

DOI: 10.5846/stxb202112173581

李永明, 王丽洁, 荐圣洪. 黄土高原丘陵沟壑区柠条和沙棘树干液流的变化特征. 生态学报, 2023, 43(4): 1553-1562.

Bo Y M, Wang L J, Jian S Q. Variations of sap flow of *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* in hilly and gully region of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1553-1562.

黄土高原丘陵沟壑区柠条和沙棘树干液流的变化特征

李永明¹, 王丽洁¹, 荐圣洪^{2,*}

1 定西市水土保持科学研究所, 定西 743000

2 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001

摘要:近年来为防治黄土高原水土流失,我国政府开展了一系列的植被恢复工作。了解造林植被水分利用策略,对于在干旱半干旱黄土高原地区开展有效的植被恢复至关重要。以黄土高原甘肃省定西市安家沟小流域为研究区,选取黄土高原大规模植树造林灌木柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为研究对象,利用包裹式液流计于2020年6—9月对柠条和沙棘树干和枝条的液流进行观测,研究柠条和沙棘树干液流密度的日内与年内变化,以及与环境要素的关系。结果表明,柠条与沙棘的液流密度日内变化规律与光合有效辐射(Q_0)、饱和水汽压差(D_s)变化趋势一致。液流密度对环境要素的响应不同,在8月份,柠条和沙棘液流密度受 D_s 、 Q_0 和气温(T_a)的影响较大,其中, D_s 占主导地位。在其他月份,液流密度主要受 D_s 、 Q_0 的影响较大。当柠条与沙棘经历了长期干旱无雨的条件下,土壤含水量对树干液流的影响较大, D_s 和 Q_0 已不再是影响树干液流密度的主要因素。在降雨过后的阴天,树干液流仍保持较大的密度,这是由于在半干旱地区植被生长长期受土壤水分胁迫,降雨补给土壤水分,对树干液流密度存在脉冲效应。

关键词:树干液流;气象因子;柠条;沙棘;黄土高原

Variations of sap flow of *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* in hilly and gully region of the Loess Plateau

BO Yongming¹, WANG Lijie¹, JIAN Shengqi^{2,*}

1 Research Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi 743000, China

2 College of Water Conservancy Science & Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: In recent years, the Chinese government has carried out a series of vegetation restoration work to prevent soil erosion on the Loess Plateau. Understanding the water use strategy of afforestation vegetation is very important for effective vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau region. However, unreasonable afforestation activities cause damage to soil moisture environment, resulting in low survival rate, low preservation rate and low comprehensive benefit of vegetation. The key to the problem lies in the use of water consumption strategy in the process of vegetation restoration. In this study, *Caragana Korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* were selected as the research objects for large-scale afforestation in Anjiagou small watershed of Dingxi City, Gansu Province. We measured sap flow in the branches and stems of shrubs using sap flow gauges (Flow32, Dynamax Inc., Houston, TX, USA), and studied the response of sap flow density to the environment factors. The results showed that the effect of rainfall on water content in 10 cm soil layer was more obvious than that in the other three soil layers. Soil water content and coefficient of variation were relatively low in deeper layers. The soil water content in 10 cm soil layer responded to rainfall events with accumulated rainfall over 10—12 mm in 3—5 days. For the soil depth of 20, 30, 40 cm and 50 cm, a single rainfall less than 10 mm had little effect on soil water

基金项目: 河南省自然科学基金项目(212300410413); 定西市科技计划项目(DX2020N12)

收稿日期: 2021-12-17; 网络出版日期: 2022-10-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiansq@zzu.edu.cn

content. The average daily sap flow densities of *C. korshinskii* and *H. rhamnoides* were $1553 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and $1760 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectively. In most cases, higher sap flow densities were consistent with higher values for Q_0 and D_z . For example, on 30th June and 15th July, the sap flow densities of *C. korshinskii* and *H. rhamnoides* were 3129.88 and $2772.81 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and 3264.04 and $3234.32 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectively. For example, on 14th June and 5th September, the sap flow densities of *C. korshinskii* and *H. rhamnoides* were 923.11 , $1140.24 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and 552.15 , $571.24 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectively. In the period of rainfall, the decrease range of sap flow densities becomes higher. There were different responses of sap flow density to weather conditions. Sap flow density in *C. korshinskii* and *H. rhamnoides* was the result of the vapour pressure deficit, photosynthetically active radiation and air temperature in August, and the sap flow density mainly depended on the vapour pressure deficit. But the sap flow density was the result of the vapour pressure deficit and photosynthetically active radiation in other months. When *C. korshinskii* and *H. rhamnoides* experienced long-term drought and no rain, soil moisture content had a great influence on sap flow, and D_z and Q_0 were no longer the main factors affecting sap flow density. On cloudy days after rainfall, sap flow still maintained a large density, which was due to the long-term soil water stress of vegetation growth in semi-arid areas. Rainfall enhanced soil water and had a pulse effect on sap flow density. The density of sap flow of *H. rhamnoides* is higher than that of *C. korshinskii*, which reflects that *H. rhamnoides* consumes more water under the same rainfall condition. As for the two shrubs, *C. korshinskii* has more advantages in vegetation restoration on the Loess Plateau. This study can provide necessary scientific basis for vegetation restoration on the Loess Plateau.

