

土壤-刺槐系统水流阻力对水分胁迫的响应

武小飞^{1,2}, 杨帆², 岩晓莹^{1,2}, 郭天崎^{1,2}, 朱溢远^{1,2}, 黄明斌²

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水土保持研究所 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)

摘要:为探究土壤-刺槐系统水流阻力对水分胁迫的响应情况,通过盆栽试验方法设置 8 个水分梯度(田间持水量的 30%~100%),研究了两年生刺槐在生长季内的蒸腾速率、根水势、叶水势及土壤-刺槐系统水流阻力等的变化。结果表明:(1)刺槐蒸腾速率、根水势及叶水势随水分含量的增加表现出先增大后保持稳定的趋势。蒸腾速率在 30%~70%的田间持水量范围随水分含量的增加而迅速增大,根、叶水势在 30%~50%的田间持水量范围增长最快,此后基本稳定;(2)土壤阻力、根系总阻力、植物传导阻力及叶-气阻力均随水分含量的增加而减小,均在 30%~50%的田间持水量范围减小最快,其在生长季内大小为 7 月>10 月>8 月>9 月;(3)土壤-刺槐系统总阻力的变化趋势与叶-气阻力相近,是由于叶-气阻力占总阻力的 96.0%以上,并对总阻力的调节起主导作用。根据我们的研究结果推测刺槐在大于 50%田间持水量范围,可保持健康、可持续生长。

关键词:土壤-刺槐系统;水分胁迫;蒸腾速率;水势;水流阻力

中图分类号:S152.7⁺5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0274-07

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2022.02.037

Response of Hydraulic Resistances of Soil-*Robinia pseudoacacia* System to Water Stress

WU Xiaofei^{1,2}, YANG Fan², YAN Xiaoying^{1,2}, GUO Tianqi^{1,2}, ZHU Miyuan^{1,2}, HUANG Mingbin²

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2.State key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore the response of hydraulic resistances in the soil-*Robinia pseudoacacia* system to water stress, changes of transpiration rate, root water potential, leaf water potential of the 2-year-old *Robinia pseudoacacia* and hydraulic resistances of soil-*Robinia pseudoacacia* system were identified and calculated by pot experiments under 8 water gradients which were 30%, 40%, ..., and 100% of field capacity. The results showed that: (1) transpiration rate, root water potential, and leaf water potential of *Robinia pseudoacacia* showed a trend of increasing and then remaining stable with the improvement of soil water content, and transpiration rate increased in the range of 30%~70% of field capacity, while root water potential and leaf water potential increased in the range of 30%~50% of field capacity; (2) soil resistance, total root resistance, plant transportation resistance and leaf-air resistance decreased with the increment of the water content, especially in the range of 30%~50% of field capacity, and they changed slightly when the soil water content was above 50%; the values of each resistance decreased in the order: July>October>August>September; (3) the total hydraulic resistance of the soil-*Robinia pseudoacacia* system was similar to leaf-air resistance, as leaf-air resistance accounted for more than 96.0% of its value and played a predominant role in the adjustment of total hydraulic resistance. According to these results of the research, we speculate the plants of *Robinia pseudoacacia* can ensure heathy and sustainable growth in the soil with greater than 50% of field capacity.

收稿日期:2021-03-03

修回日期:2020-03-19

资助项目:中国科学院先导性项目 B 类子课题“黄土高原植被-水分相互作用及其对气候变化的响应过程”(XDB20020202)

第一作者:武小飞(1995—),男,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为土壤物理。E-mail:wuxiaofei@nwfau.edu.cn

通信作者:黄明斌(1968—),男,湖北荆门人,博士,研究员,主要从事生态水文和土壤物理研究。E-mail:hmbd@nwfau.edu.cn

Keywords: soil-*Robinia pseudoacacia* system; water stress; transpiration rate; water potential; hydraulic resistance

刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)是豆科落叶乔木,原产于北美地区。由于其耐旱耐贫瘠、速生、适应性强且固氮效果好等特性被我国北方地区广泛引种^[1],用于改善生态环境、防治水土流失,其面积达 177.8 万 hm^2 ^[2]。刺槐作为黄土高原主要的造林树种之一,其生长常受到不同程度的水分胁迫。水分胁迫不仅影响植物的生长发育,还会对植物的水力特性产生深远影响,如叶片气孔关闭^[3]、木质部水势随水分胁迫的加重呈指数下降^[4]、根系水流阻力增大导致根区吸水受限等^[5]。

按照 Van den Honert 模型(1948),在稳态流条件下,水分在土壤-植物-大气连续体系统(Soil-Plant-Atmosphere Continuum,简称 SPAC)传输的驱动力是水势差,水分传输受水势差和水流阻力的共同影响。水从土壤到根、茎、叶的液态水流传输是维持植物正常生长的基础^[6],从叶到大气以蒸腾为主的汽态传输是植物耗水的主要途径,无论是液态还是汽态水流传输,均受到水流阻力的影响。SPAC 系统的水流阻力主要包括土-根、茎-叶、叶-气阻力。邵明安等^[7]研究发现,水分从土壤输送到冬小麦根茎,水势降低 1.0 MPa,从根茎到叶片降低 0.3 MPa,从叶部汽化扩散到大气中降低 90.0 MPa。Zhang 等^[8]研究番茄发现,水势从土壤到根木质部降低 0.7~1.1 MPa,从根到叶片降低 0.8~1.2 MPa,从叶片到大气降低 81.2~166.8 MPa;水势的降低与各部分水流阻力相对应,水流阻力主要存在于从叶片气孔向大气扩散的环节。张喜英^[9]对冬小麦(*Triticum aestivum* L.)和夏玉米(*Zea mays* L.)等作物、巩玉霞^[10]对小叶锦鸡儿

(*Caragana microphylla* Lam.)和杨柴(*Hedysarum mongolicum* Turcz.)等灌木的研究结论与上述学者的相近,但水流阻力的绝对大小不同。有关水分胁迫对水流阻力影响的研究表明,植物受到轻度水分胁迫时,枝条木质部阻力是植物体水分传输的主要阻力,较强的枝条水流阻力有效地减少枝叶的水分散失^[11],使根部输送来的水分均匀分配,保证植物正常的生长发育;当植物遭遇严重的水分胁迫时,土壤水势下降,土壤水分与植物土-根界面的水势差减小^[12],根系木质化和栓化,使根系木质部阻力增大^[13],此时枝叶部位降低枝条阻力以竞争根系吸收的有限水分^[14],缓减水分胁迫对植物的伤害。确定水流阻力存在的主要位置和大小是描述植物对水分胁迫响应的基础,有助于定量研究植物水分传输过程。然而,目前对黄土高原土壤-刺槐系统水流阻力的研究较少。本研究旨在通过探究土壤-刺槐系统水流阻力的分布及时间变化,揭示土壤-刺槐-大气系统水分运移规律,为研究黄土高原刺槐对干旱环境的适应性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验在西北农林科技大学玻璃温室(34.27°N, 108.07°E)进行,温室配备完整的遮阳、控温、补光等设备,满足刺槐植株生长的光温条件。试验用土类型为杨凌塬土,室内的温度(T)范围为 18.0~30.0°C,相对湿度(RH)范围为 60.0%~80.0%。塬土的物理及化学性质见表 1。

表 1 土的物理及化学性质

土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤颗粒组成/%			土壤有机碳含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤全氮含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤全磷含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤碳氮比	田间持水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
	砂粒	粉粒	黏粒					
1.40	7.28	65.61	27.11	8.65	0.73	0.55	11.81	0.287

1.2 试验设计

试验设置了 8 个水分梯度,用以评估水分胁迫对土壤-刺槐系统水流阻力的影响。于 2019 年 4 月,将两年生的刺槐幼苗修剪后(保证相近的株高及根系分布)移栽至 10.8 L 容积的塑料盆中(塑料盆上直径 27 cm,下直径 22 cm,高度 31 cm),每盆 1 株,并于盆栽土表覆盖 1.5 kg,0.4~0.8 cm 的石英砂以抑制土表蒸发。试验用土为过 5 mm 筛的杨凌农田塬土,土壤容重为 1.40 g/cm^3 。于 4—5 月给所有盆栽充分浇水保持水分含量达到田间持水量,保证刺槐健康生长。

