

砒砂岩地区3种主要树种边材液流动态特征

尉迟文思¹, 姚云峰¹, 郭月峰¹, 祁伟^{1,2}, 韩兆敏¹, 刘龙¹

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院, 呼和浩特 010020)

摘要: 为深入了解砒砂岩地区主要树种的水分利用特征, 以内蒙古圪塔沟小流域砒砂岩区水土保持科技示范区为研究区域, 运用茎热平衡法(SHB)对沙棘、柠条、油松3种主要树种蒸腾耗水进行研究, 监测3种树种的边材液流日变化及不同天气条件下的液流速率。结果表明: (1) 在生长期, 3种树种的液流速率均呈单峰曲线, 其到达峰值时间大体相同。 (2) 在晴天时, 沙棘的平均液流速率最高, 可达到0.117 72 cm/s, 而油松与柠条的液流速率相近, 3种树种的日平均流速分别为0.029 01, 0.018 15, 0.022 03 cm/s。 (3) 在不同天气条件下, 3种树种的边材液流速率变化规律均为晴天>阴天>雨天, 各树种达到峰值的时间也有所差异, 其规律亦为晴天>阴天>雨天。研究结果旨在为砒砂岩地区植物水分供求关系提供数据支撑, 为该地区生态恢复与环境治理提供理论依据。

关键词: 砒砂岩; 液流速率; 沙棘; 油松; 柠条

中图分类号: S715.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0203-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.032

Dynamic Variation of Sapwood Flow of Three Main Tree Species in a Soft Sand-rock Area

YUCHI Wensi¹, YAO Yunfeng¹, GUO Yuefeng¹, QI Wei^{1,2}, HAN Zhaomin¹, LIU Long¹

(1. College of Ecological Environment of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2. Inner Mongolia Water Resources and Hydropower Exploration and Design Institute, Hohhot 010020)

Abstract: To understand the water use character of main tree species in soft sand-rock area, three main tree species (*Caragana korshinskii* Kom, *Hippophae rhamnoides* Linn, *Pinus tabulaeformis*) in Geguigou, Ordos, Inner Mongolia was examined using stem heart balance method to explore sap flow of these three tree species under different weather conditions and the daily change. The results showed: (1) The sap flow rates of the three tree species showed a unimodal curve, and nearly reached the peak at the same time during growing. (2) In the sunny day, the sapflow rate of *Hippophae rhamnoides* Linn was the highest, about 0.117 72 cm/s, the sap flow rate of *Caragana korshinskii* Kom and *Pinus tabulaeformis* were similar; the daily average rates of the three species were 0.029 01 cm/s, 0.018 15 cm/s, and 0.022 03 cm/s, respectively. (3) In different weather conditions, the sapflow rates of the three species showed sunny day>cloudy day>rainy day, and the time when they reached the peak showed sunny day>cloudy day>rainy day. The results of the study are to provide theoretical basis for studying the water supply-demand relationship of plants in soft sand-rock area and environmental management.

Keywords: soft sandstone; sap flow rate; *Hippophae rhamnoides* Linn; *Pinus tabulaeformis*; *Caragana korshinskii* Kom

内蒙古砒砂岩地区是黄土高原乃至世界水土流失最为严重的地区之一^[1], 该地区土壤类型以风沙土和黄绵土为主, 其土壤结构、保水保肥性差, 极易发生水土流失^[2-3]。砒砂岩砂砾间胶结作用低, 无水时坚硬如石, 过度吸水又会松软如泥, 故植物难以生长, 是

影响该区生态恢复的最大难题^[4-5]。砒砂岩地区仅占黄土高原面积的2.6%, 但其产沙量却占黄土高原向黄河中上游输沙量的30%左右^[6-7], 这不仅对黄河下游造成严重的泥沙淤积现象, 还将引发一系列环境恶化问题^[8-9]。

