

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.054.

王瑛, 刘美君, 郭海宁, 等. 减雨处理环境下刺槐冠层气孔导度变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 209-216.

WANG Ying, LIU Meijun, GUO Haining, et al. Canopy Stomatal Conductance of *Robinia pseudoacacia* Under Rainfall Exclusion Treatment[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 209-216.

减雨处理环境下刺槐冠层气孔导度变化特征

王瑛¹, 刘美君¹, 郭海宁¹, 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 杨陵 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要: [目的] 研究冠层气孔导度对蒸腾驱动因子响应的敏感性伴随减雨处理可能发生的变化, 以期揭示树木对气候环境因素的适应策略以及合理制定植被恢复措施提供理论依据。 [方法] 基于 Granier 热扩散探针长期监测的刺槐树干液流动态和同步观测的气象数据, 比较分析减雨处理和对照环境下冠层气孔导度特征及其对蒸腾驱动因子敏感性的响应。 [结果] (1) 在生长季, 刺槐冠层气孔导度日变化与空气水汽压亏缺和太阳辐射保持相同的趋势, 但减雨处理样地的冠层气孔导度整体上低于对照样地, 同时两样地 7 月份的冠层气孔导度都明显大于其他月份。(2) 刺槐日均冠层气孔导度与日均太阳辐射和空气水汽压亏缺分别符合线性和对数曲线的拟合关系。减雨处理样地冠层气孔导度与各驱动因子的拟合斜率均低于对照样地, 由于生长季前期降雨较为充沛且平均土壤含水量高于中后期, 各样地在生长季前期的拟合斜率相对较高。(3) 冠层气孔导度对空气水汽压亏缺响应的敏感性与参比冠层气孔导度呈线性相关关系, 减雨处理样地的敏感性明显较低, 同一样地的敏感性也在土壤含水量较高的生长季前期略高。 [结论] 刺槐冠层气孔导度日变化在不同月份的峰值差异与林分叶面积变化等物候节律或土壤水分等环境因素有关。各样地及不同时期冠层气孔导度对蒸腾驱动因子敏感性具有差异, 减雨处理会削弱冠层气孔导度对蒸腾驱动因子的响应敏感性。总体来说, 该地区刺槐林对空气水汽压亏缺的能力较强, 实施减雨处理后调控能力有所下降, 但维持在正常水平。

关键词: 刺槐; 截留降雨; 蒸腾驱动因子; 冠层气孔导度; 敏感性

中图分类号: S715.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0209-08

Canopy Stomatal Conductance of *Robinia pseudoacacia* Under Rainfall Exclusion Treatment

WANG Ying¹, LIU Meijun¹, GUO Haining¹, DU Sheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The sensitivity of canopy stomatal conductance to transpiration driving factors and the possible changes with rain reduction treatment were studied in order to provide a theoretical basis for revealing the adaptation strategies of trees to climatic and environmental factors and for reasonably formulating vegetation restoration measures. [Methods] Based on the long-term monitoring of trunk sap flow dynamics of *Robinia pseudoacacia* by Granier's thermal diffusion probe and the synchronously observed meteorological data, the characteristics of canopy stomatal conductance and its sensitivity of response to transpiration drivers under rain reduction treatment and control environment were compared and analyzed. [Results] (1) In the growing season, the diurnal variation of canopy stomatal conductance of *R. pseudoacacia* maintained the same trend as that of air vapor pressure deficit and solar radiation, but the canopy stomatal conductance of

收稿日期: 2022-08-22

修回日期: 2022-09-12

资助项目: 国家重点研发计划项目“丘陵沟壑区水土保持林结构改善与功能提升技术和示范”(2017YFC0504601)

第一作者: 王瑛(1996—), 女, 甘肃省白银人, 硕士研究生, 主要从事森林蒸腾耗水研究。E-mail: wangying2020@nwafu.edu.cn

通信作者: 杜盛(1965—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士, 研究员, 主要从事森林生态系统及蒸腾耗水研究。E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

the treated sample plot was generally lower than that of the control plot. At the same time, the canopy stomatal conductance of the two sample plots in July was significantly higher than that of other months. (2) The daily average canopy stomatal conductance of *R. pseudoacacia* conformed to the fitting relationship of linear and logarithmic curves with daily average solar radiation and air vapor pressure deficit, respectively. The fitting slopes of canopy stomatal conductance and driving factors in the rain reduction sample plots were lower than those in the control plots. Due to the abundant rainfall in the early growth season and the higher average soil water content in the middle and late growth season, the fitting slopes of various plots in the early growth season were relatively high. (3) The sensitivity of canopy stomatal conductance in response to air vapor pressure deficit was linearly correlated with the reference canopy stomatal conductance. The sensitivity of rain reduction treatment sample plot was significantly lower, and the sensitivity of the same plot was also slightly higher in the early growth season with high soil water content. [Conclusion] The peak value difference of stomatal conductance of *R. pseudoacacia* canopy in different months is related to phenological rhythm such as the change of stand leaf area or environmental factors such as soil moisture. The sensitivity of canopy stomatal conductance to transpiration drivers is different in different plots and different periods. Rainfall reduction treatment will weaken the sensitivity of canopy stomatal conductance to transpiration drivers. In general, *R. pseudoacacia* stands in this area have a strong ability to respond to the air vapor pressure deficit. After the implementation of rain reduction treatment, the regulation ability has decreased, but maintained at a normal level.

