鄂尔多斯高原沙地柏液流通量及其影响因子

朱雅娟[1]，杜 娟[2]，吴彩霞[3]，李 蕴[1]

(1. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所，北京 100091；2. 中国科学院 植物研究所植被与环境变化国家重点实验室，北京 100093；3. 鄂尔多斯市森林公安局东胜区分局，内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘 要：[目的] 分析沙地柏液流通量变化特征及主要影响因子，为沙地植被的保护提供理论依据。[方法] 以鄂尔多斯高原沙地植被的优势种沙地柏为研究对象，利用热扩散(TDP)技术监测生长季沙地柏的液流动态，通过相关分析和回归分析等研究其与气象因子的关系。[结果] 晴天沙地柏的液流通量为单峰曲线，干旱时为双峰曲线。雨天沙地柏的液流通量为单峰或双峰曲线。晴天沙地柏液流通量的最大值是2.30～23.38 g/(cm^2 · h)。沙地柏液流通量对降雨的响应具有 1～4 d 的时滞。生长季沙地柏液流通量与光合有效辐射、水汽压亏缺、气温和风速均呈显著正相关，而与相对湿度和降雨量呈显著负相关。[结论] 鄂尔多斯高原沙地柏的液流通量随天气而变化。太阳辐射和水分是沙地柏液流通量的主要影响因子。建议当地加强对沙地柏灌丛的保护，防止由于过度水分消耗导致的植被退化。

关键词：气象因子；鄂尔多斯高原；沙地柏；液流

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)03-0088-07 **中图分类号**：Q948.1；S718.45

文献参数：朱雅娟，杜娟，吴彩霞，等. 鄂尔多斯高原沙地柏液流通量及其影响因子[J]. 水土保持通报，2020，40(3)：88-94. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.013；Zhu Yajuan，Du Juan，Wu Caixia，et al. Sap flow of *Sabina vulgaris* and its influencing factors on Ordos Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(3)：88-94.

Sap Flow of *Sabina Vulgaris* and Its Influencing Factors on Ordos Plateau

Zhu Yajuan[1]，Du Juan[2]，Wu Caixia[3]，Li Yun[1]

(1. *Institute of Desertification Studies*，*Chinese Academy of Forestry*，*Beijing* 100091，*China*；2. *State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change*，*Institute of Botany*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100093，*China*；3. *Dongsheng Sub-bureau of Ordos Forestry Public Security Bureau*，*Ordos*，*Inner Mongolia* 017000，*China*)

Abstract：[Objective] The sap flow dynamics of *Sabina vulgaris* and the influencing factors was studied in order to provide theoretical support for the protection of sandy land vegetation. [Methods] The dominant species of *S. vulgaris* on the Ordos Plateau，which was the typical natural sandy land vegetation in Inner Mongolia，was taken as a case. The sap flow dynamic of *S. vulgaris* was monitored by thermal dissipation probe technology. Its relationships with climatic factors were analyzed by correlation and regression analyses. [Results] The sap flow dynamics of *S. vulgaris* was a single-peak curve on sunny days，and a double-peak curve during drought；however，it was a single-or double-peak curve on rainy days. The daily maximal value of sap flow of *S. vulgaris* was 2.30—23.38 g/(cm^2 · h) on sunny days. There was a 1—4 days time lag in the response of the sap flow of *S. vulgaris* to rain. The sap flow was significantly positively correlated with photosynthetically active radiation，vapor pressure deficit，air temperature，and wind speed，but it was significantly negatively correlated with relative humidity and precipitation in the growing season. [Conclusion] The sap flow of *S. vulgaris* on the Ordos Plateau varied with weather. Solar irradiation and water were the main influencing factors for the sap flow of *S. vulgaris*. *S. vulgaris* shrub land should be protected to prevent vegetation degradation caused by excessive water consumption.

Keywords：**climatic factor**；**Ordos Plateau**；***Sabina vulgaris***；**sap flow**

收稿日期：2020-01-02 **修回日期**：2020-02-17

资助项目："十三五"国家重点研发计划项目专题"砒砂岩区植被稳定性格局形成机理"(2017YFC0504 50202)

第一作者：朱雅娟(1980—)，女(汉族)，陕西省眉县人，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事荒漠植物植物生理生态研究。Email：zhuyj@caf.ac.cn。

鄂尔多斯高原位于中国黄河中游的宁陕蒙三省区交界地带,是黄土高原与内蒙古高原的过渡带,总面积为 1.30×10^5 km^2。高原南部是毛乌素沙地,北部是库布齐沙漠。天然植被从东南部的森林草原、草原、沙地过渡到西北部的荒漠。过去几十年,鄂尔多斯高原土地沙漠化严重[1]。近年来,通过京津风沙源、天然林保护和退耕还林还草等综合治理工程的实施,采取飞播、围栏封育和植树造林等多种措施,使鄂尔多斯高原的植被覆盖率得到大幅提高,风沙危害明显减缓,生态环境显著改善。其中,气候变化和人类活动导致鄂尔多斯高原南部毛乌素沙地的植被生长状况好转[2]。