Key Words: sap flow; environmental factors; *C. korshinskii*; *H. rhamnoides*; the Loess Plateau

近年来随着世界范围内水资源危机和荒漠化的加剧,研究区域植被水资源利用显得尤为重要。半干旱地区人工灌木生长所需水量和合理的水资源承载力已成为半干旱地区植物健康发展和管理的一个重要课题。黄土高原水土流失严重,我国政府为防治水土流失开展了一系列的植被恢复与重建工作。但是不合理的植树造林活动对土壤水分环境造成难以恢复的破坏,导致植被的成活率低、保存率低和综合效益低。问题的关键在于植被恢复过程中的用耗水策略依然没有答案^[1]。近年来,研究人员开始使用大型蒸渗仪研究自然条件下植物的需水量^[2-3],但植被的根系生长受到了限制,所得到的植被需水量可能与自然条件下存在差异。此外,大型蒸渗仪无法将植物蒸腾作用与土壤蒸发分开。20 世纪 90 年代植被液流观测仪器问世以来,通过完整植物茎干进行树干液流测量已成为植被蒸腾研究的常规组成部分^[4-6]。Smith 和 Allen^[7]综述了多种液流观测方法的理论基础,研究中主张根据不同的植被特点选择特定适合的观测方法。本研究依据研究植被柠条 (*Caragana Korshinskii*) 和沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 的冠层特点,选用 Sakuratani^[8]、Shao 等^[9]开发的热平衡方法,该方法非常适合于直径较小的茎干,并且能够在复杂多变环境条件下,在野外连续测量植被单个组成部分的液流密度。大量研究证实了热平衡方法对于植被液流的观测具有较好的准确性^[10-12]。

已有大量研究对植被的树干液流密度进行研究,探讨了多时间尺度下树干液流密度与环境要素之间的关系。但相关研究主要集中在乔木物种,对灌木的相关研究相对较少。灌木是半干旱黄土高原生态系统中具有代表性的植物功能类型。Wang 等^[13]研究表明,黄土高原地区柠条的树干液流与光合有效辐射、饱和水汽压差和相对湿度呈显著正相关关系。Fang 等^[14]指出,沙棘的树干液流在不同时间尺度上的主要影响因素不同,小时尺度上主要受饱和水汽压差的影响,日尺度上的主导因素为土壤水分。大部分研究均为分茎级进行液流观测,没有对冠层的树干和枝条进行有针对性的观测,比较冠层不同位置树干液流特征。

黄土高原饱受土壤侵蚀、植被退化和荒漠化等问题的困扰^[15]。为了克服这些问题,我国政府实施了大规模的植被恢复工作^[16]。柠条和沙棘作为黄土高原的优势物种,被广泛用于植被恢复。然而,最初简单的人工植被系统已经发展成为一个更复杂的人工自然生态系统,因此水分供需的不平衡现象变得更加复杂^[17-18]。鉴于此,有必要研究柠条和沙棘的树干液流特征,评估植被恢复对水资源的影响。本研究旨在(1)评估柠条和沙棘不同冠层位置的树干液流变化特征;(2)确定柠条和沙棘树干液流密度与环境因子之间的关系。为黄土高原植被恢复提供必要的科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

安家沟小流域为祖厉河流域一级支流关川河流域的二级支沟(35°35′N,104°39′E),流域面积 8.6 km² (图 1)。安家沟小流域年平均降水量为 420 mm,季节变化较大,7—9 月的降雨超过全年降水量的 60%。月平均气温范围为-7.4—27.5℃,年平均温度为 6.3℃,年平均蒸发皿蒸发量为 1510 mm,太阳辐射 161.46 W/m²,无霜期为 160 d。地下水位平均深度在 50 m 以上,典型黄土质地均匀,渗透性中等^[19]。1 m 土壤剖面平均容重为 1.29 g/cm³,田间持水量为 17.10% (质量百分比),凋萎含水量为 5.16%(质量百分比)^[20]。研究区土地利用包括农田、草地、人工灌丛和林地。试验于 2020 年 6—9 月在安家沟小流域柠条和沙棘人工林中进行。在研究区内选取具有代表性的柠条和沙棘样方各一个,尺寸为 100 m×100 m。表 1 展示了柠条和沙棘样地的基本情况,图 2 为柠条和沙棘的冠层特征。

