

黄土丘陵区两典型造林树种生长季树干直径微变化动态及其影响因素

刘美君¹ 吕金林² 陈秋文¹ 杨洁¹ 李国庆^{1,2} 杜盛^{1,2*}

(¹西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 运用 DC3 型高分辨率树干直径变化记录仪和 Granier 热扩散探针,对黄土丘陵地区两典型树种辽东栎和刺槐生长季的树干直径微变化和树干液流动态进行连续监测,并同步观测主要环境因子(土壤含水量、太阳辐射、空气温度和相对湿度),分析两树种树干的直径微变化动态特征与蒸腾耗水的关联性及其对环境因子的响应。结果表明:两树种树干直径和液流通量密度呈现明显的昼夜变化规律,直径日最大收缩量与日均液流通量密度呈显著正相关。树干直径在日尺度上的微变化受当日蒸腾耗水量的影响。对树干直径日最大收缩量和蒸腾驱动因子进行线性拟合,结果显示,树干直径日变化量与主要气象环境因子(日均太阳辐射、日均空气水汽压亏缺、整合变量 VT)呈显著正相关。回归曲线斜率表明,辽东栎树干直径日变化量大于刺槐,其直径对环境因子的敏感度更大。两树种液流通量密度在较高土壤水分时段高于土壤含水量较低时段,在不同土壤水分条件下辽东栎树干直径日最大收缩量差异显著,刺槐未达到显著水平,这些差异可能与两树种蒸腾调节和树干水分补充等用水策略有关。

关键词 辽东栎; 刺槐; 树干直径微变化; 树干液流; 土壤含水量

Dynamics and influencing factors of stem diameter micro-variations during the growing season in two typical forestation species in the loess hilly region, China. LIU Mei-jun¹, LYU Jin-lin², CHEN Qiu-wen¹, YANG Jie¹, LI Guo-qing^{1,2}, DU Sheng^{1,2*} (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Using DC3 high-resolution dendrometer and Granier-type thermal dissipation probes, we measured stem diameter micro-variations and xylem sap flow of two typical forestation species, *Quercus liaotungensis* and *Robinia pseudoacacia*, for a growing season in the loess hilly region of China. The main environmental factors (soil water content, solar radiation, air temperature and relative humidity) were monitored. The linkage between diameter micro-variations and transpiration water use were analyzed with respect to their responses to environmental factors. The results showed that the variations in stem diameter and sap flux density of both species had obvious diurnal rhythms. The maximum daily shrinkage was positively correlated with daily sap flux density. The micro-variation of stem diameter at the daily scale was affected by transpiration during the day. The maximum daily shrinkage of stem diameter was positively correlated and well fitted with transpiration driving factors (solar radiation, vapor pressure deficit, and the integrated variable VT). The difference in slopes of regression curves suggested that the daily variation of stem diameter in *Q. liaotungensis* was greater and more sensitive to meteorological factors than that in *R. pseudoacacia*. The sap flux densities of both tree species were higher during the period with relatively higher soil water content than

本文由国家重点研发计划项目(2017YFC0504601)和国家自然科学基金项目(41471440)资助 This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0504601) and the National Natural Science Foundation of China (41471440).

2020-11-07 Received, 2021-02-11 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

that with lower soil water content. The difference of maximum daily diameter shrinkage between different soil water conditions was statistically significant in *Q. liaotungensis*, but not in *R. pseudoacacia*. These differences may be related to water use strategies, including transpiration regulation and stem water replenishment.

Key words: *Quercus liaotungensis*; *Robinia pseudoacacia*; stem micro-variation; sap flow; soil water content.

林木通过叶部蒸腾作用的水分蒸散是森林生态系统水循环的重要组成部分。蒸腾耗水是树木水分损失的主要途径,同时也是树木根系从土壤中吸收水分并向树冠传输的主要驱动力。由于树木蒸腾耗水过程中的水分散失与根系吸水在速率变化上不同步,树体内水分也会随着蒸腾节律的昼夜变化出现减少和补充的动态变化,进而导致树干直径产生收缩与膨胀的微小变化,即树干直径微变化。