沙地柏(*Sabina vulgaris*)是柏科圆柏属的常绿匍匐灌木,中文名叉子圆柏,又名臭柏,高 0.3～1 m。它具有耐旱性强的优点,可作水土保持及固沙造林树种[3]。沙地柏群落主要分布在浑善达克沙地、毛乌素沙地、贺兰山、阴山、青海湖环湖沙地、祁连山、天山和阿尔泰山[4]。在鄂尔多斯高原,沙地柏是沙地灌丛的优势物种之一。目前,国内外关于沙地柏的水分生理生态学的研究主要集中在毛乌素沙地,包括生物特征和环境因子两个方面。

沙地柏自身的形态、生理和生态特征对半干旱环境具有特殊适应性,包括枝条异型、叶片异型和苗龄等。例如,沙地柏直立枝的净光合速率和蒸腾速率低于匍匐枝,但是水分利用效率较高。刺叶的净光合速率和蒸腾速率高于鳞叶,但是水分利用效率较低[5]。沙地柏鳞叶的蒸腾失水较小,渗透调节和保水能力较强,耐旱性较高[6]。干旱胁迫下沙地柏通过降低密度、自疏和下部枝叶干枯来维持种群生存。叶片气孔关闭,光合速率与蒸腾速率降低,提高水分利用率。同时,增强渗透调节能力,增加角质层厚度,减少水分散失,从而提高耐旱性[7]。从 1,3,5 a,随着苗龄的增加,沙地柏枝叶保水力逐渐增强,3 a 沙地柏的瞬时水分利用效率最高[8]。

随着各种环境因素的变化,包括群落演替阶段、降雨、土壤含水量和地形等,沙地柏的形态、生理和生态特征也随之改变。例如,从半固定沙地到固定沙地,沙地柏叶片含水量逐渐降低[9]。随着降雨量的增加,土壤含水量提高,沙地柏叶片水分饱和亏缺和组织密度降低[10]。沙地柏的净光合速率、夜间呼吸速率与土壤含水量显著正相关[11]。沙丘顶部沙地柏的蒸腾速率和叶片水势低于滩地。沙地柏的蒸腾速率主要受气温、相对湿度和光合有效辐射影响[12]。固定沙地、丘间低地、流动沙地和滩地的沙地柏根系均具有水分共享,可以通过提水作用减少水分胁迫,维持较高的蒸腾速率,有利于生态系统的水分平衡[13]。这些研究从不同角度认识了沙地柏对半干旱环境的生理生态适应对策,为沙地灌丛的保护与可持续管理提供了一定的理论依据。然而,目前还未见对于沙地柏液流特征的报道。

水分是影响半干旱区植被生存与生长的主要因素。由于沙地柏是克隆植物,群落盖度逐渐增加,对土壤水分消耗加剧;同时,土壤结皮的发育阻碍雨水入渗,从而导致沙地柏群落衰退[14]。此外,在沙丘顶部不能利用地下水的条件下,过大的密度引起蒸腾耗水,植物处于严重的水分胁迫中,从而发生退化甚至枯死[15]。因此,沙地柏的耗水特征是其在半干旱区生存和生长的关键。通过热扩散(thermal dissipation probe, TDP)技术监测林木的液流可以分析其耗水特征,评估林分的水分平衡[16]。因此,本文研究鄂尔多斯高原沙地柏的液流特征,分析其主要影响因素,以期为沙地灌丛的保护与可持续管理提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本文的研究地点是内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗。该旗地处鄂尔多斯高原东南部(108°58′—110°25′E,38°56′—39°49′N),位于毛乌素沙地东北缘,海拔范围 1 000～1 500 m。具有中温带大陆性气候,年平均气温 6.2 ℃,年均降水量 358 mm,多集中在 6—8 月;年均潜在蒸发量 2 563 mm;无霜期 127～136 d[17]。当地的土壤主要是栗钙土和风沙土。天然植被主要包括沙地柏、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix psammophila*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)灌丛以及本氏针茅(*Stipa bungeana*)和马蔺(*Iris lactea* var. *chinensis*)草原等。

1.2　研究方法

沙地柏灌丛位于伊金霍洛旗纳林陶亥镇西部。2018 年 4 月 19 日,随机选择 4 株生长健壮的沙地柏,分别测量株高(m)和树干直径(cm),计算沙地柏木质部横截面面积,结果见表 1。

表 1　沙地柏样株的基本参数

样株编号	株高/m	地径/cm	木质部面积/cm^2
S_1	0.92	3.18	5.82
S_2	0.84	2.98	5.11
S_3	1.22	4.52	11.76
S_4	0.82	2.71	4.24