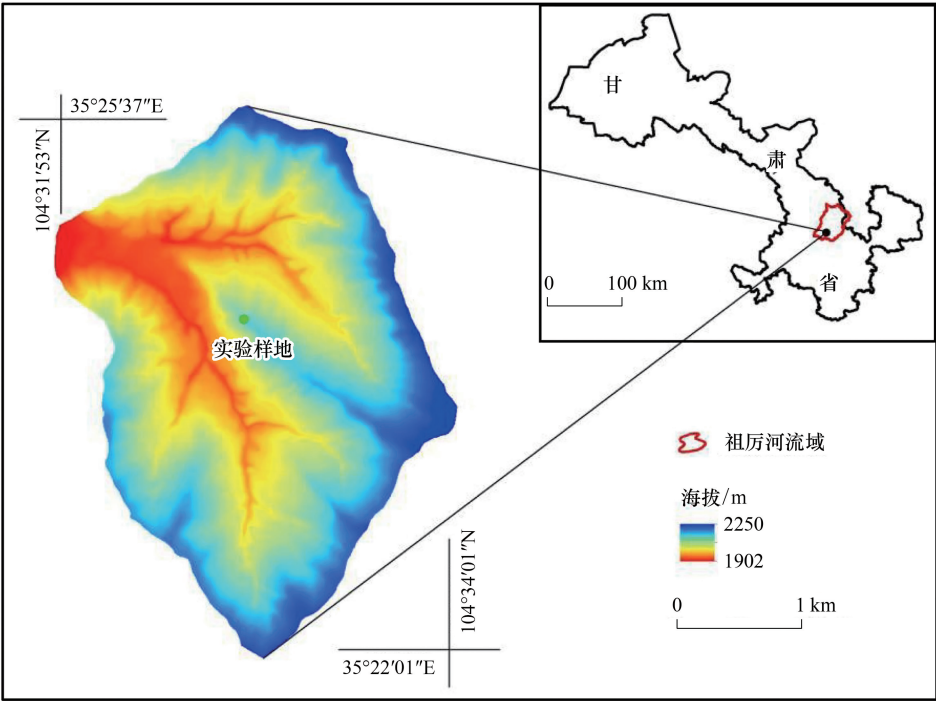


图 1 研究区相对位置图
Fig.1 Study area

表 1 安家沟流域柠条和沙棘样地基本特征

Table 1 A brief view of sample areas of survey for <i>C. korshinskii</i> and <i>H. rhamnoides</i> plantations in the Anjiagou catchment				
	参数 Parameters	样本数量 Sampling numbers	平均值±标准差 Mean±SD	
			柠条 <i>C. korshinskii</i>	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>
生物参数 Biological parameters	植被高度/mm	80	1700±110	191±17
	基径/mm	150	15.1±2.1	1.67±0.33
	冠层投影/m ²	50	3.02±0.44	3.54±0.21
	叶面积指数	320	1.04±0.09, 1.58±0.22, 2.15±0.16, 2.16±0.15	0.93±0.12, 1.15±0.17 1.87±0.21, 2.15±0.20
土壤参数 Soil parameters	黏粒(< 0.002 mm)/%	3	9.17±1.20	11.04±2.3
	粉粒(0.05—0.002 mm)/%	3	75.59±9.21	76.69±11.34
	砂粒(0.05—2 mm)/%	3	15.24±1.16	12.27±2.81
	有机质/%	3	0.68±0.08	0.71±0.04
	pH	3	8.1±0.94	7.9±0.75



图2 柠条和沙棘照片

Fig.2 Photographs showing the two shrubs of *C. korshinskii* and *H. rhamnoides* in the study

1.2 环境要素

在距离试验样地约 100 m 处的开放区域安装了一架气象塔。观测的气候要素包括土壤含水量 (S_w)、风速 (W_s)、气温 (T_a)、相对湿度 (R_h)、光合有效辐射 (Q_0)、降雨量 (P) 和大气压 (D)。上述气象要素利用 AG1000 自动气象站 (Onset Computer Corporation, Pocasset, MA, USA) 进行观测。降雨利用翻斗式雨量计测定 (model TE525, metric; Texas Electronics, Dallas, TX); 先前的研究表明, 该地区柠条和沙棘的细根主要集中在 0—40 cm^[21], 因此, 土壤水分传感器 (Decagon Devices, Pullman, WA, USA) 安装在土壤表面以下 4 个深度 (10、20、30 cm 和 40 cm)。气象数据与土壤水分以 10 Hz 的频率测量, 并使用 CR1000 数据采集器 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT) 每 5 min 记录一次, 然后存储为 30 min 的平均数据, 降雨和风速数据每 10 min 记录一次。土壤含水量每 2 d 利用烘干法测定一次, 对器测土壤水分进行校验。坡度和坡向利用罗盘进行测定; 叶面积指数利用冠层分析仪 (LAI2000, LI—COR, USA) 于 6 月 14 日、7 月 15 日、8 月 15 日和 9 月 14 日分别进行测定; 土壤有机质利用重铬酸钾氧化法测定; 利用电位法测定 pH 值; 粒径组成利用沉淀法测定。土壤性质均为 1 m 土层。

1.3 树干液流

利用包裹式液流计 (Flow32, Dynamax Inc., Houston, TX, USA) 测定柠条和沙棘的树干液流。在试验期间, 选择没有横向分枝的柠条和沙棘枝和茎, 并使用刀片平滑它们以去除表面的树皮糙点。为了确定环境对物种和物种内位置 (枝和茎) 液流差异的影响, 根据灌木的特点, 对柠条茎采用 SGB16 型传感器, 对其枝条采用 SGB19 型传感器。对于沙棘利用 SGB13 型传感器测量茎的液流, 利用 SGB19 型传感器测量枝条液流, 在同一植株个体上每个位置进行三次重复测量。同时, 柠条和沙棘各选取 3 株植被。表 2 给出了供试样本的基本特征。根据 Yue 等^[18] 描述的液流测量方法, 试验期间本研究对植被表面进行了打磨, 并在传感器和树皮之间涂抹了一层 G4 硅脂, 并用铝箔包裹传感器, 以防止雨水和太阳直接照射, 从而减少额外热梯度的影响, 接缝处用蜡密封, 以防止水从树枝流向传感器。利用 CR1000 数据采集器 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA) 每隔 10 s 记录 1 次数据, 储为 30 min 的平均数据。

本研究利用 Kigalu^[22] 描述的热平衡基础知识计算树干液流密度。能量平衡方程为:

$$Q_f = P_{in} - Q_{cd} - Q_r + Q_s \quad (1)$$

式中, Q_f 为液流传递的热量 (W); P_{in} 加热器热量输入 (W); Q_{cd} 为热传导损失 (W); Q_r 为径向导热损失 (W); Q_s 为枝茎存储的热量 (W)。

液流密度 ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) 通过液流传感器的能量平衡计算得出:

$$F = \frac{P_{in} - Q_{cd} - Q_r + Q_s}{C_s \times dT_{sap}} \quad (2)$$

式中, F 为液流密度($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$); C_s 为液流或水的比热容($4.186 \text{ J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$); dT_{sap} 为加热器与枝茎之间的温度差($^{\circ}\text{C}$)。每小时液流密度之和为日液流密度。

表 2 用于液流观测的植被样本特征 (平均值±标准差, $n=9$)

Table 2 Diameters of the sample shrubs used for the sap flow measurements (Mean±SD, $n=9$)				
传感器型号 Gauge type	柠条 <i>C. korshinskii</i>		沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	
	SGB16 (茎)	SGB19 (枝条)	SGB13 (茎)	SGB19 (枝条)
直径 Diameter/mm	15.91±0.20	19.11±0.19	13.51±0.48	19.54±0.32