树干直径微变化与木质部中的水分传输及自身体内的水分状况密切相关,而树体内的水分变化是树木蒸腾失水和根系吸水补充的综合体现,因此也受影响蒸腾作用各类环境因子的影响。在桃树、柠檬和橄榄树等植物的研究中发现,树干直径微变化比其他水分生理指标能更好地反映树木水分状况^[1-3]。有研究表明,树干直径日最大收缩量可以用来指示树干内水分变化和日蒸腾耗水量^[4-5]。也有研究指出,树干直径微变化是树木水分生理状态的重要表征,可以反映冠层水分生理状态^[6]。树干直径微变化受土壤水分状况、太阳辐射、空气水汽压亏缺等因子的影响^[7-10]。树干液流是树干木质部的水分传输,间接反映蒸腾耗水过程及其动态变化。作为表征树木蒸腾耗水动态的重要指标,测定树干木质部边材液流已经成为研究林分蒸腾耗水的重要方法^[11]。因此,树干直径微变化动态与树干液流必然存在内在联系。但关于树干直径微变化的动态特征与树干液流的关联性以及对主要环境因子的响应特征尚无系统的研究,同步研究树干液流和直径微变化动态及其对环境因子的响应特征,对于探究蒸腾耗水动态特征以及不同树种的水分利用策略具有重要意义。

辽东栎(*Quercus liaotungensis*)是我国暖温带落叶阔叶林的主要树种之一,通常会形成相对稳定的优势天然群落,在黄土高原中部分布广泛;刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是黄土高原地区的主要人工林树种,具有耐旱和速生等特点。辽东栎天然次生林和刺槐人工林在黄土丘陵区的水土保持、涵养水源和生态环境保护等方面发挥着重要作用^[12]。有

研究表明,作为典型的乡土树种和外来树种,辽东栎和刺槐在应对短期和长期干旱胁迫的生理机制方面存在一定差异^[13]。本研究采用 DC3 型高分辨率树干直径变化记录仪和 Granier 热扩散探针,对黄土丘陵区辽东栎和刺槐进行直径微变化和树干液流动态连续测定,深入分析这 2 个典型树种树干直径微变化与蒸腾耗水关系以及对环境因子的响应差异,对比分析两树种在不同土壤水分条件下的直径和液流日变化特征,为揭示两树种的蒸腾耗水策略以及该区域造林树种的选择和植被恢复的合理布局提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于陕西省延安市南郊公路山林区(36°26' N, 109°32' E, 海拔 1395 m),供试样树分别选自距离相近的辽东栎天然次生林和刺槐人工林。该地区具有典型黄土丘陵沟壑区的地貌特征,土壤类型为黄绵土,气候属于温带大陆性季风气候。根据延安市气象台 1981—2010 年间气象资料,年均降雨量 515.8 mm,年均温 10.3 °C。伴生树种主要有山杏(*Ameniaca sibirica*)、细裂槭(*Acer stenolobum*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)等,灌木和小乔木有水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)和绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等。

1.2 树干直径微变化测定

从两样地内分别选取 3 株生长正常、具代表性的辽东栎和刺槐样树(表 1)。采用 DC3 型树干直径变化记录仪(Ecomatik, Germany)连续测定样树直径变化过程。从 2018 年 11 月 1 日起进行长期连续监测,每 1 h 自动记录 1 次树干直径,测量精度为 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。采用 2019 年生长季全叶期(6—8 月)部分时段数据,根据树干直径日最大值(maximum trunk diameter, MXTD)和树干直径日最小值(minimum trunk diameter, MNTD)计算树干直径日最大收缩量(maximum daily shrinkage, MDS)。为使样树之间具有可比性并计算其平均值,以试验期间直径最小值

表 1 供试样树的基本信息

Table 1 Basic information of the sample trees

树种 Species	样树号 Sample tree No.	树高 Tree height (m)	胸径 DBH (cm)
辽东栎	1	6.9	20.2
<i>Quercus liaotungensis</i>	2	6.9	25.9
	3	6.9	17.5
刺槐	4	8.1	13.3
<i>Robinia pseudoacacia</i>	5	8.8	16.1
	6	9.1	12.9

DBH: Diameter at breast height.

为基准计算获得各样树直径变化量作为主要参数进行分析。

1.3 树干木质部边材液流测定

利用热扩散探针技术(thermal dissipation probe, TDP)监测样树的液流通量密度。采用 10 mm 长度规格探针,每株样树于南北两侧安装 2 组,上下探针间距为 10~15 cm^[14]。用数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, USA)每 30 s 读取一次数据,记录 30 min 平均值。根据监测得到的加热探针和参考探针间的温度差,利用 Grainer 经验公式计算树干边材液流通量密度(F_d , mL·m⁻²·s⁻¹)^[15],计算公式如下:

$$F_d = 119 \times [(\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T]^{1.231}$$

式中: ΔT 为两探头间温度差; ΔT_{\max} 为液流通量密度为 0 时两探针间的温度差值,通常为温度差的最大值。以两组探针所测数据的平均值代表该株样树的液流通量密度。