在每株沙地柏的树干上分别安装一对长度 1 cm,直径 2 mm 的 TDP 液流探针,加热探针与参比探针垂直间距 10 cm。先用塑料泡沫固定探针,再用铝箔包裹密封,减少阳光和雨水等干扰。然后将 4 对探针与

CR1000 数采器连接，每 1 min 采集一次数据，每 5 min 存储一次数据。根据 Granier[18] 推导的液流通量与温差系数相关经验公式，计算沙地柏的液流通量 F_d〔g/(cm² · h)〕：

$$F_d = 119 \times 10^{-4} \left[(\Delta T_{max} - \Delta T)/\Delta T\right]^{1.231} \times 3\,600 \quad (1)$$

式中：ΔT_{max}为昼夜最大温差；ΔT 为瞬时温差。

本文的气象数据来自距离研究地点 500 m 外的内蒙古鄂尔多斯草地生态系统国家野外科学观测研究站，包括气温 T(℃)，相对湿度 RH(%)，风速 V(m/s)，光合有效辐射 PAR〔μmol/(m² · s)〕，降水量 P(mm)等。计算水汽压亏缺 VPD(kPa)，公式为：

$$VPD = 0.611 \times \exp\left[17.502/(T + 240.97)\right] \times (1 - RH) \quad (2)$$

1.3 数据处理

通过 Excel 2013 计算液流通量并作图。分别用小时均值和日均值分析 4 株沙地柏的液流通量与各气象因子的关系。通过 SPSS 19.0 对沙地柏液流通量与各气象因子进行 Pearson 相关分析、多元线性回归和显著性检验($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 2018 年生长季鄂尔多斯生态站的气温和降雨

2018 年 4 月 20 日到 9 月 18 日，鄂尔多斯生态站的日最高气温、日最低气温和日平均气温分别在 14.2～33.9，－2.6～20.4，8.4～27.2 ℃之间波动。期间的总降雨量为 336.8 mm。日降雨量最高值为 8 月 30 日的 34.4 mm（见图 1）。

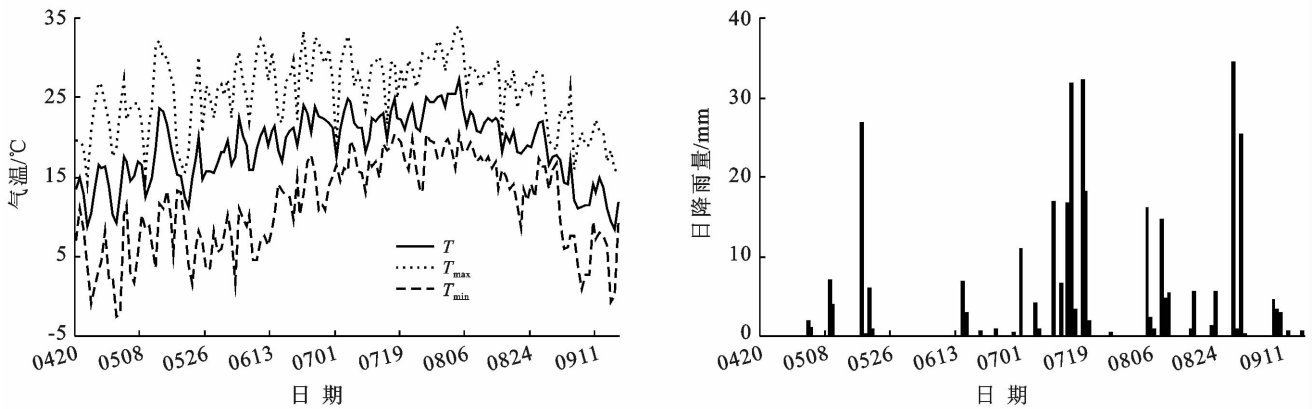


图 1 2018 年生长季鄂尔多斯生态站的气温和降雨特征

2.2 晴天沙地柏液流通量日动态

生长季 4—9 月晴天沙地柏的液流通量大部分呈单峰曲线，液流的启动时间为 7:00—8:00，12:00—14:00 达到峰值，19:00 以后迅速下降（见图 2）。然而，7 月 21 日样株 2 以及 9 月 16 日样株 1，3，4 的液流通量为双峰曲线，表现出午休现象。5 月 25 日和 9 月 16 日样株 1 具有一定量的夜间液流。晴天液流通量最高值是 2.30～23.38 g/(cm² · h)。从月份差异来看，5—8 月的液流通量较高，9 月次之，4 月最低。晴天沙地柏液流通量的日动态与 VPD 趋势基本一致。

2.3 雨天沙地柏液流通量日动态

雨天沙地柏液流的日变化不规律，呈单峰或双峰曲线（见图 3）。液流启动时间不固定，从 5 月 10 日的 7:00—8:00 到 8 月 30 日的 13:00—14:00。5—8 月降雨时，液流昼夜变化比晴天较小，夜间液流不明显。雨天液流最高值小于晴天，仅为 0.28～17.01 g/(cm² · h)。雨天沙地柏液流通量的日动态与 VPD 趋势基本一致。

