subhumid mountainous catchment in North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 240: 46–57
- [19] Wang RS, Kang YH, Wan SQ, et al. Influence of different amounts of irrigation water on salt leaching and cotton growth under drip irrigation in an arid and saline area. *Agricultural Water Management*, 2012, 110: 109–117
- [20] Du M-X (杜明新), Zhou X-R (周向睿), Zhou Z-Y (周志宇), et al. Vertical root distribution characteristics of *Amorpha fruticosa* on southern Mu Us sandy land. *Acta Pratacultural Sinica* (草业学报), 2014, 23(2): 125–132 (in Chinese)
- [21] Yue G-Y (岳广阳), Zhao H-L (赵哈林), Zhang T-H (张铜会), et al. Characteristics of *Caragana microphylla* sap flow and water consumption under different weather conditions on Horqin sandy land of northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, 18(10): 2173–2178 (in Chinese)
- [22] Shi S-B (师生波), Shang Y-X (尚艳霞), Zhu P-J (朱鹏锦), et al. Effects of solar UV-B radiation on the efficiency of PS II photochemistry in the alpine plant *Saussurea superba* under different weather conditions in the Qinghai-Tibet Plateau of China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, 35(7): 741–750 (in Chinese)
- [23] Chang Z-F (常兆丰), Han F-G (韩福贵), Zhong S-N (仲生年), et al. Relationships between phenology of 18 tree species and air temperature change in the Minqin desert area of China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2009, 33(2): 311–319 (in Chinese)
- [24] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 43–69
- [25] Bai Y (白岩), Zhu G-F (朱高峰), Zhang K (张琨), et al. Analysis of variation of sap flow rate and water consumption of grapevine in the Nabhu oasis, Dunhuang, China. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2015, 35(1): 175–181 (in Chinese)
- [26] Zhao K (赵奎), Ding G-D (丁国栋), Wu B (吴斌), et al. Characteristics of sap flow and transpiration of *Caragana korshinskii* Kom in the Mu Us sand land in Ningxia, China. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2009, 26(3): 94–99 (in Chinese)
- [27] Tang M (唐敏), Zhao X-N (赵西宁), Wu P-T (吴普特), et al. Effects of different surface mulching on jujube stem sap flow characteristics. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2016, 34(1): 120–126 (in Chinese)
- [28] Zhang N (张楠), Han J-X (韩金旭), Jiang H (江红), et al. Movement regularity and its influence factors of soil salt and moisture during farming period. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2015, 35(6): 8–14 (in Chinese)
- [29] Yan Y-Q (闫永庆), Zhu H (朱虹), Liu X-L (刘兴亮), et al. Effect of salt stress on *Amorpha fruticosa* L. growth and physiological index. *Journal of Northeast Agricultural University* (东北农业大学学报), 2008, 39(12): 31–35 (in Chinese)
- [30] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2016 (in Chinese)
- [31] Zhang G-W (张国伟), Lu H-L (路海玲), Zhang L (张雷), et al. Salt tolerance evaluation of cotton (*Gossypium hirsutum*) at its germinating and seedling stages and selection of related indices. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, 22(8): 2045–2053 (in Chinese)
- [32] Mu Y-G (穆永光). Effects of Saline-alkali Stress on Growth and Physiology of *Amorpha fruticosa*. Master Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2016 (in Chinese)

作者简介 曹琪琪, 女, 1992年生, 硕士研究生. 主要从事林业生态研究. E-mail: caoqiqi1993@163.com

责任编辑 孙菊

曹琪琪, 王若水, 肖辉杰, 等. 宁夏引黄灌区次生盐碱地紫穗槐茎干液流分析. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2347–2354

Cao Q-Q, Wang R-S, Xiao H-J, et al. Sap flow of *Amorpha fruticosa* in the secondary saline-alkali land in Ningxia Yellow River irrigation area, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2347–2354 (in Chinese)