随后将所有盆栽随机均分为 8 组,进行水分处理,即田间持水量的(30±2.5)%,(40±2.5)%,(50±2.5)%,(60±2.5)%,(70±2.5)%,(80±2.5)%,(90±2.5)%和(100±2.5)%,每个水分处理包含刺槐 7 株。水分处理 1 个月后测定刺槐生长季内的水力特性,包括 7—10 月的蒸腾速率、根水势、叶水势等,从而计算水流阻力。试验期间的水分处理通过每 2 d 称取塑料盆重量完成补(控)水,并把刺槐生物量作为皮重去除(生物量取决于相对株高和叶面积,可用二者模拟计算出植株的生物量)。

1.3 试验内容与方法

1.3.1 土壤物理及化学性质测定 采用 Master sizer 2000 激光粒度仪 (Malvern Instruments, Malvern, England) 测定土壤颗粒组成, 并根据美国农业部粒级制进行土粒分级。土壤有机碳含量和全氮含量分别采用重铬酸钾外加热法和半微量凯氏定氮法测定。土壤全磷含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定。田间持水量参考吴元芝^[15]采用威尔科克斯法的测定结果。

1.3.2 蒸腾速率测定 刺槐叶片的蒸腾速率 [T_r , mmol/(m²·s)] 采用便携式光合仪 (Li-6400, LI-COR, USA) 测定, 于晴天上午 09:00—11:00 测定冠层向阳、发育良好、小枝中上部的完全展开叶, 在光合仪的菜单栏中输入叶面积随即测定 T_r 。叶面积 (LA, cm²) 采用经验公式^[16]: LA=LL·LW·X/100, X 为叶面积回归系数, 值为 0.7868。使用数显游标卡尺测定叶长 (LL)、叶宽 (LW, mm)。每个处理选择 3 株刺槐, 每株刺槐选取 3 片叶子。

1.3.3 叶水势、根水势和土壤水势测定 叶水势 (ψ_l ,

MPa) 的测定采用压力室仪 (Plant Moisture Stress, Model 1000, Albany, OR, USA), 在晴天的中午, 从每个处理的 3 棵植株上选择冠层部位相似、带有 10 片以上叶子的刺槐小枝, 立即取样并装入盛有湿巾的装样室, 多次测定以减少误差。根水势 (ψ_r , MPa) 的测定使用小液流法, 将刺槐根系从土壤中分离, 迅速装入冰盒, 带到实验室测定距盆栽土壤表面 5 cm 以下的根水势。由于根水势测定需要破坏刺槐生长的土壤, 故每月的根水势仅从各水分处理的 2 个盆栽中选取 3~4 条根系测定。土壤水势 (ψ_s , MPa) 通过土壤含水量与水分特征曲线计算得到^[15,17]。

1.3.4 根系扫描 使用扫描仪 (Cano Scan LIDE 300, Canon, Vietnam) 测定根系指标。将刺槐根系连同盆栽土壤装入 60 目的网袋, 用水冲洗至根系表面无明显土壤附着。随即带回实验室, 于 4℃ 冰箱中冷藏待测。待所有植株根系洗净, 使用根系扫描仪扫描根系, 通过 WinRHIZO Pro 2012b 软件分析获得各水分含量下刺槐根系的生长情况 (表 2)。