2.4 沙地柏液流通量对降雨的响应时滞

沙地柏液流通量对降雨的响应具有 1～4 d 的时滞（见图 4）。5 月 10 日发生 7.0 mm 降雨，当日 4 个样株的液流通量最大值比 5 月 9 日降低 11.59%～56.91%，次日样株 2—4 均超过 5 月 9 日的水平。6 月 16 日发生 6.8 mm 降雨，当日样株 1，3，4 的液流通量最大值比 6 月 15 日降低 55.66%～77.91%，次日样株 3 和 4 恢复；样株 2 的液流通量最大值仅比 6 月 15 日降低 92.74%，次日超过 6 月 15 日。7 月 19 日发生 32.2 mm 大雨，当日液流通量最大值比 7 月 18 日降低 17.49%～66.07%，次日样株 2 和 3 恢复，第 3 d 样株 4 超过 7 月 18 日。然而，8 月 30 日发生 34.4 mm 大雨后，4 个样株的液流通量最大值比 8 月 29 日降低 30.36%～77.24%；8 月 31 日有 0.8 mm 降雨，9 月 1 日又发生 25.4 mm 降雨，这两天的液流通量几乎为零；直到第 4 d 液流通量才恢复并超过 8 月 29 日的水平。

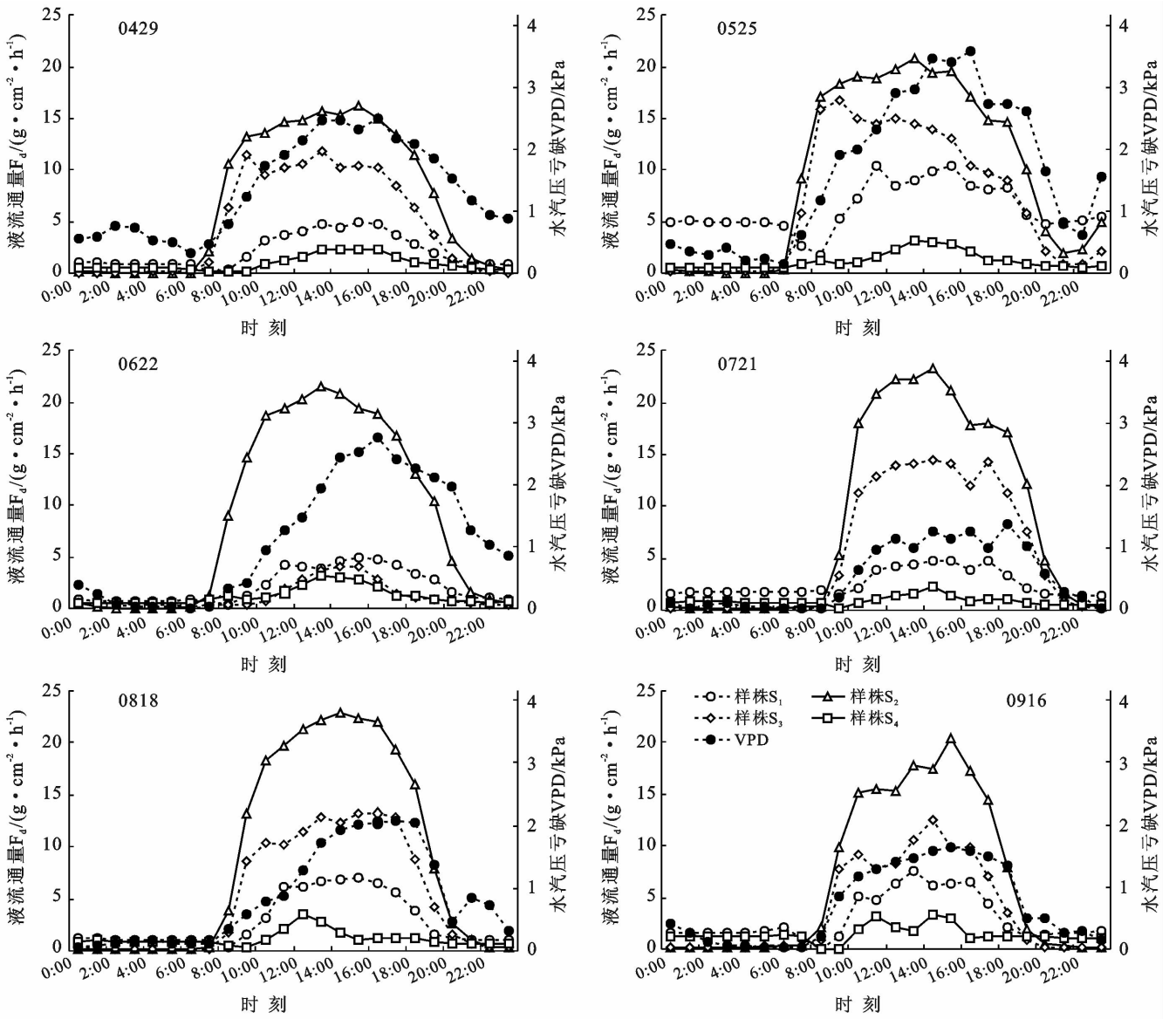


图 2　典型晴天沙地柏液流通量与水汽压亏缺(VPD)日动态

2.5　沙地柏液流通量与气象因子的相关性

生长季沙地柏液流通量的小时值与气温、风速、PAR 和 VPD 均呈显著正相关,而与相对湿度呈显著负相关(见表 2)。相关关系根据平均值的绝对值排序为:PAR＞VPD＞相对湿度＞气温＞风速。由于 VPD 能够反映气温和相对湿度的协同效应,采用多元线性回归分析得到沙地柏液流通量小时值与风速、PAR 和 VDP 的回归方程(见表 3)。

表 2　沙地柏液流通量小时值与气象因子的 Pearson 相关系数(n=3 648)

样株编号	气温 T_a	相对湿度 RH	风速 V	光合有效辐射 PAR	水汽压亏缺 VPD
S_1	0.216**	−0.601**	0.220**	0.509**	0.557**
S_2	0.670**	−0.630**	0.323**	0.823**	0.738**
S_3	0.648**	−0.615**	0.323**	0.832**	0.716**
S_4	0.191**	−0.459**	0.188**	0.502**	0.466**
平均值	0.617**	−0.672**	0.328**	0.832**	0.755**

注:** 表示在 0.01 水平上显著相关。下同。

表 3　沙地柏液流通量小时值与各气象因子的回归方程

样株编号	回归方程	R^2	p
S_1	F_d=−0.018V+0.001PAR+1.184VPD+0.432	0.368	＜0.001
S_2	F_d=0.071V+0.009PAR+3.470VPD+0.033	0.793	＜0.001
S_3	F_d=0.073V+0.006PAR+1.951VPD−0.192	0.787	＜0.001
S_4	F_d=−0.005V+0.001PAR+0.311VPD+0.223	0.303	＜0.001
平均值	F_d=0.030V+0.004PAR+1.729VPD+0.124	0.817	＜0.001