1.4 环境因子测定

通过安装在样地外开阔地的自动气象站对主要气象要素进行自动连续监测。采用光量子传感器(Li-200, Li-Cor Inc., USA)测量太阳辐射(R_s , W·m⁻²);空气温度(T , °C)和相对湿度(RH, %)采用温湿度计(HMP50, Vaisala, Finland)进行测量;降雨量采用翻斗式雨量计(Davis 7852, Davis Instruments, USA)测量。其中,光量子传感器和温湿度计安装于裸地 2 m 高处;翻斗式雨量计水平安装于地面 30 cm 高处。利用数据采集器(CR1000)对实时监测的环境因子每 30 s 测量一次数值,记录 30 min 的平均值,依据空气温湿度计算空气水汽压亏缺(VPD),计算公式^[16]如下:

$$VPD = 0.611e^{17.5027/(T+240.97)}(1-RH)$$

通过安装土壤水分自动监测系统测定样地土壤水分,在 1 m 深的土壤剖面上设置 6 个 S-SMC-M005 土壤水分探头(Onset, Bourne, USA),连续实时监

测不同深度的土壤水分,每 60 s 读取一次数据,记录每 30 min 的平均值在 HOBO 数据采集器(Onset, USA)中。0~1 m 土层的平均土壤含水量依据各探头所代表的土层深度加权平均计算得出。

1.5 数据处理

本研究涉及的液流通量密度、环境因子以及树干直径数据是 2019 年生长季盛期(6—8 月)监测值。使用 Baseline 软件将探针测得的电压差值换算为树干液流通量密度。

重点分析树干直径的变化量,因此以试验期间树干直径最小值(出现在最初几日内)作为基准值计算树干直径变化量作为主要参数,并求算 3 株重复样树的平均值。

由于空气水汽压亏缺(VPD)和太阳辐射(R_s)共同影响着植物蒸腾进而影响树干液流动态,为了便于分析树干直径对主要蒸腾驱动因子的响应,引入了 VPD 和 R_s 的整合变量(VT)^[17],计算公式如下:

$$VT = VPD \times R_s^{\frac{1}{2}}$$

数据处理和统计分析采用 R 4.0 统计分析软件,使用 SigmaPlot 14.0 进行拟合分析和作图。图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 试验期间降雨量、林地土壤含水量以及树干直径动态

2019 年生长季 6—8 月逐日降雨量和辽东栎、刺槐两样地 0~1 m 土层土壤平均含水量、供试样树每日最大直径变化量动态(图 1)。2 个林地的土壤含水量动态对降雨事件的响应明显。7 月 21—22 日发生了 56.2 mm 的降雨事件,土壤水分得到明显的补充;7 月 29—30 日及 8 月 3 日共计降雨 36.2 mm,土壤水分再次明显增加。在雨量较少的降雨事件后,两样地的土壤含水量没有明显变化,表明小型降雨对土壤水分的补充作用较小。另外,同一降雨事件对于两样地土壤水分的补充也不同,在连续无雨日中,两样地土壤含水量都缓慢下降,但下降幅度存在差异。

试验期间两树种的逐日最大直径变化趋势相同,在连续无雨日中缓慢下降,即树干直径的逐日变化呈现收缩趋势,与两样地土壤含水量变化趋势相同;在每次降雨事件后两树种日最大直径变化量与土壤含水量均会上升并出现一次峰值。树干逐日最大直径在整个试验期间呈增加的趋势,这与树干生长有关。

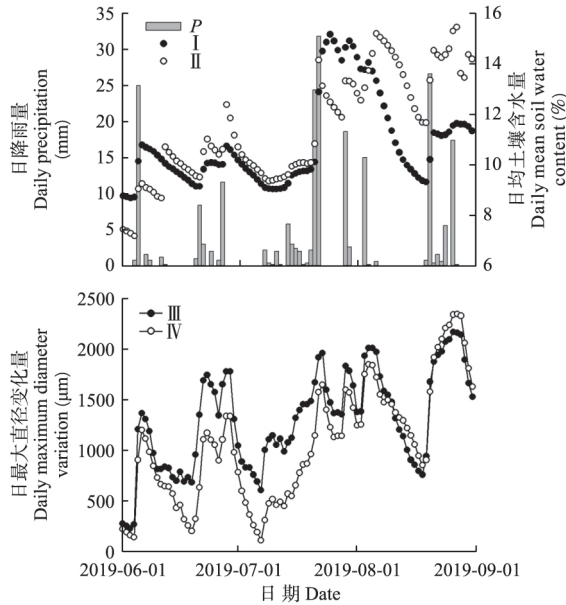


图1 试验期间日降雨量、两林地日均土壤含水量和两树种日最大直径变化动态

Fig.1 Dynamics of daily precipitation, mean soil water content and maximum diameter variation of two tree species in the two forestlands during the experimental period.