SGB: 液流传感器 Sap flow gauge

1.4 数据分析

通过逐步多元回归分析,确定柠条和沙棘树干液流密度日变化与环境因子 (S_w 、 Q_0 、 D_z 和潜在蒸散量 (ET_0)) 的关系。 ET_0 利用彭曼公式进行计算。所有统计分析均使用 SPSS 18.0 版本 (IBM, 美国) 进行处理。回归方程在 Sigma Plot 11.0 版本 (Systat Software, Chicago, Illinois, USA) 中进行。对于所有测试使用 $P<0.05$ 的显著性水平。

2 结果与分析

2.1 土壤水分

试验期间共发生降雨事件 36 次,总降雨量 268 mm,平均降雨量 7.4 mm,单个降雨事件变化范围为 0.1—27.3 mm。0—10 cm 土壤水分含量最高,随降雨量增加波动显著,柠条和沙棘的土壤水分变异系数分别为 40.2% 和 44.5%。降雨对 10 cm 土层含水量的影响比其他 3 个土层深度更明显。较深土层的土壤含水量和变异系数相对较低 (图 3)。10 cm 土层的土壤含水量对 3—5 d 累计降雨量超过 10—12 mm 的降雨事件有响应。对于 20、30、40 cm 和 50 cm 的土层深度,小于 10 mm 的单次降雨对土壤含水量影响不大 (图 3)。

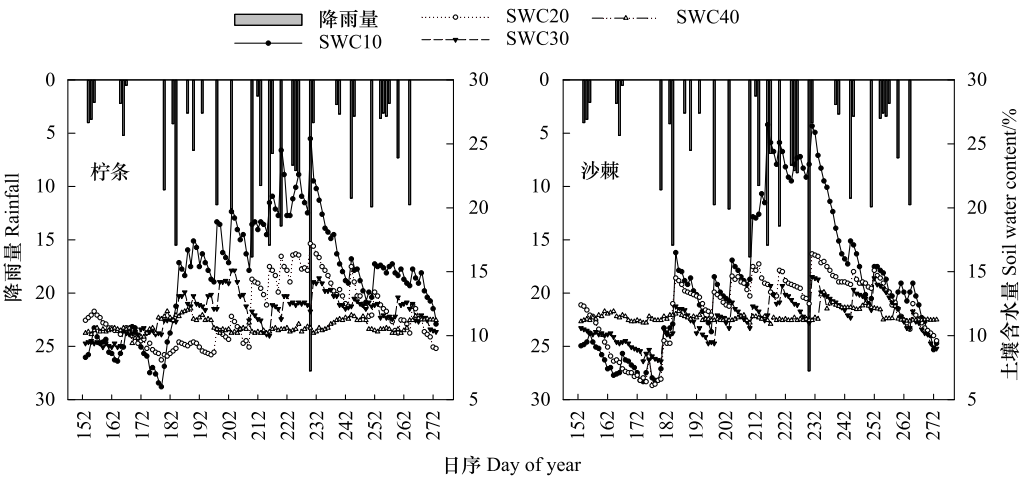


图 3 降雨与土壤水分的动态变化特征

Fig.3 The dynamic variation of rainfall and soil water content

SWC: 土壤水分含量 Soil water content; SWC10、SWC20、SWC30 与 SWC40 分别为土层深度 10、20、30 cm 和 40 cm 土层深度下的土壤水分

2.2 液流密度的日内变化

Q_0 和 D_z 与树干液流密度的日变化趋势相同,可见柠条和沙棘的树干液流密度受 Q_0 和 D_z 的影响较大 (图 4)。树干液流密度大小受枝茎直径影响,较粗的枝条具有较大的液流密度。

2.3 液流密度的年内变化

试验期间,柠条和沙棘的日平均液流密度分别为 $1553 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $1760 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。在大多数情况下,较

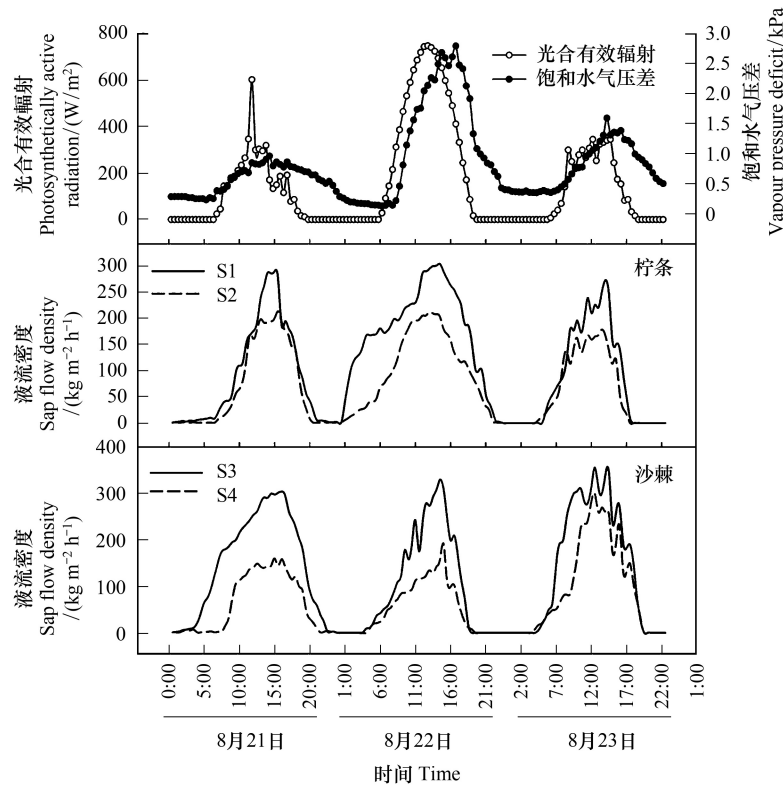


图4 气象要素与不同传感器观测的液流密度变化趋势

Fig.4 Meteorological factors and sap flow density observed by and different sensors

S1 与 S3 对应的传感器为 SGB19, S2 对应传感器为 SGB16, S4 对应的传感器为 SGB13. SGB: 液流传感器 Sap flow gauge