注:F_d 为液流通量;V 为风速;PAR 为光合有效辐射;VPD 为水汽压亏缺。下同。

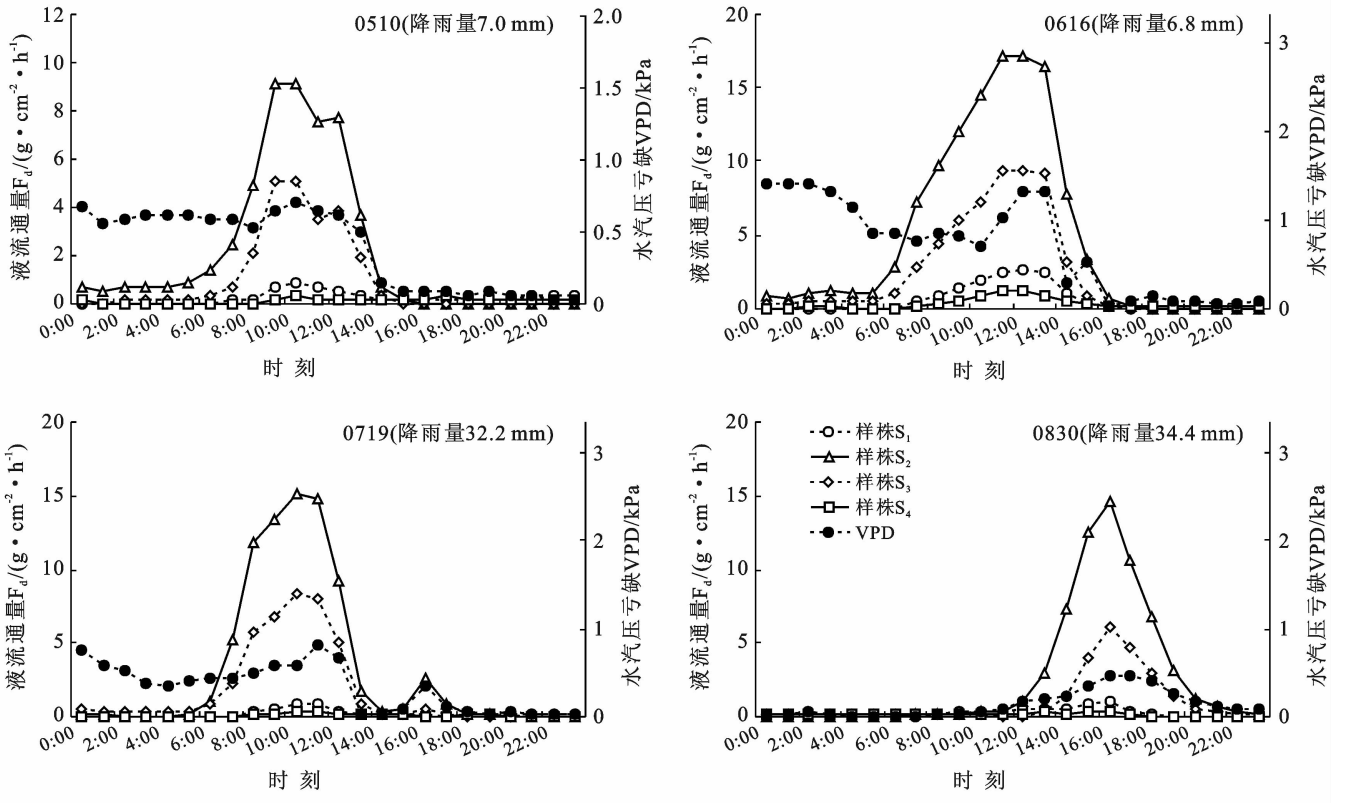


图 3 典型雨天沙地柏液流通量与水汽压亏缺日动态

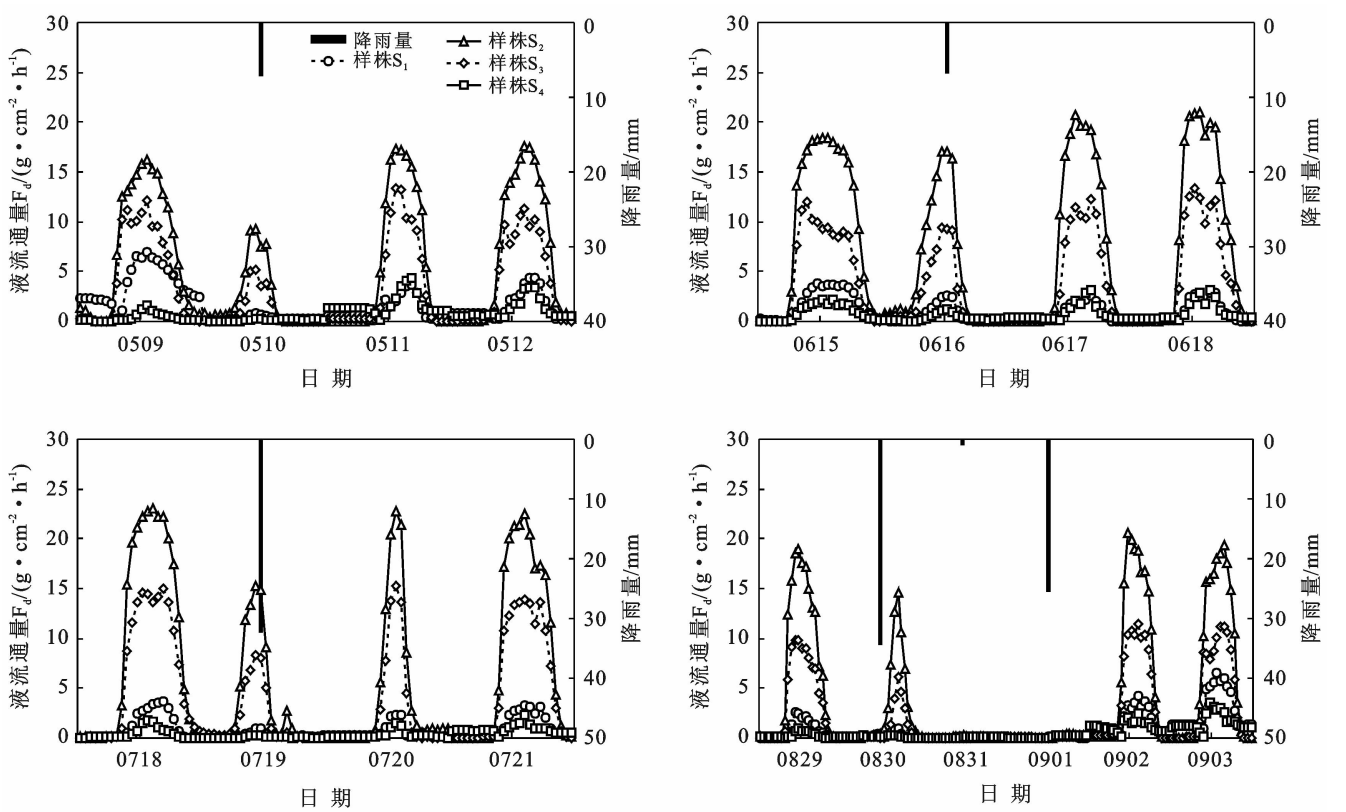


图 4 沙地柏液流通量对降雨的响应时滞

生长季沙地柏液流通量的日均值与 PAR 和 VPD 呈显著正相关,而与相对湿度和降雨量呈显著负相关。样株 1 和 4 的液流通量日均值与气温成显著负相关,样株 2、样株 3 和 4 株的平均值则与气温呈