收稿日期: 2017-04-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(31500584); 内蒙古自然科学基金项目(2016MS0407); 高等学校科学研究项目(NJZZ16055); 内蒙古应用研究与开发计划项目(20110732); 内蒙古自治区水利科研专项(NSK-2016-S17)

第一作者: 尉迟文思(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治。E-mail: 2041840093@qq.com

通信作者: 郭月峰(1982—), 女, 讲师, 博士, 主要从事水土保持与荒漠化防治领域的工作。E-mail: guoyuefeng0525@126.com

树木的蒸腾作用是指树木根系从土壤中吸收的水分,经由树干到达叶片,最后通过蒸腾作用散失到大气中。目前,有关树木蒸腾耗水特性的研究有较多方法^[10-11],国内外研究人员在不同尺度(叶片—单木—林分)上分别利用不同的方法对树木蒸腾耗水进行了大量研究,也取得不少的研究成果^[12]。

热扩散法是 1985 年由 Granier 发明的树木边材液流测定系统^[13-14],它是利用脉冲滞后效应为原理的热脉冲液流检测仪改进为利用双热电偶检测热耗散的热扩散液流探针,与其他测量系统相比有较显著的特点,可以进行长时间的连续监测或监测任意时间段的液流速率^[15]。还有研究表明,利用热技术茎流计监测树干液流发现,各种树种液流的日变化规律均呈单峰曲线,也有双峰或多峰曲线^[16-18]。赵娜娜等^[19]、李会等^[20]和林同保等^[21]利用热平衡包裹式茎流计对夏玉米分析发现,晴天液流速率日变化过程与太阳辐射日变化相似,呈单峰曲线,晚上维持在接近 0 的最低值;而闫业庆等^[22]对甘肃省宁会县夏玉米研究发现,在各种天气条件下其总体变化趋势呈“几”字形的多峰曲线。

本研究从砒砂岩地区植被蒸腾耗水特性方面进行研究,探讨砒砂岩地区植被特性与生态需水的关系。目前对于该地区植被耗水研究鲜有报道。为此,本研究运用茎热平衡方法(SHB)对该地区 3 种主要树种进行监测,预期判断植被在此环境下的生长状况,为后续的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡北部圪塔沟流域内(39°42′—39°50′N,110°25′—110°48′E),平均海拔 820~1 582 m,总面积约为 96 km²。流域内地形起伏较大,沟壑较多并且土壤侵蚀程度强,水土流失严重。该地区属于典型的中温带半干旱大陆性季风气候,四季分明,太阳辐射强烈,日照时间长,平均日照时数为 2 900~3 100 h。年均降水量约 400 mm,年均蒸发量约 2 093 mm,年平均气温为 6.2~8.7 ℃,年总辐射值为 143.4 kCal/m²。春季风力大、持续时间较长,年平均风速 3.2 m/s,最大风速为 32 m/s,年平均大风日数为 10~30 d。

土壤类型主要是黄绵土,区域内分布砒砂岩景观。砒砂岩区域主要为栗钙土和风沙土,以人工植被为主,主要造林树种为沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)和山杏(*Prunus sibirica*)等。

1.2 调查取样

试验于 2016 年 8 月在内蒙古鄂尔多斯市准格尔

旗圪塔沟流域的水土保持示范区内进行,选择立地条件基本一致,林龄为 4~5 a 生的混交林样地 3 块,样地面积均为 50 m×50 m。对各样地内所有研究树种进行常规测量后,分别于各样地选取 3 株标准株进行茎流速率的监测。