P: 降雨量 Precipitation. I: 辽东栎林地日均土壤含水量 Daily mean soil water content of *Quercus liaotungensis*; II: 刺槐林地日均土壤含水量 Daily mean soil water content of *Robinia pseudoacacia*; III: 辽东栎日最大直径变化 Maximum diameter variation of *Q. liaotungensis*; IV: 刺槐日最大直径变化 Maximum diameter variation of *R. pseudoacacia*.

2.2 树干直径日最大收缩量对气象环境因子的响应特征

为考察树干直径变化与蒸腾耗水的关联性,在生长季全叶期(6—8月)代表正常蒸腾作用的无雨日,选取连续5 d以上的无雨天气(6月12—19日、6月30日—7月7日)共计16 d,辽东栎($r=0.749$, $P<0.01$)和刺槐($r=0.828$, $P<0.01$)树干直径日最大收缩量与日均液流通量密度相关关系均达到显著水平,表明树干直径在日尺度上的变化幅度受当日蒸腾耗水量的显著影响。

采用线性回归方程 $Y=aX$ 在连续5 d以上无雨天气内(6月12—19日、6月30日—7月7日)分别对两树种树干直径日最大收缩量与当日气孔蒸腾时间段(6:00—20:30)气象环境因子(R_s 、VPD和VT)平均值进行拟合(图2)。回归结果都达到了显著水平。此外,辽东栎的回归方程斜率均大于刺槐的回归方程斜率,表明辽东栎样树的树干直径日变化量大于刺槐样树,直径变化对气象环境因子的敏感度更大。

2.3 树干直径微变化和液流通量密度日变化及其对土壤水分变化的响应

选取土壤水分较低时段的典型晴天7月2—7日,辽东栎和刺槐样地土壤平均含水量分别为

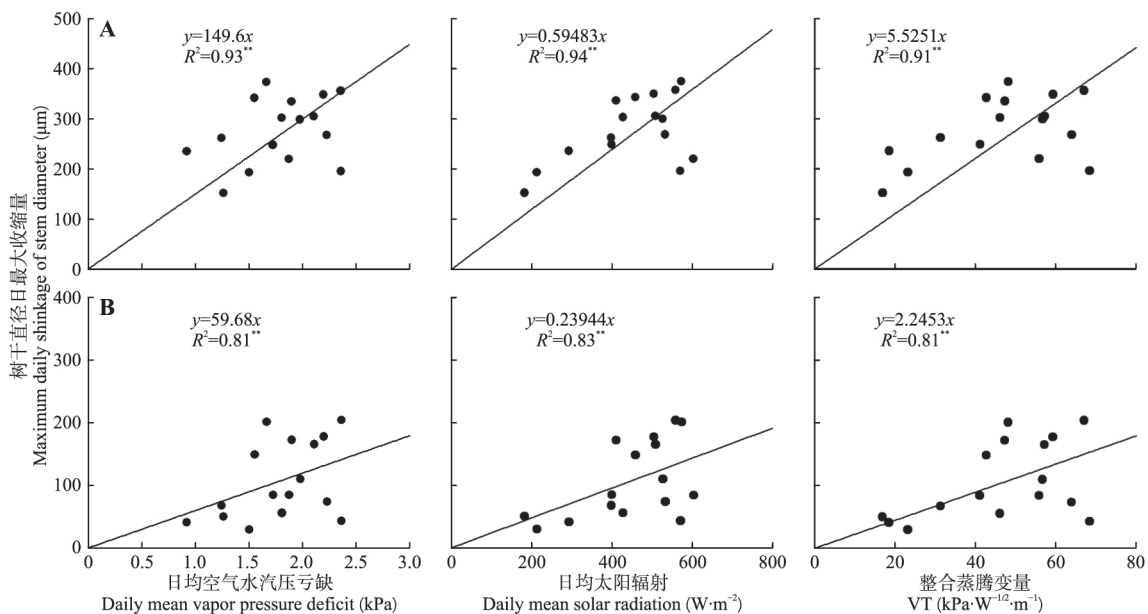


图2 连续5 d以上无雨日辽东栎(A)和刺槐(B)树干直径日最大收缩量对日均空气水汽压亏缺(VPD)、日均太阳总辐射(R_s)和整合蒸腾变量的响应

Fig.2 Response of *Quercus liaotungensis* (A) and *Robinia pseudoacacia* (B) stem maximum shrinkage to daily mean vapor pressure deficit (VPD), daily mean solar radiation (R_s) and integrated transpiration variable (VT) during periods of more than five consecutive non-rainy days.