显著正相关。但是,液流通量日均值与风速的相关性不显著(见表 4)。相关关系根据平均值的绝对值排序为:PAR>VPD>相对湿度>降雨量>气温。由于VPD 能够反映气温和相对湿度的协同效应,采用多元线性回归分析得到沙地柏液流通量日均值与 PAR,VDP 和降雨量的回归方程(见表 5)。

表 4　沙地柏液流通量日均值与气象因子的 Pearson 相关系数(n=152)

样株编号	气温 T_a	相对湿度 RH	风速 V	光合有效辐射 PAR	水汽压亏缺 VPD	降雨量 P
S_1	−0.273**	−0.569**	0.016	0.566**	0.391**	−0.275**
S_2	0.443**	−0.609**	0.054	0.790**	0.745**	−0.553**
S_3	0.449**	−0.631**	0.094	0.823**	0.763**	−0.520**
S_4	−0.384**	−0.360**	−0.097	0.376**	0.172**	−0.241**
平均值	0.172**	−0.714**	0.045	0.850**	0.720**	−0.530**

表 5　沙地柏液流通量日均值与各气象因子的回归方程

样株编号	回归方程	R^2	p
S_1	F_d=0.008PAR−0.095VPD−0.001P−1.223	0.320	<0.001
S_2	F_d=0.008PAR+1.588VPD+0.074P+2.702	0.716	<0.001
S_3	F_d=0.006PAR+1.063VPD−0.031P+0.932	0.751	<0.001
S_4	F_d=0.002PAR−0.279VPD−0.013P+0.155	0.168	<0.001
平均值	F_d=0.006PAR+0.565VPD−0.030P+0.642	0.762	<0.001

3　讨 论

在鄂尔多斯高原的沙地灌丛中,沙地柏的液流通量日动态随而天气变化:4—9 月的晴天为单峰曲线,最高值为 2.30～23.38 g/(cm^2 · h)。干旱时沙地柏的部分液流通量为双峰曲线,具有午休现象,这说明它可以通过降低液流通量来减少耗水。本研究的 4 个沙地柏样株的液流通量差异较大。这种现象可能是沙地柏的个体差异造成的。4 个样株的株高、直径与木质部面积的差异可能导致液流通量不同。沙地柏适应干旱的生理机制包括气孔关闭、减缓气体交换速率、降低叶片的蒸腾速率、气孔导度和水势等[11-12]。雨天沙地柏的液流通量为单峰或双峰曲线,最高值仅为 0.28～17.01 g/(cm^2 · h),明显低于晴天。从季节变化来看,夏季(5—8 月)液流通量高于秋季(9 月)和春季(4 月)。

此外,降雨后 1～4 d,沙地柏的液流通量能够恢复或者超过降雨之前的水平,对降雨表现出响应时滞。液流对降雨这种响应在黄土高原的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)[19]、侧柏(*Platycladus orientalis*)[20]、油松(*Pinus tabuliformis*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)[21]中也存在。其中,发生 9.6,11.0 mm 降雨后,油松和沙棘对降雨的响应时滞分别是 1.15,1.76 d[21]。因此,半干旱区木本植物的液流对降雨比较敏感。

在小时尺度上,沙地柏的液流通量与 PAR,VPD,气温和风速均呈显著正相关,与相对湿度呈显著负相关。然而,在日尺度上,沙地柏的液流通量与 PAR,VPD 和气温呈显著正相关,与相对湿度和降雨量呈显著负相关。因此,沙地柏液流的主要影响因子是太阳辐射和水分。太阳辐射是液流的驱动力,决定液流的瞬间变化。它通过提高叶面温度,增大叶片内外的蒸汽压差而加强蒸腾作用[22]。毛乌素沙地其他乔灌木的液流主要也受太阳辐射、气温、相对湿度或风速的影响,例如旱柳(*Salix matsudana*)[22-23]、小叶杨(*Populus simonii*)[23]、白榆(*Ulmus pumila*)[24]、中间锦鸡儿[25]和沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)[26]。因此,毛乌素沙地的木本植物的液流变化对环境具有一定的趋同适应。

4　结 论

(1) 鄂尔多斯高原沙地柏的液流通量随天气而变化。晴天呈单峰曲线,干旱时呈双峰曲线;雨天呈单峰或双峰曲线。沙地柏液流通量对降雨的响应具有 1～4 d 的时滞。

(2) 太阳辐射和水分是沙地柏液流通量的主要影响因素。小时尺度上沙地柏液流通量主要受光合有效辐射 PAR,水汽压亏缺 VPD,相对湿度,气温和风速影响。日尺度上沙地柏液流通量主要受光合有效辐射 PAR,水汽压亏缺 VPD,相对湿度,降雨和气温影响。