Keywords: *Robinia pseudoacacia*; rainfall exclusion; meteorological factors; canopy stomatal conductance; sensitivity

气孔是土壤—植被—大气连续体中物质与能量交换的重要通道,调节树木叶片与大气间的气体交换从而影响蒸腾速率^[1],一般用气孔导度或气孔阻抗(导度的倒数)表示叶片对水汽的传导效率^[2]。冠层气孔导度将气孔导度扩大到林冠层范围^[3],是衡量冠层整体传导效率或平均气孔开闭程度及森林生态系统响应环境变化的指标^[4],也是进行冠层蒸腾速率模拟和林分尺度蒸腾耗水量计算的基础。冠层气孔导度的变化过程由根源信号、环境因子和 CO₂ 浓度等因素共同决定^[5],在较小的时间尺度上主要受大气条件作用,而在较长的时间尺度,冠层气孔导度对环境因子的响应更易受到土壤水分及根系在土壤中的分布所影响。探究冠层气孔导度变化特征及对环境因子的响应有助于揭示生态系统与大气间能量和水分的交换动态和森林调控蒸腾的机理,在评估土壤水分胁迫及其对森林生态功能的影响方面也具有重要作用^[4,6]。

叶片气孔导度一般采用气孔计或便携式光合仪进行测定,但是将叶片气孔导度通过尺度扩展得到的冠层气孔导度,或利用模型模拟等间接方法获得的冠层气孔导度,都无法获得冠层气孔导度的连续值,且由于叶片的空间异质性等原因而产生相当大的误差^[3]。基于连续监测的树干液流和气象数据通过 Penman-Monteith 方程求算的冠层气孔导度具有数值连续且与树冠总蒸腾量高度匹配的优点^[7]。该方法已经被大量应用于不同时间尺度、不同立地条件以及不同林分间冠层气孔导度

的比较及其对环境因子的响应等方面研究^[3-4,6,8-15],但针对黄土高原地区各类林分冠层气孔导度对环境因子响应的研究报道还较少。

黄土高原是我国实施植被恢复和退耕还林工程的重点地区之一^[16],水分是限制黄土高原地区植被生长的主要因子^[17]。在全球气候变化背景下区域降水格局也在发生改变,有研究显示黄土高原地区气温转暖趋势明显且年降水量有逐年减少趋势^[18],也将对该地区植被造成水分胁迫的风险,影响蒸腾耗水动态和生态系统稳定性^[19-21]。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)作为黄土高原地区主要的造林树种,具有适应性强、生长速度快和材质优良等特点^[22],降雨量和土壤水分是该地区影响刺槐生长的重要因素^[23]。本文通过人工模拟降雨减少处理试验,探究降雨减少对生长季内刺槐冠层气孔导度的影响,分析冠层气孔导度对蒸腾驱动因子响应的敏感性伴随减雨处理可能发生的变化,为深入揭示树木对气候环境因素的适应策略以及合理制定植被恢复措施提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况及人工减雨处理

研究区位于陕西省咸阳市永寿县槐平林场(34.80°N, 107.97°E,海拔 1 430 m),属于黄土高原沟壑区的暖温带大陆性季风气候区。年均气温 10.8℃,年均降水量 601.6 mm,主要集中在 7—9 月,年潜在蒸散约

807.4 mm, 年际间降雨量变化较大^[24]。刺槐人工林固定样地(20 m×20 m)布设于东北向坡面, 坡度约 25°, 本试验开始前已经开展了关于林分生长和土壤水分等多个项目的调查和监测。将样地均匀分割为东西两块分别作为对照和处理样地, 于 2015 年 4 月开始在处理样地行间布设高 1—2 m、宽约 0.5 m 的截雨板, 将部分穿透雨导流至样地外, 用铝塑板隔离边界, 插入土壤中约 80 cm 深度。通过设置穿透雨收集筒, 测量多次降雨事件的林分平均穿透雨比例, 并依据截雨板面积比例计算得到处理样地人工减雨约为总降雨量的 47.5%^[25]。

1.2 环境因子监测

在样地外空旷处安装气象要素监测装置, 对太阳辐射、空气温湿度、风速和降雨等气象因子进行实时连续监测。太阳辐射(R_s , W/m²)利用水平安装在 2 m 高处的 LI-200 型传感器(美国 Li-Cor 公司)测量; 测量空气温度(T_a , °C)和相对湿度(RH, %)的 HMP110 型温湿度传感器(芬兰 Vaisala 公司)安装于 1.8 m 高处的防辐射罩内; 降雨量(P)由放置于距地面 0.5 m 处的翻斗式自记雨量计(Davis7852, 美国 Davis 公司)测量。使用 CR1000 数据采集器(美国 Campbell 公司)对上述传感器每 30 s 进行一次数据读取, 记录每 30 min 的平均值。采用空气水汽压亏缺(VPD, kPa)综合反映空气温度和湿度的协同作用, 计算公式如下^[26]:

$$VPD = 0.611 \exp\left(\frac{17.502T_a}{T_a + 240.94}\right)(1 - RH) \quad (1)$$

在对照和减雨处理样地各安装一套土壤水分自动监测系统, 在 100 cm 深度的土壤剖面上设置 6 个 S-SMC-M005 型土壤水分探头(美国 Onset 公司), 实时监测不同深度土壤含水量(SWC)变化动态, 采用 H21-002 型数据采集器(美国 Onset 公司)每 60 s 读取一次数据, 记录每 1 h 的平均值。整个 0—100 cm 土层的平均土壤含水量通过计算不同深度探头测得土壤含水量的加权平均值获得^[27]。

1.3 树干边材液流测定

采用 Granier 型热扩散探针对 14 株生长正常且有代表性的刺槐样树进行树干液流长期监测, 对照区和减雨处理区各 7 株, 样树基本信息见表 1。在每株样树树干胸高部位的南北方位各安装一组探针, 包括加热探针和参考探针, 垂直间隔约 15 cm, 采用专用直流调节装置为加热探针提供恒定电流以达到 0.15 W 的持续加热^[28], 采用 CR1000 数据采集器每 30 s 读取一次加热探针和参考探针的温度差, 记录每 30 min 的平均值。根据 Granier 经验公式^[29]计算液流