高的树干液流密度与 Q_0 和 D_z 的较高值相吻合 (图 5)。例如, 6 月 30 日和 7 月 15 日, 柠条和沙棘的液流密度分别为 3129.88 、 $2772.81 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 3264.04 、 $3234.32 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。由于阴天的缘故, 蒸腾需求量低, 例如, 6 月 14 日和 9 月 5 日, 柠条和沙棘的液流速度分别为 923.11 、 $1140.24 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 552.15 、 $571.24 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。在发生降雨时段内, 液流速度下降幅度变大, 例如, 7 月 11 日, 突发性降水发生在潮湿多云的天气条件下, 柠条和沙棘的液流速度分别为 $880.04 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $1073.43 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。同样, 8 月 17 日和 9 月 20 日的连续降雨抑制了树干液流速率。然而, 在 6 月 28 日、7 月 21 日和 8 月 18 日等阴雨天, 树干液流密度相对较高。6 月中下旬经历了 12 d 的干燥期, 尽管日照条件较好, Q_0 保持较高值, 但是柠条和沙棘的树干液流密度仍然较低 (图 5)。

2.4 树干液流密度与环境因子

柠条和沙棘树干液流密度主要受 Q_0 (柠条, $R^2=0.799-0.847$; 沙棘, $R^2=0.806-0.855$), D_z (柠条, $R^2=0.467-0.755$; 沙棘, $R^2=0.381-0.793$), T_a (柠条, $R^2=0.465-0.672$; 沙棘, $R^2=0.394-0.505$), S_w (柠条, $R^2=0.306-0.505$; 沙棘, $R^2=0.347-0.512$) 和 ET_0 (柠条, $R^2=0.206-0.453$; 沙棘, $R^2=0.215-0.342$) 等环境因素影响 (表 3)。采用逐步回归法 (表 4), 对柠条和沙棘每月的树干液流密度 (SF) 与 D_z 、 Q_0 、 T_a 、 S_w 和 ET_0 进行多元线性回归分析。结果表明, 在 8 月份, 柠条和沙棘的树干液流密度主要受 D_z 、 Q_0 和 T_a 的影响, 树干液流主要依赖于 D_z 。但在其他月份树干液流主要受 D_z 和 Q_0 的影响。

3 讨论

3.1 树干液流密度变化

本研究柠条和沙棘的树干液流密度在日间变化较大, 呈多峰型曲线。由于日间蒸腾耗水需求量较大,

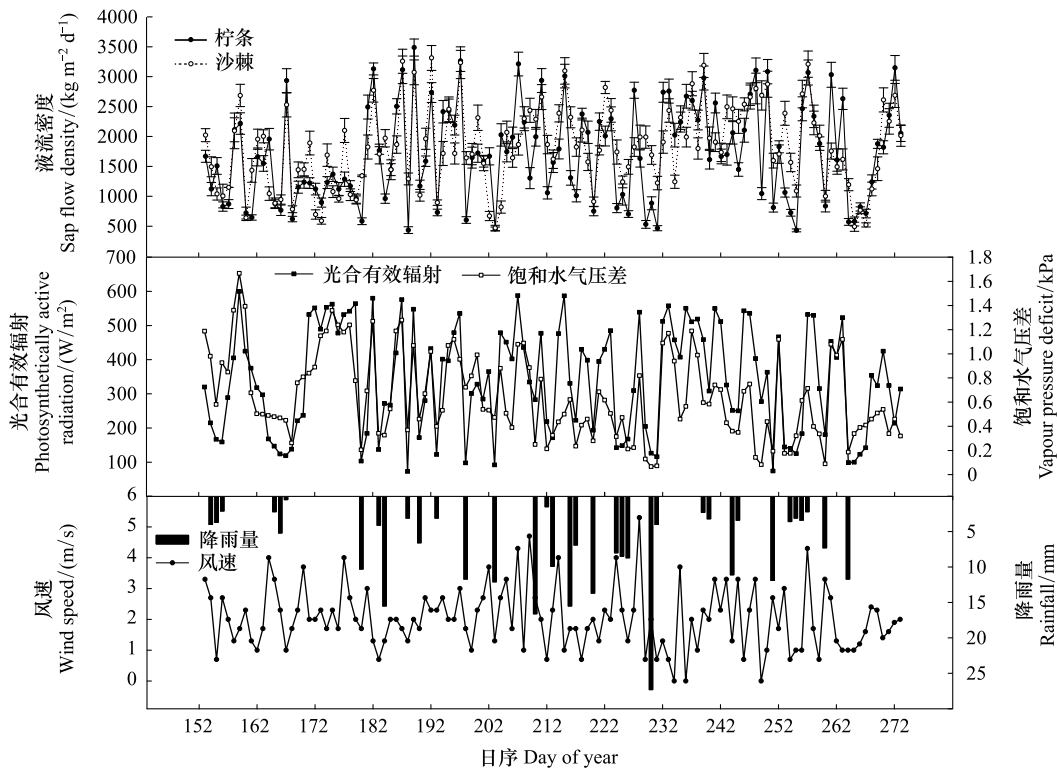


图5 试验期间柠条和沙棘液流变化特征(数据=平均值±标准差)

Fig.5 Daily values for sap velocity during whole experiment period(Data represent the mean±SD)

表3 2020年6—9月柠条和沙棘树干液流密度与环境因素的相关关系

Table 3 Partially adjusted coefficients of determination between sap flow and significant environmental factors in June, July, August, and September 2020