在晴天时,各树种茎流速率的采集:选取 15 个晴天,连续监测 24 h 数据的均值进行分析。

在阴天、雨天时,各树种茎流速率的采集:试验期间,各选取 3 个阴天和 3 个雨天,连续监测 12 h 数据的均值进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 茎流速率的测定 茎流模块 EMS62 用于测量细的茎秆或枝条的茎流量,测量直径约 8~16 mm,并配合 SF60 传感器使用。基于茎热平衡方法(SHB),在树木的蒸腾作用下,当各树种内的水分流过加热茎秆部位时,水分升温传递热量,通过插入的探针测量上升温度并记录每段时间间隔的数据。EMS62 的传感器有 2 种型号,分别是 8~12 mm 的小型传感器,12~16 mm 的大型传感器,茎秆的安装长度约 20 cm,传感器最长采集距离为 50 m。安装传感器时,应选择合适的茎秆位置,枝条至少 20 cm 长,安装前需清除粗糙的树皮、多余的树枝等。在树枝相应的位置用电钻钻孔,将热电偶固定到枝条上并将探针插入茎秆,最后用锡纸罩住整个传感器不受外界直接影响,减少系统误差。

本研究对树种的边材液流量进行自动连续监测,树种在不同高度和不同方向的液流量差异性较大,为了减少试验误差,统一测量各树种 1 m 处且边材厚度相近的南向的液流量。安装仪器时应刮出适当的小矩形,尽量避免损害活组织,将钻孔模块放在待测的位置上,选择适合树种的钻头(1.32 mm)钻 2 个 30 mm 深的孔,2 孔尽量保持平行,将长 30 mm、直径为 1.3 mm 的探头加热针分别插入上部孔和下部孔。本研究应选用 12~16 mm 的传感器,为了防止太阳辐射及其他外界因子对探针的影响,在安装好探头的外层包上铝箔,数据采集的时间制定为 30 min 内进行 4 次校准,且每 30 min 进行一次平均值的计算并记录数据。本试验对各树种进行连日连续监测,液流速率是指水分单位时间向上运输的速度。

边材液流速率计算公式为:

$$V_{SP} = 0.0119 \times K^{1.231}; \text{其中 } K = \frac{dT_M - dT}{dT}$$

式中: V_{SP} 为树种边材液流速率(cm/s), dTM 为 24 h (12 h)内上下探针的最大温差值(℃), dT 为某时刻瞬时温差(℃)。

1.3.2 数据分析 在进行分析不同天气条件下各树

种液流速率的变化前,为确保试验数据的价值及可靠性,应对采集数据的统计学特征进行分析,主要参数指标包括均值、极差、方差、标准差、标准误、变异系数、偏度系数及峰度系数。

极差用来描述个体值间差异变异范围,极差越大,样本变异范围越大,反之亦然,极差计算公式为:

$$\max\{x_i\}-\min\{x_i\} \quad (1\leq i\leq n)$$

方差(var)用来描述个体值间的变异,即观察值的离散度。方差较小则观察值围绕均数的波动较小;反之亦然。方差计算公式为:

$$\text{var}=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2$$

标准误(SE)描述统计量的抽样误差,即样本统计量与总体参数的接近程度。标准误小那么抽样误差小,则统计量较稳定并与参数较接近。标准误公式为:

$$SE=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}/\sqrt{n}$$

变异系数(CV)又称离散系数,反映统计量的变异程度,变异系数无单位,其计算公式为:

$$CV=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}/\bar{x}$$

正态分布的偏—峰度检验:正态分布的 2 个显著的特征为对称性和正态峰,反映这 2 个特征的统计量是偏度系数 γ_1 和峰度系数 γ_2 。 γ_1 反映频数分布的对称性, γ_2 反映频数分布的峰度,当总体分布为正态时,总体偏度、峰度系数均为 0,正偏态时大于 0,负偏态时小于 0;当数据大多集中于平均数附近时,形成高窄尖峭峰,总体峰度系数大于 0,当数据较为分散,形

成平坦宽阔峰时,总体峰度系数小于 0。 γ_1 和 γ_2 的计算公式为:

$$\gamma_1=\frac{E(X-E(X))^3}{\sigma_X^3}, \gamma_2=\frac{E(X-E(X))^4}{\sigma_X^4}$$

1.3.3 数据处理 利用 Excel 和 SPSS 13.0 统计软件对观测数据进行统计分析、差异显著性分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 不同树种边材液流量数据的可靠性检验