通量密度, 公式如下:

$$F_d = 119 \times \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T}\right)^{1.231} \quad (2)$$

式中: F_d 为树干液流通量密度[ml/(m²·s)]; ΔT 为加热探针和参考探针之间的温度差(°C); ΔT_{\max} 为最大温度差(°C), 通常是每日凌晨液流通量密度接近于零时的温度差。使用 Baseline 软件(Version 4.0)确定每日的最大温度差值并计算液流通量密度, 由于刺槐的活跃边材厚度较小从而可能造成较大的测定误差^[30], 确定每株样树的边材厚度后对于边材小于探针长度的实测液流通量密度进行矫正^[31], 将南北两侧探针同时段测定值的平均值作为该株样树的测定值, 矫正公式如下:

$$\Delta T_{sw} = \frac{\Delta T - (1 - a)\Delta T_{\max}}{a} \quad (3)$$

式中: ΔT_{sw} 为所测样树加热探针和参考探针之间的真正温度差值; ΔT 为加热探针和参考探针之间实际测得的温度差值(°C); ΔT_{\max} 为最大温度差(°C); a 为所测样树的边材厚度与探针长度的比值。

边材厚度的测定采用染色法和拟合方程相结合的方法。抽取样地内外生长的刺槐(共 27 株), 在树干胸高处注入番红试剂染色, 利用生长锥钻取上侧木芯测得活跃边材厚度, 统计得出胸径 DBH(cm)与边材面积 A_s (cm²)的关系方程^[25]: $A_s = 0.0418DBH^{0.9619}$ ($R^2 = 0.7483$)。

因样树间胸径和边材面积存在一定差异, 采用测定样树的边材面积作为加权因子分别计算减雨处理 and 对照样地平均液流通量密度^[32], 通过样地平均液流通量密度计算林分蒸腾速率, 如下所示:

$$J_s = \frac{\sum_{i=1}^N (A_{s_i} \times F_{d_i})}{\sum_{i=1}^N A_{s_i}} \quad (4)$$

$$E_t = \frac{J_s \times A_{ST}}{A_G} \quad (5)$$

式中: J_s 为样地平均液流通量密度[ml/(m²·s)]; i 为测定样树编号; N 为测定样本总数; F_{d_i} 为样树 i 的液流通量密度; A_{s_i} 为样树 i 的边材面积; A_{ST} (m²)为样地内全部个体的总边材面积; A_G 为样地面积(m²); E_t 为样地林分蒸腾速率($\mu\text{m/s}$)。

1.4 数据分析与处理

本文涉及液流数据为 2017 年 5—8 月期间典型天气(包括多云天气但非阴天和雨天)的监测值。用 Excel 2019 软件对数据进行整理和初步计算, 采用 Köstner^[33]建立的简化公式计算冠层气孔导度 G_s [mol/(m²·s)], 公式如下:

$$G_s = \frac{E_t}{18LAI} \rho G_v \frac{T_a + 273}{VPD} \quad (6)$$

式中: E_t 为样地林分蒸腾速率($\mu\text{m/s}$);LAI为样地的叶面积指数; ρ 是水的密度值(998 kg/m^3); T_a 为空气温度($^{\circ}\text{C}$); G_v 为气体常数[$0.462\text{ m}^3\cdot\text{kPa}/(\text{kg}\cdot\text{K})$];VPD为空气水汽压亏缺(kPa),差异显著性检验用SPSS 26.0统计软件,采用线性回归拟合分析冠层气孔导度与气象因子的响应关系。

表1 供试样树基本信息

样地	样树号	树高/m	胸径/cm	边材面积/cm ²
对照样地	1	20.4	19.4	12.2
	2	17.3	14.3	6.2
	3	20.5	26.6	24.6
	4	18.9	20.7	14.1
	5	18.2	16.8	8.8
	6	20.3	19.3	12.1
	7	20.6	26.6	24.6
	8	19.3	20.7	18.6
	9	15.3	16.2	10.1
	10	10.9	10.4	3.4
处理样地	11	16.4	15.0	8.4
	12	19.7	23.6	25.7
	13	11.1	10.9	3.8
	14	15.3	12.8	5.7

2 结果与分析

2.1 环境因子变化特征

2017年5—8月,太阳辐射(R_s)、空气水汽压亏缺(VPD)、空气温度(T_a)、相对湿度(RH)、土壤含水量(SWC)和降雨量(P)的变化如图1所示。日均空气温度的变化范围 $9.75\sim 28.04^{\circ}\text{C}$,高值出现在7月份;日均空气湿度变化范围 $28.04\%\sim 100\%$,高湿度的阴雨天在8月出现较多;日均太阳辐射变化范围 $19.51\sim 355.95\text{ W/m}^2$,阴雨天较多的8月份大多低于其他月份;日均空气水汽压亏缺变化范围 $0\sim 2.48\text{ kPa}$ 。

土壤水分与降雨量密切相关,土壤含水量伴随降雨事件而上升。5—8月对照样地平均土壤含水量 $0.224\text{ m}^3/\text{m}^3$,减雨处理样地平均土壤含水量 $0.188\text{ m}^3/\text{m}^3$,可以看出对照样地土壤含水量明显高于减雨处理样地且波动较大。