环境要素 Environment factors	相关性 与显著性 Partial coefficient and significance	月份 Month			
		6	7	8	9
柠条 <i>C. korshinskii</i>					
Q_0	R^2	0.847	0.804	0.799	0.816
	P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
D_z	R^2	0.467	0.587	0.581	0.755
	P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
T_a	R^2	0.514	0.465	0.672	0.582
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
S_w	R^2	0.505	0.306	0.415	0.426
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ET_0	R^2	0.206	0.453	0.336	0.240
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>					
Q_0	R^2	0.855	0.822	0.806	0.841
	P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
D_z	R^2	0.381	0.591	0.604	0.793
	P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
T_a	R^2	0.505	0.419	0.424	0.394
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
S_w	R^2	0.487	0.512	0.375	0.347
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ET_0	R^2	0.215	0.311	0.342	0.308
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

D_z : 饱和水汽压差 Vapour pressure deficit; Q_0 : 光合有效辐射 Photosynthetically active radiation; T_a : 气温 Air temperature; S_w : 0—100 cm 的土壤水分 Soil water content of 0—100 cm; ET_0 : 潜在蒸散发 Potential evapotranspiration. 样本数量为 732

表 4 柠条和沙棘树干液流密度与环境因素多元逐步回归分析

Table 4 The multiple linear correlation equations between daily sap flow density and environmental factors in each month (1st June—30th September 2020) for *C. korshinskii* and *H. rhamnoides*

物种 Species	月份 Month	回归方程 Regression equations	R^2	F	样本数 Sampled numbers
柠条 <i>C. korshinskii</i>	6	$SF = 2.034 + 0.502 D_z + 1.345 \times 10^{-3} Q_0$	0.806	60.234	90
	7	$SF = 2.037 + 0.366 D_z + 1.215 \times 10^{-3} Q_0$	0.824	55.122	93
	8	$SF = 3.345 + 0.157 D_z + 1.005 \times 10^{-3} Q_0 - 8.64 \times 10^{-2} T_a$	0.836	50.475	93
	9	$SF = 1.976 + 0.119 D_z + 2.304 \times 10^{-3} Q_0$	0.791	63.120	90
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	6	$SF = 0.543 + 0.621 D_z + 1.522 \times 10^{-3} Q_0$	0.778	59.123	90
	7	$SF = 1.132 + 0.843 D_z + 2.573 \times 10^{-3} Q_0$	0.812	73.271	93
	8	$SF = 2.188 + 0.331 D_z + 1.324 \times 10^{-3} Q_0 - 1.231 \times 10^{-2} T_a$	0.835	63.121	93
	9	$SF = 4.239 + 0.662 D_z + 1.041 \times 10^{-3} Q_0$	0.860	59.683	90

SF: 液流密度 Sap flow densities

根系可以被动地吸收大量的水分进行蒸腾作用。夜间,柠条和沙棘树干液流密度基本无变化,可以有效的缓解植物水分胁迫。由于根压作用,根系可以在日间吸收大量的水分进行蒸腾作用,维持植物的水分平衡。本研究的结果与前人研究结果一致^[23–25]。但是,沈振西^[26]研究发现,沙棘夜间每小时液流量约是白天的 17.78%,由此计算出的夜间蒸腾量占总蒸腾量的 12.87%—12.84%。该研究推测同一树种在气候相对干旱地区的夜间蒸腾占白天或全天蒸腾的百分比可能会大于较湿润地区,这种独特的生理现象可能是植物对水分限制环境生理适应调节的结果。这一研究结果与本研究相悖,夜间沙棘的气孔开闭情况目前还不清楚,所以关于植被夜间液流的响应机制有待进一步研究。同时,Fang 等^[14]在黄土高原羊圈沟小流域的研究也指出沙棘存在夜间的树干液流,并且土壤水分和饱和水汽压差是影响沙棘夜间树干液流的主导因素。这可能是由于羊圈沟小流域的多年平均降雨量要大于本研究的安家沟小流域,这可能是植被自身的一种保护策略。

试验期间,柠条和沙棘的树干液流密度昼夜变化规律明显,晴天时变化更为剧烈。Giorio 等^[27]研究发现橄榄树 (*Canarium album*) 液流在晴天的变化幅度大于阴天。张宁南等^[28]指出植被在生长季后期,无论是晴天还是阴天,其树干液流都有规律地变化,但晴天的树干液流密度大于阴天。随着日间太阳辐射强度和气温的升高,树干液流密度呈缓慢加速变化趋势。严昌荣等^[29]报道了核桃树 (*Juglans regia*) 的液流密度有几个峰值,在夜间仍然存在树干液流,但液流速率非常低且恒定。孙慧珍等^[30]研究也表明白桦 (*Betula platyphylla*) 夜间液流密度仅占全天的 11.47%—39.93%,且晴天时液流密度大于阴天。本研究中不同天气条件下柠条和沙棘的树干液流密度的日变化和季节变化与上述研究基本一致。本研究还发现了一个有趣的现象,在降雨过后的阴天,树干液流仍保持较大的密度,这可能是由于在半干旱地区植被生长长期受土壤水分胁迫,降雨补给了土壤水分,对树干液流密度存在脉冲效应。

试验期间,沙棘的树干液流密度大于柠条,这说明沙棘比柠条消耗了更多的水分。Jian 等^[31]研究表明,在黄土高原地区,柠条较沙棘具有更好的适生性,柠条对土壤水分的需求较低,沙棘则在降雨较多的月份体现出优势,并且建议利用柠条进行黄土高原的植被恢复。

3.2 树干液流密度对环境因子的响应

植被树干液流密度与环境因子息息相关。Nadezhda^[32]指出,在晴天,随着 D_z 和 Q_0 的增加,苹果树 (*Malus pumila*) 的树干液流密度增大。在中国北方宁夏南部丘陵地区的试验结果表明,太阳辐射、气温和相对湿度是决定华北落叶松的日蒸腾量的 3 个重要环境因子^[33]。在另一项研究中,桉树 (*Eucalyptus robusta*) 人工林的平均日液流速率与有效土壤含水量与饱和水汽压差显著相关^[34]。本研究发现,柠条和沙棘的树干液流密度受 D_z 、 T_a 和 Q_0 的影响较大,但影响树干液流密度的 3 个环境因子在不同生长期存在差异。本研究同时还发现,当柠条与沙棘经历了长期干旱无雨的条件下,土壤含水量对树干液流的影响较大, D_z 和 Q_0 已不再是影响树干液流密度的主要因素。夏永秋和邵明安^[35]对黄土高原六道沟小流域柠条树干液流的研究得到了与本文相同