** $P<0.01$.

9.2%~10%、9.7%~10.4% ,土壤水分较高时段的典型晴天 8 月 8—13 日 ,辽东栎和刺槐样地土壤平均含水量分别为 10.2%~12.3%、13.6%~14.9% ,以分析树干直径和液流通量密度的日变化特征。

由图 3 可以看出 ,两树种的树干直径和液流通量密度呈现明显的昼夜变化规律。每日上午时段 ,树干液流快速上升并逐渐达到当日最大值 ,之后缓慢下降 ,入夜后接近于最低值 ,直至次日凌晨达到最低值。辽东栎样树的峰值出现较早 ,多在 10:00—11:00 ,刺槐样树的峰值多在 12:00—14:00。树干直径的变化节律与液流不同步甚至呈相反趋势 ,最大值出现在早晨或上午 ,随着液流通量密度的明显升高 ,树干直径进入收缩阶段 ,在下午液

流通量密度明显下降阶段(16:00—18:00) 树干直径达到当日最小值 ,此后逐渐进入膨胀阶段。连续晴天的逐日变化动态显示 ,树干直径每日最大值和最小值均呈下降趋势 ,表明树体内水分持续减少 ,根系吸收水分少于当日蒸腾耗水消耗的水分 ,在土壤含水量较高状态下这种变化趋势更为明显;在土壤含水量较低时段 ,两树种液流通量密度整体上均低于土壤含水量较高时段 ,表明日蒸腾耗水量处于较低水平 ,辽东栎样树树干直径的逐日下降趋势较平缓 ,但刺槐样树仍然呈现较大幅度的持续下降。

对两样树的相关参数在不同土壤含水量时段之间进行差异显著性分析可知(表 2) ,虽然两个时间段的蒸腾驱动因子(太阳辐射和空气水汽压亏缺)

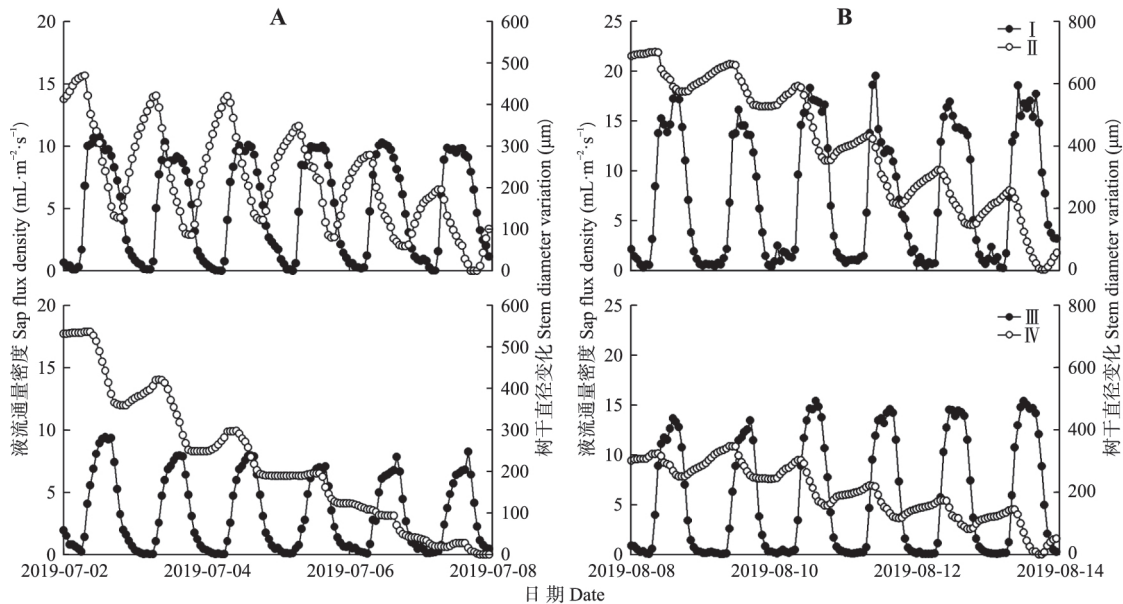


图 3 不同土壤含水量条件下典型天气两树种树干直径微变化和液流通量密度动态

Fig.3 Diurnal dynamics of stem diameter and sap flux density of the two tree species in typical bright days under different soil water content.

A: 土壤含水量较低时段 Low soil water content period; B: 土壤含水量较高时段 High soil water content period. I: 辽东栎液流通量密度 Sap flow density of *Quercus liaotungensis*; II: 辽东栎树干直径变化 Stem diameter variation of *Q. liaotungensis*; III: 刺槐液流通量密度 Sap flow density of *Robinia pseudoacacia*; IV: 刺槐树干直径变化 Stem diameter variation of *R. pseudoacacia*.