表 2 刺槐根系指标

土壤水分含量/%	根长密度/ (10 ⁹ cm·cm ⁻³)	根系体积/ (10 ³ cm ³)	根半径/ cm	根表面积/ (10 ³ cm ²)	根系 深度/cm
30	1.47±0.30b	0.49±0.07b	0.26±0.01a	2.53±0.39d	55.94±0.49bc
40	4.51±0.69ab	0.31±0.01b	0.16±0.01a	3.20±0.17cd	52.43±0.79d
50	7.77±0.80ab	1.08±0.35ab	0.19±0.03a	7.58±0.60abcd	64.24±1.40a
60	9.62±2.66a	1.95±0.58a	0.26±0.09a	10.68±2.09a	55.30±1.18cd
70	8.37±1.00ab	1.92±0.36b	0.20±0.03a	8.92±0.53ab	61.82±0.83a
80	9.00±2.95a	1.52±0.18ab	0.26±0.08a	8.79±2.02abc	66.05±0.50a
90	8.94±2.95a	1.04±0.43ab	0.14±0.01a	7.35±2.33abcd	58.80±0.26b
100	2.81±0.73b	1.03±0.35ab	0.24±0.03a	3.89±0.80bcd	58.74±0.45b

注: 数据组成为平均值±标准误差, 同一行的不同字母间表示不同处理间存在显著差异 ($p < 0.05$)。

1.4 数据分析

使用 Excel 2010 进行数据整理及计算均值、标准误差, 使用 Origin 2018 作图, 使用 SPSS 22 进行显著性分析, 并通过以下公式计算水流阻力:

1.4.1 土壤阻力 利用 Gardner^[18]通过对单根稳态流的研究给出的公式计算土壤阻力 (R_s):

$$R_s = \frac{\ln \frac{1}{\pi r^2 L}}{4\pi \cdot K(\theta) \cdot L \cdot Z_r} \quad (1)$$

式中: $K(\theta)$ 为土壤导水率 (cm/s); Z_r 为根系深度 (cm); L 为根长密度 (cm/cm³), 即单位体积土壤中的根系长度; r 为根半径 (cm); R_s 为土壤阻力 (s)。由 s 变换到 (MPa·m²·s)/mmol 需乘 1.764×10^{-10} 。

1.4.2 根系总阻力 根系总阻力 (R_r) 由土-根界面阻力、根系吸收阻力 (径向阻力) 和根系内木质部传导阻力 (轴向阻力) 组成。 R_r 由水势差与 T_r 求得:

$$R_r = \frac{\psi_s - \psi_r}{T_r} - R_s \quad (2)$$

式中: ψ_s 为土壤水势 (MPa); ψ_r 为植物根水势 (MPa); T_r 为植物叶片的蒸腾速率 [mmol/(m²·s)]; R_s 为根系总阻力 [(MPa·m²·s)/mmol]。

1.4.3 植物传导阻力 植物传导阻力 (R_p) 包括植物根到茎、叶的传输阻力, 计算公式为:

$$R_p = \frac{\psi_s - \psi_l}{T_r} - R_r - R_s \quad (3)$$

式中: ψ_l 是植物叶水势 (MPa); R_p 是植物传导阻力 [(MPa·m²·s)/mmol]。

1.4.4 叶-气系统的水流阻力 叶-气系统的水流阻力 (R_{la}) 由下列公式计算:

$$R_{la} = \frac{\psi_l - \psi_a}{T_r} \quad (4)$$

式中: ψ_a 为大气水势 (MPa); R_{la} 为叶-气系统水流阻

力[简称叶-气阻力($\text{MPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} / \text{mmol}$)]. ψ_a 使用以下公式算出^[19]:

$$\psi_a = 4.6248 \times 10^5 T \times \ln(\text{RH}) \quad (5)$$

式中: T 为林冠上空气的绝对温度(K); RH 为林冠上空气相对湿度(%).

1.4.5 土壤-植物系统总阻力 根据电模拟原理,SPAC系统中各部分阻力是串联的,故总阻力(R_t)为各分量的代数和,即:

$$R_t = R_{la} + R_p + R_r + R_s \quad (6)$$

式中: R_t 为土壤-植物系统的总阻力[($\text{MPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} / \text{mmol}$)].