由于本试验均选择 4~5 a 生的标准株,故监测到各树种的边材液流量总体较小,其相对应的各参数指标极小。由表 1 可知,3 种树种的边材液流量方差均较小,即实测值围绕均值的波动较小;变异系数在 0.16~0.23,属弱变异。柠条的偏度系数为负值,其余 2 种树种的偏度系数均大于 0 且接近 1,峰度系数均接近 0,可认为 3 种树种的边材液流量接近正态分布,试验数据可靠。不同树种边材液流速率的均值相对差异较小,其中沙棘的液流速率最高,可达 0.036 99 cm/s,而柠条和油松液流速率的均值相近,分别为 0.021 07,0.021 93 cm/s,是因为 3 种树种相比之下,沙棘的生态幅较宽,在恶劣的环境中适应性更强,易存活,故监测到沙棘的液流速率均高于油松和柠条。柠条的偏度系数为-0.267 13,而沙棘和油松的偏度系数为分别为 0.618 32,0.716 53,由此可知,3 种树种的液流速率近似符合正态分布。柠条的液流量到达峰值的时间晚于沙棘和油松,是因为柠条的液流量相对较小,且比同年生油松的内环境能量转化缓慢,故其边材液流量到达峰值的时间相对滞后。

表 1 各树种边材液流量的比较

植被类型	样本容量	均值/ (cm·s ⁻¹)	极差/ (cm·s ⁻¹)	方差	标准差/ (cm·s ⁻¹)	标准误/ (cm·s ⁻¹)	变异系数	偏度系数	峰度系数
沙棘	21	0.03699a	0.07906	0.00005	0.00842	0.00606	0.23	0.61832	0.00016
柠条	21	0.02107b	0.04290	0.00003	0.00483	0.00342	0.16	-0.26713	0.00002
油松	21	0.02193b	0.04113	0.00003	0.00447	0.00316	0.20	0.71653	0.00002

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

2.2 不同树种边材液流速率的日变化规律

监测同一天气条件下不同树种的边材液流量进行分析比较,可以观察出树种之间的耗水规律、耗水能力及其在环境中存在的差异,进而了解不同树种的耗水特性。分别在晴天、阴天、雨天的天气条件下测定 3 种树种的液流速率。

由图 1 可知,3 种树种边材液流速率的日变化均成单峰型曲线,达到峰值时有明显的拐点,且液流速率较高,3 种树种在 11:30-12:30 时均达到峰值。在连续 15 个观测日中,沙棘的液流速率最高可达到 0.121 53 cm/s,平均峰值为 0.117 72 cm/s,日平均液流速率为 0.029 01 cm/s,到达峰值后其下降速率

相对上升速率较为缓慢,且具有明显波动;油松的液流速率上升较为迅速,速率最高可达到 0.071 65 cm/s,平均峰值为 0.060 14 cm/s,日平均液流速率为 0.018 15 cm/s,到达峰值后其速率下降相对缓慢;柠条的边材液流速率最高可达到 0.068 90 cm/s,平均峰值为 0.063 48 cm/s,日平均液流速率为 0.022 03 cm/s。从总体来看,沙棘的液流速率均高于油松和柠条的速率,而油松和柠条液流速率的峰值相近,在峰值附近均有较小的波动。3 种树种的启动流速与截止流速的液流量相近,且在每天的 5:30 左右都有明显的起伏,而在夜间也能监测到少量的液流量,其值均接近于 0。