表 2 不同土壤含水量条件下主要环境因子、平均液流通量密度和树干直径日最大收缩量

Table 2 Major environmental factors , averaged sap flux density and daily maximum diameter shrinkage under different soil water contents

项目 Item	平均太阳 总辐射 Mean solar radiation ($W \cdot m^{-2}$)	日均空气 水汽压亏缺 Daily mean vapor pressure deficit (kPa)	辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>			刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>		
			土壤含水量 Soil water content (%)	平均液 流通量密度 Mean sap flux density ($mL \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	直径日 最大收缩量 Daily maximum diameter shrinkage (μm)	土壤含水量 Soil water content (%)	平均液流 通量密度 Mean sap flux density ($mL \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	直径日 最大收缩量 Daily maximum diameter shrinkage (μm)
较低土壤水分时段 Low soil water content period	652.5±32.9a	0.9±0.3a	9.6±0.1a	5.1±0.1a	276.1±24.6a	10.1±0.1a	3.2±0.2a	108.4±22.8a
较高土壤水分时段 High soil water content period	561.2±23.9a	1.2±0.1a	11.2±0.3b	7.5±0.3b	192.7±22.1b	14.3±0.2b	5.5±0.2b	110.6±11.7a

无显著差异,平均液流通量密度随土壤含水量呈现出显著差异;树干直径日最大收缩量仅辽东栎呈现出显著差异,刺槐未达到显著水平,表明在2个土壤含水量状态下刺槐日蒸腾耗水量都明显大于当日来自于土壤的水分补充。

3 讨 论

3.1 树干直径微变化与环境因子的关系

树干直径微变化区别于树干木质部的次生生长期,是在日尺度上的周期性收缩和膨胀,受蒸腾耗水和根系吸水驱动,因此在很大程度上受环境因子影响^[18]。蒸腾作用较强的连续晴天会导致树干逐日最大直径下降,在降雨事件后再次恢复到较高水平,这与降雨日空气水汽压亏缺降低、蒸腾作用小相吻合;而与此同时,根系能够从经降雨改善的土壤水分中获取更多水分补给,使得树干含水量得以恢复^[5,19]。本研究区地下水位较深,降雨是土壤水分补充的唯一来源,次降雨量、降雨频次和降雨间隔期蒸腾驱动因子均影响土壤含水量状况。土壤含水量状况既会影响蒸腾作用的强度,也影响树干直径微变化幅度^[20-22]。本研究中,土壤含水量差异对两树种日平均液流通量密度都呈现显著影响,这与该区域前期的相关研究结果一致^[12]。在连续无雨期树干直径每日最大值都呈现持续下降趋势,反映了样树整体水分状态的变化趋势^[6,23]。

树干直径微变化与蒸腾作用和蒸腾驱动因子的相关性已有研究,树干直径日最大收缩量与日均温度、日均空气水汽压亏缺等参数具有相关性^[24-25]。Drew等^[26]研究发现,树干直径的日变化与气温、相对湿度、降雨量和土壤含水量有关。蒸腾是树干直径微变化的主要驱动力,两树种的树干直径日最大收缩量值变化在很大程度上取决于蒸腾驱动因子的变化^[25],其中水分和热量对直径日变化影响较大^[27]。本研究中,两树种的直径变化与蒸腾驱动因子(太阳辐射、空气水汽压亏缺及二者的整合变量)的线性拟合均达到了显著水平,这与李晓彬等^[28]采用通径分析的研究结果一致,进一步说明蒸腾耗水强度是影响体内水分平衡的直接因素。

3.2 两树种直径微变化差异及原因

有研究显示,树干直径微变化与树干内部水分状态显著相关,是指示树干体内水分胁迫最敏感的指标,可作为液流测量的补充^[23,29]。树干液流和叶部气孔蒸腾动态受到树木生理生态特性的调控,因此树干直径微变化特征也与树种特性有关。一定程