的结果,他们发现冠层导度与气象因子关系复杂,当土壤水分不存在亏缺时,冠层导度与太阳辐射、大气温度、作物参考蒸散因子显著相关,与水汽亏缺和相对湿度因子无相关性;当土壤水分存在亏缺时,冠层导度与太阳辐射、大气温度、作物参考蒸散因子无相关关系,而与水汽亏缺和相对湿度因子显著相关。臧春鑫等^[36]研究也发现从黄土高原柠条树干液流日际变化和环境因子的关系来看,基本上植物蒸腾的开始都是伴随着太阳辐射开始而开始的,但柠条达到蒸腾最大值要较太阳辐射值提前,并且会保持一段比较稳定的阶段,蒸腾下降的时间也要比太阳辐射延长 3 h 左右,在时间上存在一定的滞后性。

3.3 树干液流密度对降雨的响应

降雨在土壤表面的输入触发了土壤水分的入渗脉冲,这一脉冲现象是在半干旱地区尤为明显^[37]。由于研究区域的蒸发量需求较大,小降雨事件对液流速率的影响较小,同时小降雨事件(<5 mm 的降雨量)对植物生长和生存的作用,有相当多的争论,一些研究报道了小降雨事件无法到达植物根部^[38]。然而, Schwinning 等^[39]发现在科罗拉多高原,每增加约 1 mm 的降雨量,入渗量的脉冲持续时间就会增加 2—20 mm。在半干旱地区,小的降雨事件可以湿润植物表面,植物可以吸收粘附在叶和茎上的雨水,从而增加液流密度。大降雨事件可以有效补给土壤水分,提高土壤水分有效性,形成降雨后树干液流的响应。臧春鑫等^[36]的研究也发现在没有降水的天气条件下,柠条树干液流的变化趋势基本一致,但强度有差异;当出现突发性的降水时,黄土基上生长的中间锦鸡儿的液流变化,表现出了和降水量大小较为一致的变化,对降水有较快的响应。刘潇潇等^[40]在对黄土高原 11 种人工植被的树干液流进行 meta 分析后得到植被的生物学结构决定液流的潜在能力,土壤供水决定液流的总体水平,而气象因素主要决定液流的瞬间变动。

4 结论

植被蒸腾作用是重要的水文过程,通过对半干旱黄土高原丘陵沟壑区人工灌木树干液流密度的研究,可以为水分平衡估算和植被建设与管理提供参考。柠条和沙棘的树干液流密度主要受光合有效辐射、饱和水汽压差、气温和土壤含水量等环境因子的影响。当柠条与沙棘经历了长期干旱无雨的条件下,土壤含水量对树干液流起主要控制作用。半干旱地区植被生长长期受土壤水分胁迫,降雨补给了土壤水分,对树干液流密度存在脉冲效应。沙棘比柠条具有更大的树干液流密度,从另一个侧面反映了在相同的降雨条件下,沙棘要消耗更多的水分,就沙棘与柠条两种灌木而言,在黄土高原的植被恢复工作中,柠条更具有优势。今后的研究应考虑植被生理变化与水分利用的关系。柠条和沙棘的生态生理研究对于了解柠条和沙棘灌丛的水文过程以及进一步为半干旱区植被经营管理提供理论支持。对柠条和沙棘进行长期的蒸腾观测,以量化蒸腾的季节性和年际变化,构建半干旱区长期水平衡估算及水文模型。同时,树干液流是植被蒸腾耗水特征,只是植被水循环的一个环节,在后续的研究中将增设径流小区,对林冠截留、土壤蒸发等水循环要素进行观测,以便可以分析完整的水循环过程。

参考文献(References):

- [1] Chen H S, Shao M G, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 91-100.
- [2] 孙旭, 杨文慧, 焦磊, 李宗善, 周伟奇, 王效科, 张咏, 王傲雪. 不同时间尺度北京蟒山油松树干液流对环境因子的响应. *生态学报*, 2022, 42(10): 4113-4123.
- [3] 杨文慧, 焦磊, 买尔当·克依木, 李宗善, 高光耀, 王聪, 白应飞, 孙婧雅, 温润泉. 疏伐对黄土丘陵区刺槐林蒸腾的影响. *生态学报*, 2021, 41(12): 4923-4934.
- [4] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 祖元刚, 刘伟. 不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系. *林业科学*, 2012, 48(1): 77-85.
- [5] Deng Y, Wu S, Ke J, Zhu A J. Effects of meteorological factors and groundwater depths on plant sap flow velocities in Karst critical zone. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146764.
- [6] Wang C X, Liu H Y, Xia J B, Xing X S, Zhang S Y. Critical effects on the photosynthetic efficiency and stem sap flow of poplar in the Yellow River Delta in response to soil water. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(6): 2485-2498.
- [7] Smith D M, Allen S J. Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(12): 1833-1844.
- [8] Sakuratani T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1981, 37(1): 9-17.