2.2 冠层气孔导度日变化特征

在2017年生长季的5—8月每月选取一个典型天气(48 h内无降雨),分析对照、减雨处理样地刺槐冠层气孔导度的日变化过程(图2)。两个样地刺槐冠层气孔导度日变化均与空气水汽压亏缺和太阳辐射保持相同的趋势,但冠层气孔导度峰值的时间大多提前于太阳辐射和空气水汽压亏缺的峰值时间,减雨处理样地的冠层气孔导度整体上低于对照样地。在4个不同月份的日变化进程中,蒸腾驱动因子(太阳

辐射和空气水汽压亏缺)总体水平相近,但冠层气孔导度峰值大小有明显变化,两样地7月份的冠层气孔导度都明显大于其他月份,应该与林分叶面积变化等物候节律或土壤水分等环境因素有关。

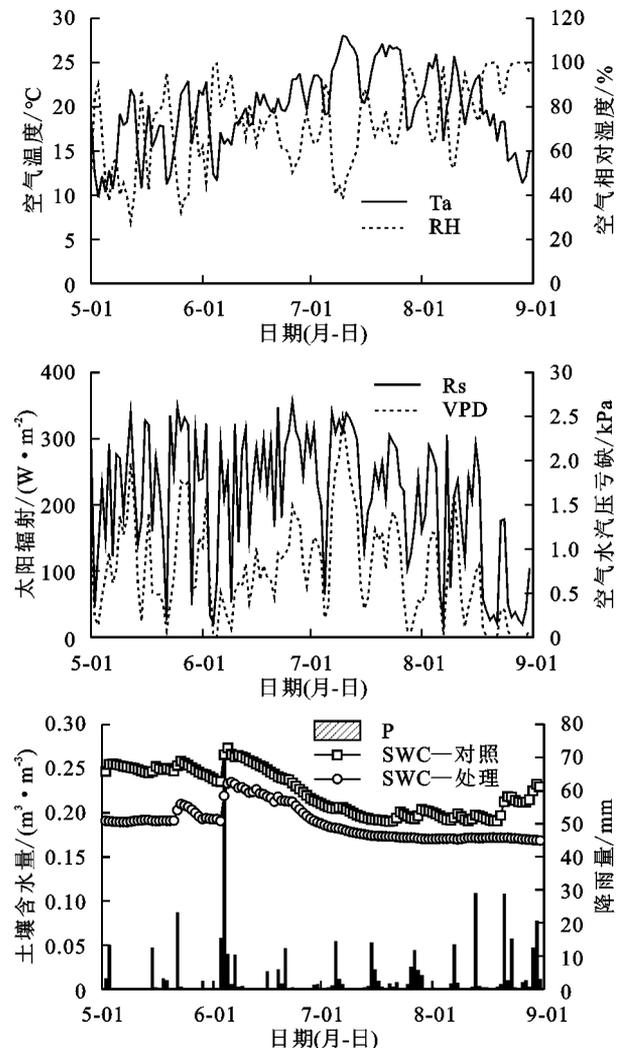


图1 2017年5—8月环境因子日变化动态

2.3 冠层气孔导度对蒸腾驱动因子的响应

因该年度生长季前期降雨较为充沛且平均土壤含水量高于后期,将试验期间划分为生长季前期(5—6月)和后期(7—8月)两个阶段分析晴和多云等正常蒸腾天气(日均VPD $>0.6\text{ kPa}$)日均冠层气孔导度对太阳辐射和空气水汽压亏缺的响应关系,结果显示,日均冠层气孔导度与太阳辐射和空气水汽压亏缺的响应关系可分别采用线性和对数曲线方程拟合,减雨处理样地的拟合曲线斜率整体低于对照样地(图3),说明减雨处理削弱了冠层气孔导度与蒸腾驱动因子间的响应关系。同一样地在生长前期的拟合曲线斜率较高于生长后期。进一步对各样地冠层气孔导度、蒸腾驱动因子和土壤含水量在生长季前、后期的变化动态进行分析发现(图4),尽管日平均太阳辐射与空气水汽压亏缺在生长前、后期相近,两个样地的平均