度的土壤水分胁迫和较高的空气水汽压亏缺都会触发树木实施叶部气孔调节功能以维持一定的叶部水势,但气孔调节功能在树种之间存在一定差异。Du等^[13]发现,该区域的刺槐林在降雨前后的液流变化远大于乡土树种辽东栎,表明刺槐对土壤水分的变化有比较显著的反应。辽东栎树干直径变化对气象环境因子的响应程度大于刺槐,这可能与两树种的树干储水量和水分调节策略或者传输效率的差异有关^[13]。在不同土壤水分条件下,辽东栎伴随平均液流通量密度的差异树干直径日最大收缩量也呈现出显著差异,而刺槐直径日最大收缩量无显著差异,这与刺槐在两个土壤含水量时段均表现出日最大直径的持续下降有关。辽东栎可能因实施气孔调节功能而导致日最大直径下降趋缓,而刺槐连续呈现出直径恢复后仍然远低于前日水平。也有研究认为,树干直径日最大收缩量这一指标容易受到其他因素的影响,反映树体水分状况具有局限性。张寄阳等^[30]基于对棉花(*Gossypium* spp.)茎直径微变化研究表明,因难以确定干旱胁迫的临界值,茎直径日最大收缩量不适于单独作为灌溉指标。也有研究发现,在树干快速生长时,除了土壤水分利用率和环境条件外,树龄、物候期等也可以影响树干直径日最大收缩量^[31],且树干收缩也反映了树体内水势梯度和水流阻力的变化、需水量的分配等^[7]。近期有研究发现,树干直径实时测量值与水分状况充分恢复后的差值更能够反映冠层水分状况,是反映冠层器官水势的重要指标^[6,32]。在全球变化背景下,通过定量分析树干直径微变化特征探究半干旱区林木应对多种环境条件的途径,特别是应对干旱胁迫的策略,是一项亟待深入探索的工作。

参考文献

- [1] 湛景武,汪有科,张陆军,等. 桃树茎直径微变化与土壤水势及气象因子的关系. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 489-494 [Zhan J-W, Wang Y-K, Zhang L-J, et al. Micro-variation in peach stem diameter and its relationship with soil water potential and meteorological factors. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 489-494]
- [2] Ortuño MF, García-Orellana Y, Conejero W, et al. Assessment of maximum daily trunk shrinkage signal intensity threshold values for deficit irrigation in lemon trees. *Agricultural Water Management*, 2008, 96: 80-86
- [3] Cuevas MV, Torres-Ruiz JM, Álvarez R, et al. Assessment of trunk diameter variation derived indices as water stress indicators in mature olive trees. *Agricultural Water*