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对生长季内刺槐蒸腾速率、根水势及叶水势的影响

图1A为不同水分处理下刺槐7—10月的 T_r 变化情况。各月的叶片 T_r 随水分含量的增加表现出先增大后维持稳定的趋势。 T_r 在30%~70%(或80%)的田间持水量范围随水分含量的增加而增大,当水分含量高于80%的田间持水量后 T_r 基本稳定。水分处理间的 T_r 存在显著差异,以8月为例,30%,

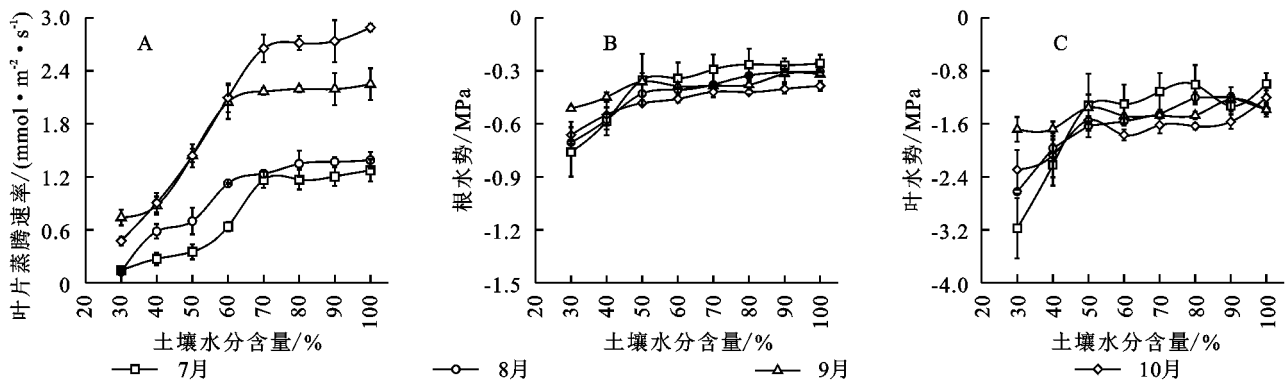


图1 生长季内刺槐蒸腾速率、根水势及叶水势随土壤水分含量的变化情况

2.2 土壤-刺槐系统各部分水流阻力对水分胁迫的响应

2.2.1 土壤阻力 图2A显示了 R_s 随水分含量的增加呈现减小的趋势。当水分含量低于50%的田间持水量时, R_s 随水分含量的增加而迅速减小;高于50%时 R_s 随水分含量的变化较小。对 R_s 进行显著性分析发现,30%与40%~100%的田间持水量范围的 R_s 存在显著差异,40%~100%水分范围的处理间无差异。

2.2.2 根系总阻力 图2B为生长季内 R_r 随土壤水分含量的变化情况。各月的 R_r 在50%的田间持水量以下随水分含量的增加而迅速减小,其中7月、8月的 R_r 减小最快;当水分含量高于50%的田间持水

40%~50%与60%~100%田间持水量间存在显著差异。生长季的刺槐叶片 T_r 于7—9月增大,10月减小。其中,9月和10月的叶片 T_r 变化趋势相近。

由图1B可知, ψ_r 随着水分含量的增加而增大。各月的 ψ_r 在50%的田间持水量处理以下随水分含量的增加而增大;当水分含量高于50%的田间持水量处理后, ψ_r 的增长较少。显著性分析表明水分处理间的 ψ_r 存在显著差异,其中8月的 ψ_r 在30%,40%,50%和60%~100%田间持水量处理下存在显著差异。从时间尺度上看,在30%~50%的田间持水量范围, ψ_r 于7—9月增大,10月减小;在50~100%的田间持水量范围, ψ_r 于7—10月呈降低趋势。

ψ_l (图1C)随时间及土壤水分含量的变化趋势与 ψ_r (图1B)相似。水分含量低于田间持水量的50%时, ψ_l 随着水分含量的增加而迅速增大;高于50%后其增长变缓。部分月份的 ψ_l 在50%~60%及80%~90%的田间持水量范围有变小的趋势。对 ψ_l 进行显著性分析发现,9月各水分处理间的 ψ_l 无显著差异,其他月的水分处理间存在显著差异。从时间尺度上看,水分含量低于田间持水量的50%时 ψ_l 的大小:9月>10月>8月>7月;高于50%时 ψ_l 的大小:7月>8月≈9月>10月。