土壤含水量和日均冠层气孔导度在生长季前期均高于后期,但仅土壤含水量差异为显著水平($p < 0.05$),说明土壤含水量对冠层气孔导度平均水平具有一定

影响;减雨处理和对照样地之间的平均土壤含水量和日均冠层气孔导度都达到显著水平,更加证实土壤水分条件对冠层气孔导度平均水平的重要作用。

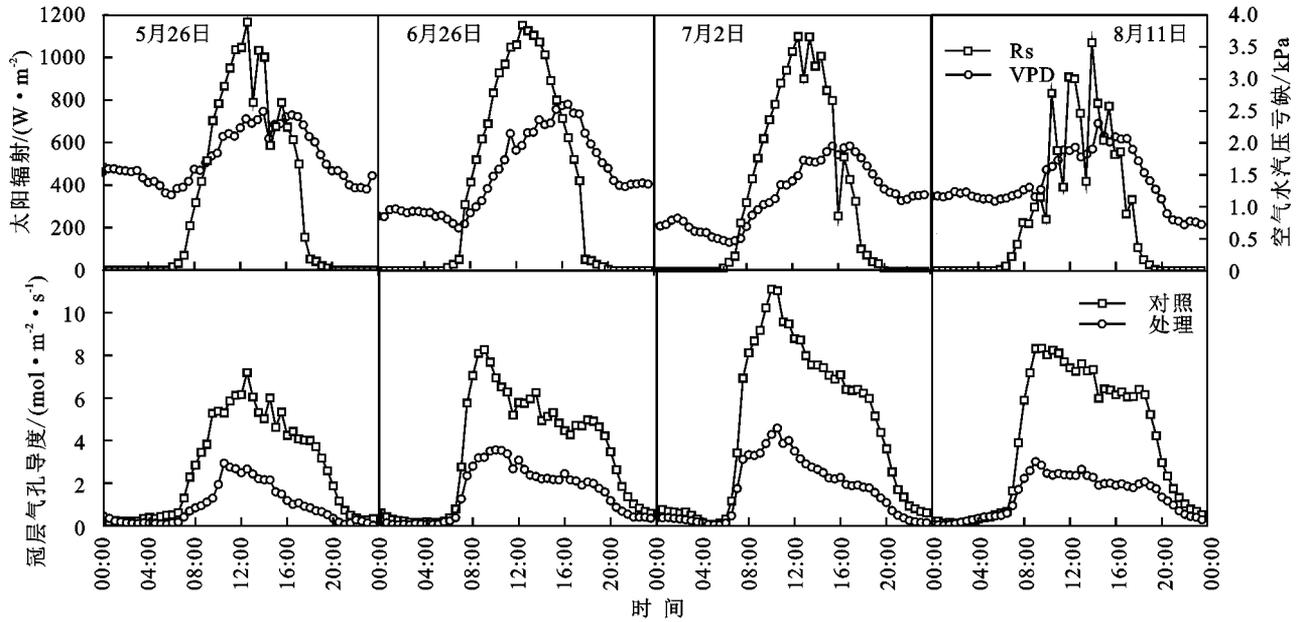


图2 晴天刺槐冠层气孔导度(Gs)、空气水汽压亏缺(VPD)和太阳辐射(Rs)日变化动态

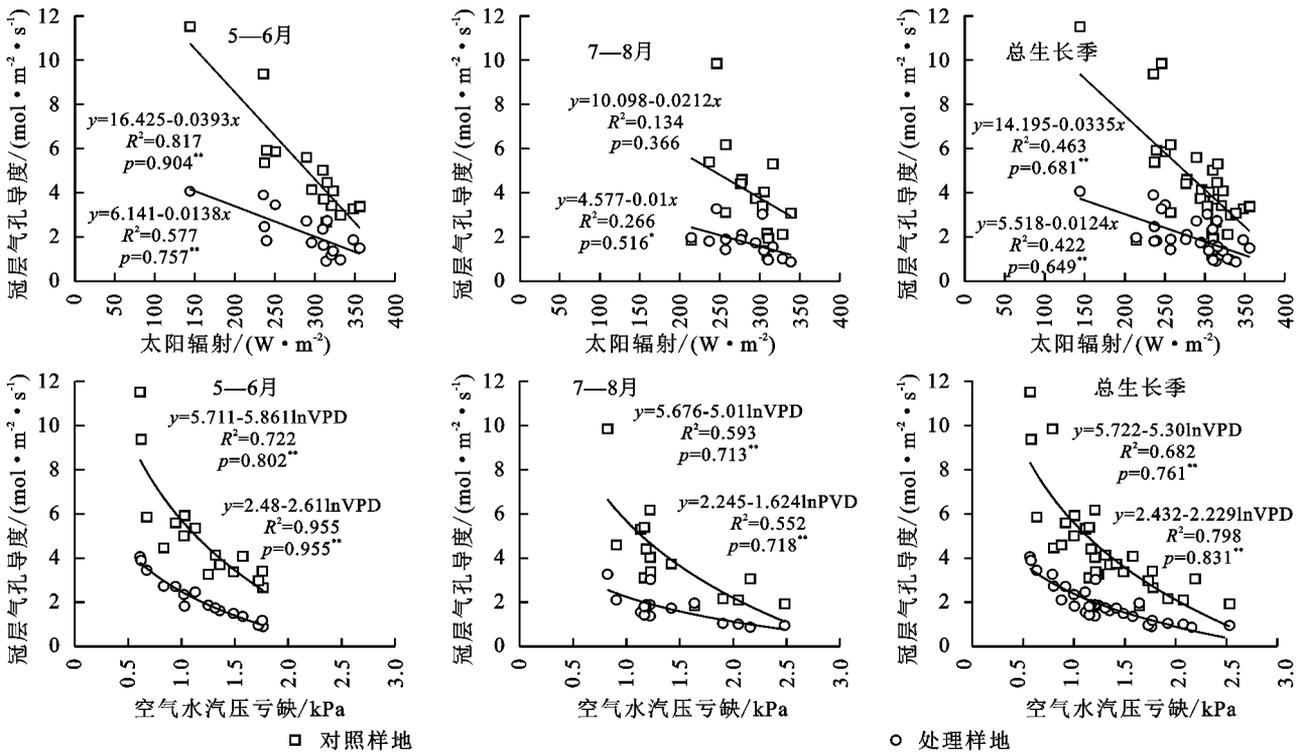


图3 日均冠层气孔导度与太阳辐射、空气水汽压亏缺在生长季前期(5—6月)、后期(7—8月)及整个生长季的拟合关系

2.4 冠层气孔导度对空气水汽压亏缺响应的敏感性

植物通过气孔调节行为控制气孔导度进而保护叶片免于过度失水是应对过高的空气水汽压亏缺和土壤干旱胁迫的重要途径。图3的回归分析表明,刺槐日均冠层气孔导度与空气水汽压亏缺可采用对数方程 $G_s = G_{sref} - m \ln VPD$ 进行拟合,该方程作为分析气孔调节行为对环境因子敏感性的工具已被广泛

应用, m 可表征气孔导度对空气水汽压亏缺的敏感性, G_{sref} 是以空气水汽压亏缺为 1 kPa 时的气孔导度表征的参比冠层气孔导度^[12,34]。对生长季前期、后期和全生长季内的方程拟合参数 m 和 G_{sref} 进行分析发现(图5),对照样地的敏感性和参比冠层气孔导度均明显高于减雨处理样地。同一样地不同时期的 G_{sref} 十分相近,但在生长季前期的 m 略高于生长季