- Management*, 2010, **97**: 1293–1302
- [4] Nortes PA, Pérez-Pastor A, Egea G, et al. Comparison of changes in stem diameter and water potential values for detecting water stress in young almond trees. *Agricultural Water Management*, 2004, **77**: 296–307
- [5] 刘春伟, 康绍忠. 基于茎干直径微变化制定苹果灌溉制度. *生态学报*, 2015, **35**(14): 4754–4762 [Liu C-W, Kang S-Z. Assessment of trunk diameter fluctuation for irrigation schedule in apple trees. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(14): 4754–4762]
- [6] Dietrich L, Zweifel R, Kahmen A. Daily stem diameter variations can predict the canopy water status of mature temperate trees. *Tree Physiology*, 2018, **38**: 941–952
- [7] Klepper B, Taylor BHM. Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*, 1971, **48**: 683–685
- [8] 余克顺, 李绍华, 孟昭清, 等. 水分胁迫条件下几种果树茎干直径微变化规律的研究. *果树科学*, 1999, **16**(2): 86–91 [Yu K-S, Li S-H, Meng Z-Q, et al. Stem diameter microvariations of four different fruit trees under water stress. *Journal of Fruit Science*, 1999, **16**(2): 86–91]
- [9] 孙守家, 孟平, 张劲松, 等. 太行山南麓低山丘陵区栓皮栎直径变化及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2012, **23**(8): 2141–2148 [Sun S-J, Meng P, Zhang J-S, et al. Diurnal variation of *Quercus variabilis* trunk diameter in response to environmental factors at south aspect of Taihang Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(8): 2141–2148]
- [10] 吴丽杰, Arisa K, 付培立, 等. 热带季节性湿润林苦楝 (*Melia azedarach*) 径向生长季节动态及其对环境因子的响应. *生态学报*, 2020, **40**(19): 1–10 [Wu L-J, Arisa K, Fu P-L, et al. Intra-annual radial growth of *Melia azedarach* in a tropical moist seasonal forest and its response to environmental factors in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(19): 1–10]
- [11] 刘潇潇, 何秋月, 闫美杰, 等. 黄土丘陵区辽东栎群落优势种和主要伴生种树干液流动态特征. *生态学报*, 2018, **38**(13): 4744–4751 [Liu X-X, He Q-Y, Yan M-J, et al. Characteristics of sap flow dynamics in dominant and companion trees in a natural secondary oak forest in the loess hilly region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(13): 4744–4751]
- [12] 杜盛, 刘国彬. 黄土高原植被恢复的生态功能. 北京: 科学出版社, 2015: 15 [Du S, Liu G-B. Ecological Function of Vegetation Restoration in Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2015: 15]
- [13] Du S, Wang YL, Kume T, et al. Sap flow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**: 1–10
- [14] 吕金林, 何秋月, 闫美杰, 等. 黄土丘陵区辽东栎树干液流特征对边材面积和土壤水分的响应. *应用生态学报*, 2018, **29**(3): 725–731 [Lyu J-L, He Q-Y, Yan M-J, et al. Sap flow characteristics of *Quercus liaotungensis* in response to sapwood area and soil moisture in the hilly region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(3): 725–731]
- [15] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, **3**: 309–320
- [16] Campbell GS, Norman JM. An Introduction to Environmental Biophysics. New York: Springer, 1998
- [17] Kakubari Y, Hosokawa K. Estimation of stand transpiration of a beech forest based on an eco-physiological computer simulation model and superporometer. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 1992, **74**: 263–272
- [18] Intrigliolo DS, Castel JR. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations. *Irrigation Science*, 2007, **26**: 49–59
- [19] Zweifel R, Zimmermann L, Zeugin F, et al. Intra-annual radial growth and water relations of trees: Implications towards a growth mechanism. *Journal of Experimental Botany*, 2006, **57**: 15
- [20] Goldhamer DA, Fereres E. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, 2001, **20**: 115–125
- [21] Simonneau T, Habib R, Goutouly JP, et al. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: Direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany*, 1993, **44**: 615–621
- [22] 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. *应用生态学报*, 2019, **30**(8): 2607–2613 [Yang J, Lyu J-L, He Q-Y, et al. Time lag of stem sap flow and its relationships with transpiration characteristics in *Quercus liaotungensis* and *Robinia pseudoacacia* in the loess hilly region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(8): 2607–2613]
- [23] Conejero W, Alarcón JJ, García-Orellana Y, et al. Daily sap flow and maximum daily trunk shrinkage measurements for diagnosing water stress in early maturing peach trees during the post-harvest period. *Tree Physiology*, 2007, **27**: 81–88
- [24] Zweifel R, Häslér R. Dynamics of water storage in mature subalpine *Picea abies*: Temporal and spatial patterns of change in stem radius. *Tree Physiology*, 2001, **21**: 561–569
- [25] Wilhelm E, Simon RG, Ronald F, et al. Concomitant dendrometer and leaf patch pressure probe measurements reveal the effect of microclimate and soil moisture on diurnal stem water and leaf turgor variations in young oak trees. *Functional Plant Biology*, 2012, **39**: 297–305
- [26] Drew DM, Downes GM. The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation: A review. *Dendrochronologia*, 2009, **27**: 159–172
- [27] 管伟, 熊伟, 王彦辉, 等. 六盘山北侧华北落叶松树干直径生长变化及其对环境因子的响应. *林业科学*, 2007, **43**(9): 1–6 [Guan W, Xiong W, Wang Y-H, et al. Stem diameter growth of *Larix principis-rupprechtii* and its response to meteorological factors in the north of

- Liupan Mountain. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, **43** (9): 1-6]
- [28] 李晓彬,汪有科,张平. 充分灌溉下梨枣树茎直径动态变化及 MDS 影响因子的通径分析. 农业工程学报, 2011, **27**(4): 88-93 [Li X-B, Wang Y-K, Zhang P. Dynamic changes of pear jujubestem diameter and path analysis of MDS influencing factors with full irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(4): 88-93]
- [29] Ortuño MF, Alarcón JJ, Nicolás E, *et al.* Sap flow and trunk diameter fluctuations of young lemon trees under water stress and rewatering. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, **54**: 155-162
- [30] 张寄阳,段爱旺,孟兆江,等. 基于茎直径微变化的棉花适宜灌溉指标初步研究. 农业工程学报, 2006, **22**(12): 86-89 [Zhang J-Y, Duan A-W, Meng Z-J, *et al.* Rational indicators for irrigation scheduling of cotton based on microchanges of stem diameter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, **22**(12): 86-89]
- [31] Ortuño MF, Conejero W, Moreno F, *et al.* Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 2009, **97**: 1-11
- [32] Steppe K. The potential of the tree water potential. *Tree Physiology*, 2018, **38**: 937-940

作者简介 刘美君,女,1996年生,硕士研究生。主要从事森林蒸腾耗水研究。E-mail: 1992861624@qq.com
责任编辑 孙 菊

刘美君,吕金林,陈秋文,等. 黄土丘陵区两典型造林树种生长季树干直径微变化动态及其影响因素. 应用生态学报, 2021, **32**(5): 1673-1680

Liu M-J, Lyu J-L, Chen Q-W, *et al.* Dynamics and influencing factors of stem diameter micro-variations during the growing season in two typical forestation species in the loess hilly region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(5): 1673-1680