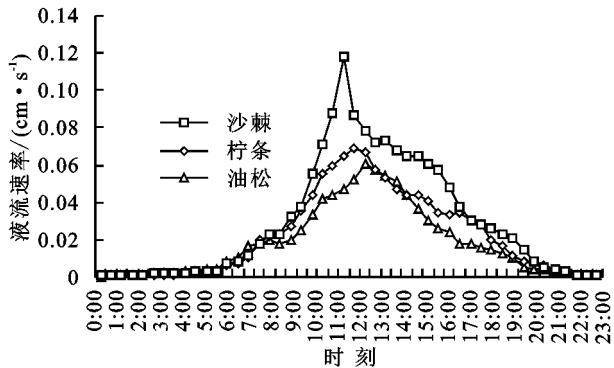


图 1 3 种树种在晴天的液流速率日变化

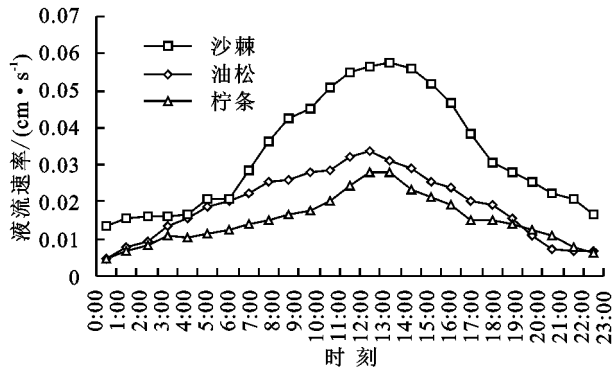


图 3 3 种树种在雨天的液流速率日变化

由图 2 可知,3 种树种在阴天的液流速率变化规律亦呈单峰曲线,接近峰值时的液流速率相差较小,无明显的拐点特征。3 种树种的速率变化在上升到达峰值及从峰值开始下降的变化规律起伏程度较小,在 11:30—13:30 时均达到峰值。沙棘的平均峰值为 0.092 28 cm/s,日平均液流速率为 0.048 86 cm/s;油松的平均峰值为 0.050 72 cm/s,日平均液流速率为 0.028 35 cm/s;柠条的平均峰值为 0.052 47 cm/s,日平均液流速率为 0.026 21 cm/s。从总体来看,在监测的启动时间和截止时间,3 种树种的液流速率大体相近,沙棘的液流速率变化均高于油松和柠条。

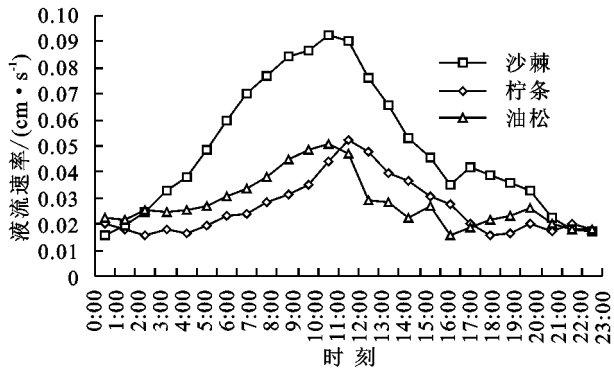


图 2 3 种树种在阴天的液流速率日变化

由图 3 可知,3 种树种在雨天的液流速率变化规律近似呈单峰曲线,相对于晴天、阴天的速率变化曲线较为圆滑,无明显的拐点特征。3 种树种的速率变化无明显峰值,在 13:30—14:30 时均达到最大值。沙棘的平均峰值为 0.057 41 cm/s,日平均液流速率为 0.033 10 cm/s;油松的平均峰值为 0.033 84 cm/s,日平均液流速率为 0.019 28 cm/s;柠条的平均峰值为 0.028 09 cm/s,日平均液流速率为 0.014 97 cm/s。从总体来看,在监测时间内,3 种树种在启动时间和截止时间的液流速率相差较大,沙棘的速率变化亦高于油松和柠条。3 种树种在不同天气条件下的液流速率均逐渐降低,且到达峰值的时间也随着天气的不同向后推移。