后期,可能也与生长季前期的土壤含水量高于后期相关联。此外,减雨处理样地 m/G_{ref} 比值均小于对照样地,但仍然大于大多数树种的正常值 0.6^[34],说明

该地区刺槐林分总体上响应空气水汽压亏缺的能力强,实施减雨处理后调控能力有所下降,但维持在正常水平。

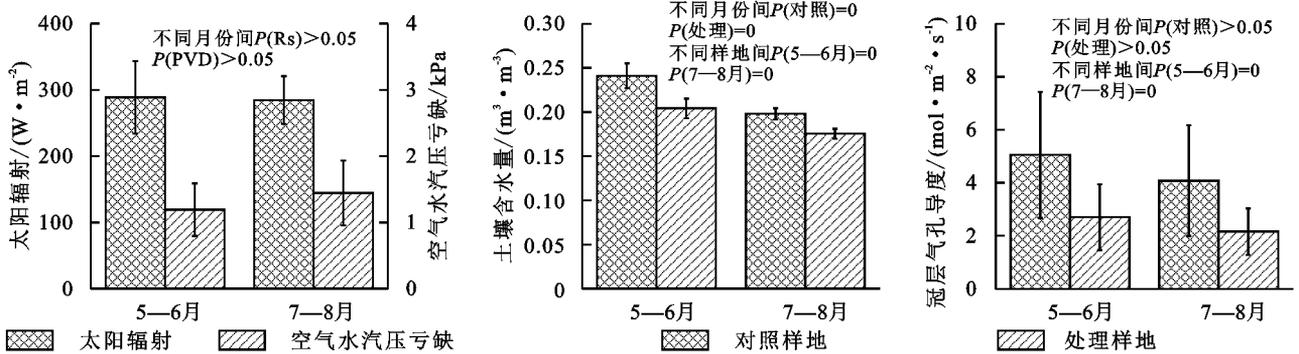


图4 日均冠层气孔导度、太阳辐射、空气水汽压亏缺和土壤含水量在生长前期(5—6月)、后期(7—8月)及样地之间的差异(平均值±标准差)

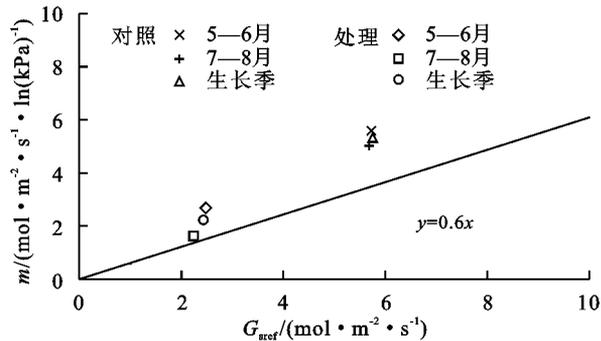


图5 刺槐冠层气孔导度对空气水汽压亏缺响应敏感性与参比冠层气孔导度的关系

3 讨论

3.1 冠层气孔导度变化特征

冠层气孔导度日变化过程随蒸腾驱动因子呈明显的规律性波动,但变化进程和格局并不同步^[13]。受生长季各月间林分叶面积变化等物候节律或土壤水分等环境因素的影响,减雨处理样地刺槐日冠层气孔导度整体上低于对照样地,同时两样地冠层气孔导度峰值大小均在7月明显大于其他月份。有研究发现侧柏(*Platycladus orientalis*)日冠层气孔导度在水热条件较充足的7月上升至峰值后有小幅波动,随后逐渐下降,其他月份冠层气孔导度上升的速度和峰值均小于7月^[3,12]。油松(*Pinus tabulaeformis*)冠层气孔导度的日变化范围大于元宝槭(*Acer truncatum*),由于5—7月是树木生长旺季,两树种日冠层气孔导度的上升时间早于8—9月^[35]。马占相思(*Acacia mangium*)在不同月份的冠层气孔导度日变化趋势一致,但到达峰值的时间存在一定差异^[36]。荷木(*Schima superba*)在干季的日均冠层气孔导度小于湿季,但仍处于较高水平,说明该树种在适应土壤水分亏缺和在时间、空间上充分利用光热资源等方面具有优势^[37]。不同树种冠层气孔导

度特征存在一定差异,如荷木在不同季节的日均冠层气孔导度均显著高于大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)和柠檬桉(*Eucalyptus citriodora*)^[14]。