- [9] Shao W, Su Y, Langhammer J. Simulations of coupled non-isothermal soil moisture transport and evaporation fluxes in a forest area. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2017, 65(4): 410-425.
- [10] 方伟伟, 吕楠, 傅伯杰. 植物夜间液流的发生、生理意义及影响因素研究进展. *生态学报*, 2018, 38(21): 7521-7529.
- [11] 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.
- [12] 王玥, 鄢春华, 邱国玉. 土壤温度对油松树干液流启动与停止的影响. *北京大学学报: 自然科学版*, 2019, 55(3): 580-586.
- [13] Wang D, Gao G Y, Li J R, Yuan C, Lü Y H, Fu B J. Sap flow dynamics of xerophytic shrubs differ significantly among rainfall categories in the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124815.
- [14] Fang W W, Lu N, Zhang Y, Jiao L, Fu B J. Responses of nighttime sap flow to atmospheric and soil dryness and its potential roles for shrubs on the Loess Plateau of China. *Journal of Plant Ecology*, 2017, 11(5): 717-729.
- [15] Wang G H, Shen Y Y, Yang X L, Chen Z X, Mo B R. Scaling up sap flow measurements from the stem scale to the individual scale for multibranched *Caragana korshinskii* on the Chinese loess plateau. *Forests*, 2019, 10(9): 785.
- [16] 党宏忠, 冯金超, 却晓娥, 王檬檬, 张金鑫. 晋西黄土区苹果树边材液流速率的方位差异研究. *林业科学研究*, 2019, 32(2): 46-52.
- [17] Lyu J L, He Q Y, Yang J, Chen Q W, Cheng R R, Yan M J, Yamanaka N, Du S. Sap flow characteristics in growing and non-growing seasons in three tree species in the semiarid Loess Plateau region of China. *Trees*, 2020, 34(4): 943-955.
- [18] Yue G Y, Zhao H L, Zhang T H, Zhao X Y, Niu L, Drake S. Evaluation of water use of *Caragana microphylla* with the stem heat-balance method in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1668-1678.
- [19] Xu L H, Cao G X, Wang Y N, Hao J, Wang Y H, Yu P T, Liu Z B, Xiong W, Wang X. Components of stand water balance of a larch plantation after thinning during the extremely wet and dry years in the Loess Plateau, China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e01307.
- [20] Fang S M, Zhao C Y, Jian S Q. Canopy transpiration of *Pinus tabulaeformis* plantation forest in the Loess Plateau region of China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(5): 1-9.
- [21] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, Yu K. The distribution of fine root length density for six artificial afforestation tree species in Loess Plateau of Northwest China. *Forest Systems*, 2015, 24(1): 3.
- [22] Kigalu J M. Effects of planting density on the productivity and water use of tea (*Camellia sinensis* L.) clones: I. Measurement of water use in young tea using sap flow meters with a stem heat balance method. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(3): 224-232.
- [23] 陈胜楠, 孔喆, 陈立欣, 刘清泉, 刘平生, 张志强. 半干旱区城市环境下油松林分蒸腾特征及其影响因子. *生态学报*, 2020, 40(4): 1269-1280.
- [24] He Q Y, Yan M J, Miyazawa Y, Chen Q W, Cheng R R, Otsuki K, Yamanaka N, Du S. Sap flow changes and climatic responses over multiple-year treatment of rainfall exclusion in a sub-humid black locust plantation. *Forest Ecology and Management*, 2020, 457: 117730.
- [25] Ma L H, Wang X, Gao Z Y, Wang Y K, Nie Z Y, Liu X L. Canopy pruning as a strategy for saving water in a dry land jujube plantation in a loess hilly region of China. *Agricultural Water Management*, 2019, 216: 436-443.
- [26] 沈振西. 宁夏南部柠条、沙棘和华北落叶松的液流与蒸腾耗水特性. 博士后研究报告, 北京: 中国林科院博士后流动站, 2005.
- [27] Giorio P, Giorio G. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49(1): 9-20.
- [28] 张宁南, 徐大平, Morris J, 周光益, 周国逸, 吴仲民. 雷州半岛尾叶桉人工林树液茎流特征的研究. *林业科学研究*, 2003, 16(6): 661-667.
- [29] 严昌荣, AlecDowney, 韩兴国, 陈灵芝. 北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的树干液流研究. *生态学报*, 1999, 19(6): 793-797.
- [30] 孙慧珍, 周晓峰, 赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究. *生态学报*, 2002, 22(9): 1387-1391.
- [31] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, Yu K. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 85-96.
- [32] Nadezhkina N. Sap flow index as an indicator of plant water status. *Tree Physiology*, 1999, 19(13): 885-891.
- [33] Wu W J, Li H J, Feng H, Si B C, Chen G J, Meng T F, Li Y, Siddique K H M. Precipitation dominates the transpiration of both the economic forest (*Malus pumila*) and ecological forest (*Robinia pseudoacacia*) on the Loess Plateau after about 15 years of water depletion in deep soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 297: 108244.
- [34] Zhang R, Wang D, Sun H W, Wei C H, Wang L. Comparison of transpiration of differently aged apple orchards on the Loess Plateau of China at multiple temporal scales. *Hydrological Sciences Journal*, 2021, 66(6): 979-990.
- [35] 夏永秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条(*Caragana korshinskii*)树干液流动态及其影响因子. *生态学报*, 2008, 28(4): 1376-1382.
- [36] 臧春鑫, 杨劼, 袁劼, 张雷, 宋炳煜. 黄土丘陵沟壑区中间锦鸡儿整株丛树干液流特征与环境因子的关系. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 420-426.
- [37] Meng W, Sun X H, Ma J J, Guo X H, Lei T, Li R F. Measurement and simulation of the water storage pit irrigation trees evapotranspiration in the Loess Plateau. *Agricultural Water Management*, 2019, 226: 105804.
- [38] Tang Y K, Wu X, Chen Y M. Sap flow characteristics and physiological adjustments of two dominant tree species in pure and mixed plantations in the semi-arid Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(6): 833-849.
- [39] Schwinning S, Starr B I, Ehleringer J R. Dominant cold desert plants do not partition warm season precipitation by event size. *Oecologia*, 2003, 136(2): 252-260.
- [40] 刘潇潇, 李国庆, 闫美杰, 杜盛. 黄土高原主要树种树干液流研究进展. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 369-373.