(3) 建议当地注意沙地柏灌丛的保护,避免因植物过度利用土壤水资源和土壤水资源超载导致的植被衰退,从而确保沙地灌丛的长期稳定。

致谢:感谢内蒙古鄂尔多斯草地生态系统国家野外科学观测研究站提供气象数据。

[参 考 文 献]

[1] 陈玉福,董鸣. 鄂尔多斯高原沙地草地荒漠化景观现状的定量分析[J]. 环境科学,2002,23(1):87-91.

[2] 曹艳萍,庞营军,贾晓红. 2001—2016 年毛乌素沙地植被的生长状况[J]. 水土保持通报,2019,39(2):29-37.

[3] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志第七卷:裸子植物门[M]. 北京:科学出版社,1978.

[4] 王林和,党宏忠,张国盛,等. 中国天然臭柏群落的分布与生物量特征[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2014,35(1):37-45.

[5] He Weiming, Zhang Xinshi, Dong Ming. Gas exchange, leaf structure, and hydraulic features in relation to sex, shoot form, and leaf form in an evergreen shrub *Sabina vulgaris* in the semi-arid Mu Us sandland in China [J]. Photosynthetica, 2003,41(1):105-109.

[6] 张金玲,陈海鹏,李玉灵,等. 臭柏异形叶水分特性的比较[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(5):154-159.

[7] 温国胜,张明如,张国盛,等. 干旱条件下臭柏的生理生态对策[J]. 生态学报,2006,26(12):4059-4065.

[8] 刘建锋,赵秀莲,江泽平. 不同年龄沙地柏生理生态特性差异研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(3):17-20.

[9] 红雨,王林和. 臭柏群落在不同演替阶段叶片含水量、叶绿素含量变化的研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2008,37(1):94-97.

[10] 何维明. 水分因素对沙地柏实生苗水分和生长特征的影响[J]. 植物生态学报,2001,25(1):11-16.

[11] He Weiming, Zhang Xinshi. Responses of an evergreen shrub *Sabina vulgaris* to soil water and nutrient shortages in the semi-arid Mu Us Sandland in China [J]. Journal of Arid Environments,2003,53(3):307-316.

[12] 张国盛,刘海东,王林和,等. 毛乌素沙地臭柏匍匐茎蒸腾速率和水势的日变化[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(6):173-180.

[13] 何维明,张新时. 水分共享在毛乌素沙地 4 种灌木根系中的存在状况[J]. 植物生态学报,2001,25(5):630-633.

[14] 郭爱莲,张卫兵,朱志诚,等. 固沙植物臭柏的死亡原因及保护对策[J]. 水土保持通报,2002,22(2):16-18.

[15] 董学军,陈仲新,阿拉腾宝,等. 毛乌素沙地沙地柏(*Sabina vulgaris*)的水分生态初步研究[J]. 植物生态学报,1999, 23(4):311-319.

[16] 刘潇潇,李国庆,闫美杰,等. 黄土高原主要树种树干液流研究进展[J]. 水土保持研究,2017,24(3):369-373.

[17] 全昌明,邢小军,李振昌,等. 伊金霍洛旗樟子松和油松引种试验对比研究[J]. 北京林业大学学报,2004,26(2):63-67.

[18] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiology,1987,3:309-320.

[19] Du Sheng, Wang Yilong, 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.

[20] 吴旭,陈云明,唐亚坤. 黄土丘陵区刺槐和侧柏人工林树干液流特征及其对降水的响应[J]. 植物生态学报,2015,39(12):1176-1187.

[21] Tang Yakun, Wu Xu, Chen Yunming. Sap flow characteristics and physiological adjustments of two dominant tree species in pure and mixed plantations in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. Journal of Arid Land,2018,10(6):833-849.

[22] 彭小平,樊军,米美霞,等. 黄土高原水蚀风蚀交错区不同立地条件下旱柳树干液流差异[J]. 林业科学,2013,49(9):38-45.

[23] 徐丹丹,尹立河,侯光才,等. 毛乌素沙地旱柳和小叶杨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.

[24] 赵奎,丁国栋,原鹏飞,等. 盐池毛乌素沙地白榆树干液流研究[J]. 水土保持研究,2008,15(6):85-88.

[25] 臧春鑫,杨劼,袁劼,等. 毛乌素沙地中间锦鸡儿整株丛的蒸腾特征[J]. 植物生态学报,2009,33(4):719-727.

[26] 郭跃,丁国栋,吴斌,等. 毛乌素沙地沙木蓼茎干液流规律研究[J]. 水土保持通报,2010,30(5):22-26.