3.2 冠层气孔导度对蒸腾驱动因子的响应及敏感性

太阳辐射和空气水汽压亏缺是影响林木蒸腾重要的大气因子^[38],空气水汽压亏缺在驱动冠层气孔导度和调节整树及林分冠层蒸腾的过程中会受到太阳辐射、树木水力特性和土壤含水量等其他因子的综合影响^[39]。刺槐日均冠层气孔导度与日均太阳辐射和空气水汽压亏缺分别具有较好的拟合关系,但减雨处理导致样地的拟合斜率明显低于对照样地,冠层气孔导度对空气水汽压亏缺的敏感性(m)和参比冠层气孔导度(G_{ref})也相应降低,同时敏感性(m)在降雨较多的生长季前期较高,说明土壤水分在冠层气孔导度响应蒸腾驱动因子的过程中具有重要作用。敏感性与植物水分利用效率具有较强的相关性^[40],研究冠层气孔导度对空气水汽压亏缺响应的敏感性有利于衡量植物对环境的适应能力^[41]。土壤含水量高时,侧柏、大叶相思和柠檬桉等树种气孔的调节能力增强,冠层气孔导度对空气水汽压亏缺的响应更敏感^[12,14]。荷木冠层气孔导度对空气水汽压亏缺响应存在季节性差异,且在土壤水分充足的湿季更敏感^[6]。而土壤水分胁迫时,空气水汽压亏缺的增加代表了生态系统中植物碳吸收和水分利用的一个独立限制因素^[42]。随着土壤水分降低,欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)气孔对空气水汽压亏缺的敏感性下降幅度高于油松,蒸腾作用也较弱^[43]。马占相思冠层气孔导度在长期土壤水分亏缺时明显较低^[36]。华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)冠层气孔导度在土壤水分低于阈值41%后随之下降^[4]。在相对干燥的环境中,敏感性与参比冠层气孔导度会因树种而异,如欧洲云杉(*Picea abies*)冠层气孔导度对空气水汽压亏缺的敏感性

小于火炬松(*Pinus taeda*)^[44-45]。还有研究发现相比于成熟和幼龄的欧洲赤松(*Pinus sylvestris*),半成熟林的气孔对空气水汽压亏缺的敏感性较高^[8]。

研究表明多数植物的 m 与 G_{sref} 存在斜率约为 0.6 的线性关系,土壤养分、土壤水分和树木水力特性等会对 m/G_{sref} 值产生影响。本研究发现两个样地的 m/G_{sref} 在不同生长时期均大于大多数树种的正常值 0.6^[34],说明该地区刺槐林分总体上响应空气水汽压亏缺的能力较强。通过比较黄土高原半湿润气候区永寿和半干旱气候区延安刺槐的冠层气孔导度发现由于气候类型和降雨格局不同,永寿刺槐气孔调节对空气水汽压亏缺的敏感性较高,在生长方面更有优势^[9]。

黄土高原地区降水格局发生变化时,刺槐可能会倾向于调整水分利用策略并对干旱环境产生一定的适应性。本文仅对比减雨和对对照样地刺槐冠层气孔导度响应蒸腾驱动因子及对空气水汽压亏缺敏感性的差异,未来应在已有的试验基础上增加不同降雨梯度的控水试验,在更大的时间尺度上探究黄土高原地区刺槐能否真正适应干旱胁迫下的土壤水分状况,并估测影响冠层气孔导度的土壤含水量阈值,分析土壤水分胁迫如何影响气孔对冠层蒸腾的调控。为今后黄土高原地区植被恢复、优化布局、提高林分管理水平和林业生产等方面提供借鉴。

4 结论

本研究通过监测黄土高原地区刺槐样树的树干液流动态并结合同步观测的太阳辐射和空气水汽压亏缺数据,重点对比了减雨处理环境下刺槐冠层气孔导度日变化特征及分别在生长季前、后期冠层气孔导度对蒸腾驱动因子(太阳辐射和空气水汽压亏缺)响应的敏感性差异,得出如下结论:

在生长季,刺槐冠层气孔导度日变化与空气水汽压亏缺和太阳辐射保持相同趋势,但减雨处理样地冠层气孔导度整体偏低。刺槐叶片的气孔控制能力较强,冠层气孔导度与蒸腾驱动因子具有较好的拟合关系,减雨处理会导致拟合斜率明显低于对照样地,冠层气孔导度对空气水汽压亏缺的敏感性和参比冠层气孔导度也相应降低。由于生长季前期的降雨量充沛,两个样地的拟合斜率、敏感性和参比冠层气孔导度均均高于生长后期,进一步说明土壤水分胁迫会降低冠层气孔导度响应蒸腾驱动因子的敏感性。

参考文献:

[1] 李仙岳,杨培岭,任树梅,等.樱桃冠层导度特征及模拟[J].生态学报,2010,30(2):300-308.
[2] 张浩,王新平,张亚峰,等.干旱荒漠区不同生活型植物

生长对降雨量变化的响应[J].生态学报,2015,34(7):1847-1853.
[3] 刘文娜,贾剑波,余新晓,等.华北山区侧柏冠层气孔导度特征及其对环境因子的响应[J].应用生态学报,2017,28(10):3217-3226.
[4] 孙林,管伟,王彦辉,等.华北落叶松冠层平均气孔导度模拟及其对环境因子的响应[J].生态学报,2011,30(10):2122-2128.
[5] 赵楠,朱高峰,张扬,等.干旱绿洲区葡萄冠层上下方叶片气孔导度特征[J].兰州大学学报:自然科学版,2021,57(4):510-517.
[6] 曹庆平,赵平,倪广艳,等.华南荷木林冠层气孔导度对水汽压亏缺的响应[J].生态学报,2013,32(7):1770-1779.
[7] 许文滔,赵平,王权,等.基于树干液流测定值的马占相思(*Acacia mangium*)冠层气孔导度计算及数值模拟[J].生态学报,2007,27(10):4122-4131.
[8] Deng J, Yao J, Zheng X, et al. Transpiration and canopy stomatal conductance dynamics of Mongolian pine plantations in semiarid deserts, Northern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2021,249(8):106806.
[9] Lyu J, He Q Y, Chen Q W, et al. Distinct transpiration characteristics of black locust plantations acclimated to semi-arid and subhumid sites in the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2022,262:107402.
[10] 陈胜楠,孔喆,陈立欣,等.半干旱区城市环境下油松林分蒸腾特征及其影响因子[J].生态学报,2020,40(4):1269-1280.
[11] 朱丽薇,赵平,蔡锡安,等.荷木人工林蒸腾与冠层气孔导度特征及其对环境因子的响应[J].热带亚热带植物学报,2010,18(6):599-606.
[12] 颜成正,郑文革,贾剑波,等.控水条件下侧柏冠层气孔导度对土壤水的响应[J].应用生态学报,2020,31(12):4017-4026.
[13] 韩磊,何俊,齐拓野,等.宁夏河东沙区侧柏冠层气孔导度对环境因子的响应及其模拟[J].生态学报,2018,37(9):2862-2868.
[14] 胡彦婷,赵平,牛俊峰,等.3种植物恢复树种的冠层气孔导度特征及其对环境因子的敏感性[J].应用生态学报,2015,26(9):2623-2631.
[15] 赵平,饶兴权,马玲,等.马占相思林冠层气孔导度对环境驱动因子的响应[J].应用生态学报,2006,17(7):1149-1156.
[16] 吉珍霞,侯青青,裴婷婷,等.黄土高原植物对季节性干旱的敏感性响应[J].干旱区地理,2022,45(2):557-565.
[17] 单长卷,梁宗锁,韩蕊莲,等.黄土高原陕北丘陵沟壑区不同立地条件下刺槐水分生理生态特性研究[J].应用生态学报,2005,16(7):1205-1212.
[18] 姜萍,潘新民,曾雪莹.中国不同农业区气温和降水时空演变格局分析[J].水土保持研究,2020,27(4):270-278.
[19] Lü Y, Fu B, Feng X, et al. A policy-driven large scale

- ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. *Plos One*, 2012,7(2):e31782.
- [20] 潘迪,毕华兴,次仁曲西,等.晋西黄土区典型森林植被耗水规律与环境因子关系研究[J].北京林业大学学报,2013,35(4):16-20.
- [21] 王百田,张府娥.黄土高原主要造林树种苗木蒸腾耗水特性[J].南京林业大学学报:自然科学版,2003,46(6):93-97.
- [22] 茹桃勤,李吉跃,孔令省,等.刺槐耗水研究进展[J].水土保持研究,2005,12(2):135-140.
- [23] 袁瀛,惠养瑜,吴永麟,等.黄土丘陵区刺槐生长的影响因素研究[J].水土保持研究,1996,3(3):146-154.
- [24] Wang Z H, Miao Y F, Li S X. Effect of ammonium and nitrate nitrogen fertilizers on wheat yield in relation to accumulated nitrate at different depths of soil in drylands of China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 183:211-224.
- [25] 何秋月.黄土高原半湿润区刺槐人工林蒸腾耗水特征对降雨减少的响应[D].杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [26] Campbell G, Norman J. An introduction to environmental biophysics[M].New York: Springer,1998,50-51.
- [27] Wilson K B, Hanson P J, Mulholland P J, et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106(2):153-168.
- [28] James S A, Clearwater M J, Meinzer F C, et al. Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in trees with deep sapwood[J]. *Tree Physiology*, 2002,22(4):277-283.
- [29] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987,3(4):309-320.
- [30] Schwärzel K, Zhang L, Strecker A, et al. Improved water consumption estimates of black locust plantations in China's Loess Plateau[J]. *Forests*, 2018, 9(4):201.
- [31] Clearwater M J, Meinzer F C, Andrade J L, et al. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes [J]. *Tree Physiology*, 1999,19(10):681-687.
- [32] Kumagai T O, Aoki S, Shimizu T, et al. Sap flow estimates of stand transpiration at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed[J]. *Tree Physiology*, 2007,27(2):161-168.
- [33] Köstner B M M, Schulze E D, Kelliher F M, et al. Transpiration and canopy conductance in a pristine broad-leaved forest of *Nothofagus*: an analysis of xylem sap flow and eddy correlation measurements[J]. *Oecologia*, 1992,91(3):350-359.
- [34] Oren R, Sperry J, Katul G, et al. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1999,22(12):1515-1526.
- [35] 陈胜楠,陈左司南,张志强.北京山区油松和元宝槭冠层气孔导度特征及其环境响应[J].植物生态学报,2021,45(12):1329-1340.
- [36] 赵平,饶兴权,马玲,等.基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度[J].植物生态学报,2006,30(4):655-665.
- [37] 曾小敏,赵平,欧阳磊,等.荷木对干湿季土壤水分的利用和适应性调节[J].热带亚热带植物学报,2017,25(2):105-114.
- [38] Granier A, Breda N. Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements[J]. *Annales Des Sciences Forestières*, 1996,53(2):537-546.
- [39] Tang J, Bolstad P V, Ewers B E, et al. Sap flux-upscaled canopy transpiration, stomatal conductance, and water use efficiency in an old growth forest in the Great Lakes region of the United States[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2006,111(G2):G02009.
- [40] Jasechko S, Sharp Z D, Gibson J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration[J]. *Nature*, 2013,496(7445):347-350.
- [41] Wehr R, Commans R, Munger J W, et al. Dynamics of canopy stomatal conductance, transpiration, and evaporation in a temperate deciduous forest, validated by carbonyl sulfide uptake[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(2):389-401.
- [42] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes[J]. *Nature Climate Change*, 2016,6(11):1023-1027.
- [43] Song L, Zhu J, Zheng X, et al. Comparison of canopy transpiration between *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Pinus tabulaeformis* plantations in a semiarid sandy region of Northeast China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022,314:108784.
- [44] Ouyang L, Zhao P, Rao X, et al. Interpreting the water use strategies of plantation tree species by canopy stomatal conductance and its sensitivity to vapor pressure deficit in South China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2022,505:119940.
- [45] Ewers B, Oren R, Kim H S, et al. Effects of hydraulic architecture and spatial variation in light on mean stomatal conductance of tree branches and crowns[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2007,30(4):483-496.