2.3 典型天气条件下不同树种边材液流速率的变化规律

在不同天气条件下各树种的边材液流特征差异较大。在 3 种树种的最佳生长时期内,选取典型的晴天、阴天、雨天分析各树种边材液流的日变化。由图 4、图 5、图 6 可知,在不同天气条件下,沙棘、油松、柠条 3 种树种的边材液流速率总体规律为晴天>阴天>雨天,沙棘和油松的相对峰值较为明显,而油松和柠条的启动液流速率相差较大。在不同的天气状况下,峰值大小也存在着较大的差异,晴天时蒸腾快,峰值最大,分别为 0.166 75,0.070 90,0.060 90 cm/s,日平均流速最大,分别为 0.069 44,0.036 93,0.035 79 cm/s;阴天次之,峰值分别为 0.092 28,0.050 72,0.052 47 cm/s,日平均流速分别为 0.048 66,0.028 35,0.026 21 cm/s;雨天的启动流速最低,蒸腾最慢,峰值最小,分别为 0.056 25,0.033 84,0.028 09 cm/s,日平均流速最小,分别为 0.033 10,0.019 28,0.014 97 cm/s。从树种之间比较可以看出,在相同天气条件下,沙棘的液流速率均为最高,具有明显的起伏变化,油松次之,柠条的液流速率最低。随着天气的不同,3 种树种到达峰值的时间也大不相同,分别为晴天>阴天>雨天。从不同天气监测的启动时间和截止时间来看,沙棘在 3 种天气下的启动流速和截止流速的值相近,而油松和柠条的启动流速和截止流速却有较大差异。

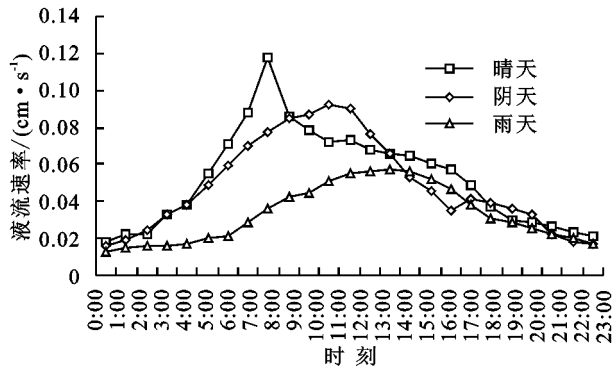


图 4 沙棘边材液流速率与天气的关系

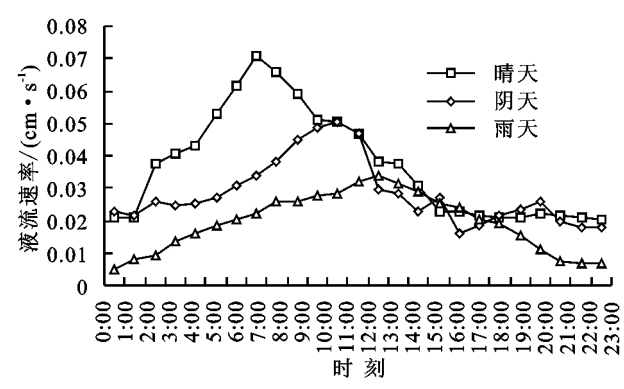


图 5 油松边材液流速率与天气的关系

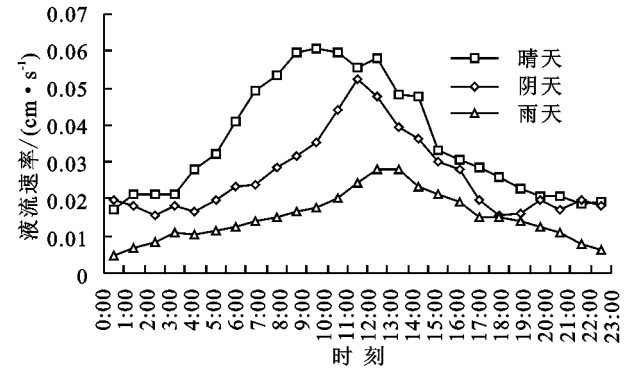


图 6 柠条边材液流速率与天气的关系

3 讨论

在测定各树种液流速率的过程中,仪器的安装方向及高度、探针的安插深度,都是影响本试验的外在因素。据以上分析可知,在监测过程中,标准株在相同环境下会有较小的偏差,对于难以避免的误差应尽可能的减少其影响程度。树种茎干的液流量不仅是由自身的生理特性决定的,还与其导水组织结构和边材厚度有关。精确测定各树种液流速率的空间变化十分复杂,因为树种的液流量与周围的小环境以及土壤供水能力密切相关,其周围的环境因子也有较大的影响,它们之间相互制约,有较明显的内在联系,每种因子的变化都有一定的规律,所以应当进一步控制试验的外在变量,定量分析每种因子的影响程度以及各树种自生的生长参数,以便更精准的模拟出不同树种的边材液流变化。

在同一天气条件下,3 种树种的变化规律大体相同。晴天时液流速率的峰值明显,且均高于阴天和雨天,晴天的相对温度较高,蒸腾速率加快,增大了各树种的液流量,而在夜间也能监测到较低的液流速率。这与赵娜娜等^[19]、李会等^[20]和林同保等^[21]研究结果一致,是因为树种在白天蒸腾耗水量过多,到夜间时,土壤水势较高,主动地向各树种运输水分,用于补充在白天消耗的大量水分。在阴天的条件下,3 种树种的液流速率变化规律的波动程度均高于晴天和雨天,是因为在阴天时的温度相对并不稳定,受不同时间段的影响程度小,各树种的液流速率主要与各时间段的

温度及蒸发等因子有关。3 种树种在阴天和雨天的速率变化曲线趋近于“几”字形曲线,这与闫业庆等^[22]研究结果相符,若适当多进行不同天气的重复,会有较明显的变化趋势。

观察 3 种树种在不同天气条件下的速率变化规律可知,不同的天气对不同树种的液流速率变化均有较大的影响,到达峰值的时间与速率均符合逻辑。在观测不同天气下树种的液流速率时还可以发现,到达峰值前的液流速率变化迅速而峰值后的变化速率相对缓慢,也是由于在白天时,气温上升较快,而午后温度的变化相对平稳,逐渐降低,但阴天和雨天的变化趋势并不明显。由于天气的不同,各树种在监测起始时间(7:30)的液流速率也存在着较明显的差异,由此分析可得,植被液流速率受温度的影响较大,需对环境因子进一步研究分析。

从总体来看,沙棘的液流速率均高于油松和柠条,若可以监测到 3 种树种在雨天和阴天的 24 h 液流速率,可以完善与晴天 24 h 液流速率的比较,更进一步发现不同天气对不同树种液流速率的变化规律。便于更精准的观测各树种的耗水特性规律,为砒砂岩地区的水土流失治理、生态恢复及农业生产提供科学依据,也为当地进行水土保持治理工作提供理论参考。

4 结论

(1)通过以上分析可以看出,3 种树种的边材液流速率大体均呈单峰曲线,在同一天气条件下,到达峰值的时间相近但液流速率有较大的差异,沙棘的蒸腾耗水量最快,油松和柠条的蒸腾量相对较慢。在晴天时 3 种树种的日平均流速分别为 0.029 01,0.018 15,0.022 03 cm/s,平均峰值分别为 0.117 72,0.060 14,0.063 48 cm/s;在阴天的日平均流速分别为 0.048 86,0.028 35,0.026 21 cm/s,平均峰值分别为 0.092 28,0.050 72,0.052 47 cm/s;在雨天的日平均流速分别为 0.033 10,0.019 28,0.014 97 cm/s,平均峰值分别为 0.057 41,0.033 84,0.028 09 cm/s。

(2)在不同的天气状况下,3 种树种的液流速率虽呈单峰曲线,但各植被达到峰值所用时间及液流速率差异较大,总体规律均为晴天>阴天>雨天。在不同天气条件下,到达峰值的时间差距均为 1~2 h,且沙棘启动流速与截止流速的值相近,而油松和柠条有较大的差异。对于同一天气条件下的各树种边材液流速率变化规律大致相同,但同一树种在不同天气条件下的液流速率变化却有明显的差异性。