量时, R_r 下降缓慢,且各水分处理的 R_r 在月份间的差异很小。显著性分析结果表明,水分处理间的 R_r 存在显著差异。总体来讲,7月、8月的 R_r 值较9月、10月的大。

2.2.3 植物传导阻力 R_p (图2C)随土壤水分含量的增加也呈现减小的趋势,其在30%~50%的田间持水量范围内减小的速率快,在50%的田间持水量以上减小速率变缓。 R_p 的显著性分析结果表明,7月、8月和10月的各水分处理间均存在显著差异,9月的水分处理间无差异。当水分含量低于50%的田间持水量时 R_p 的大小:7月>8月≈10月>9月;高于50%时 R_p 的大小:7月≈8月>9月≈10月,该范围的 R_p 差异较小。

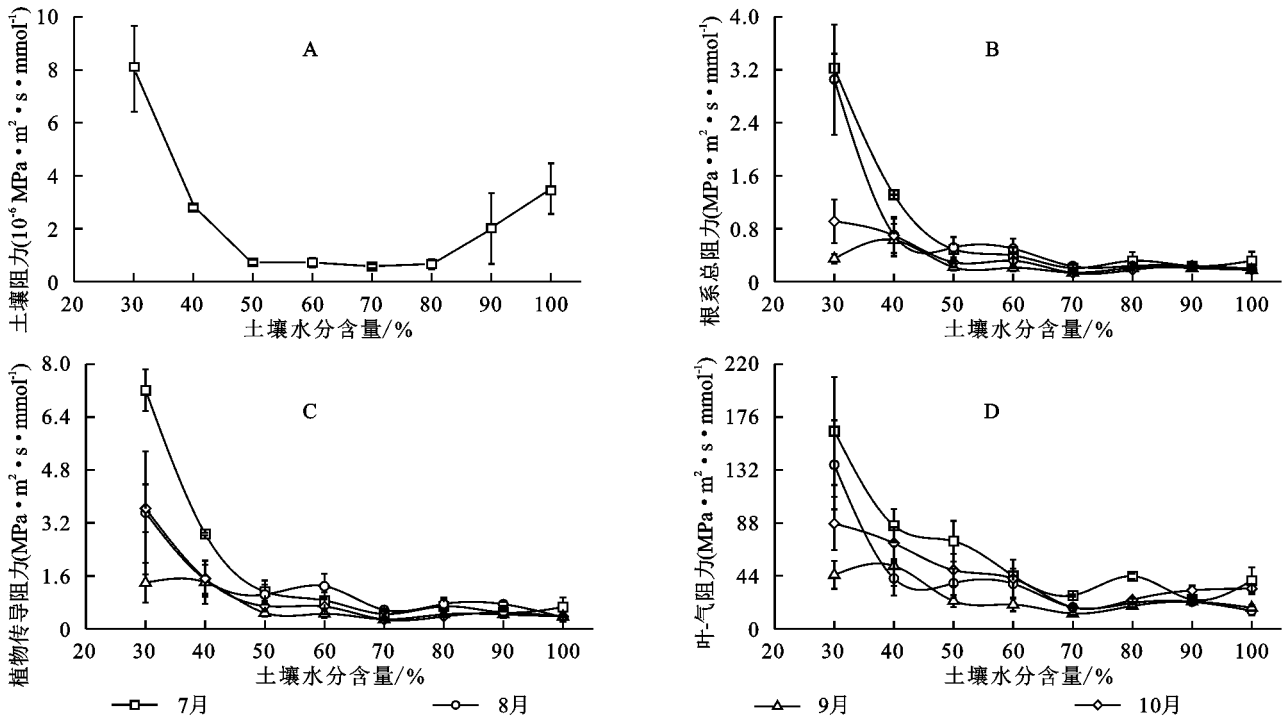


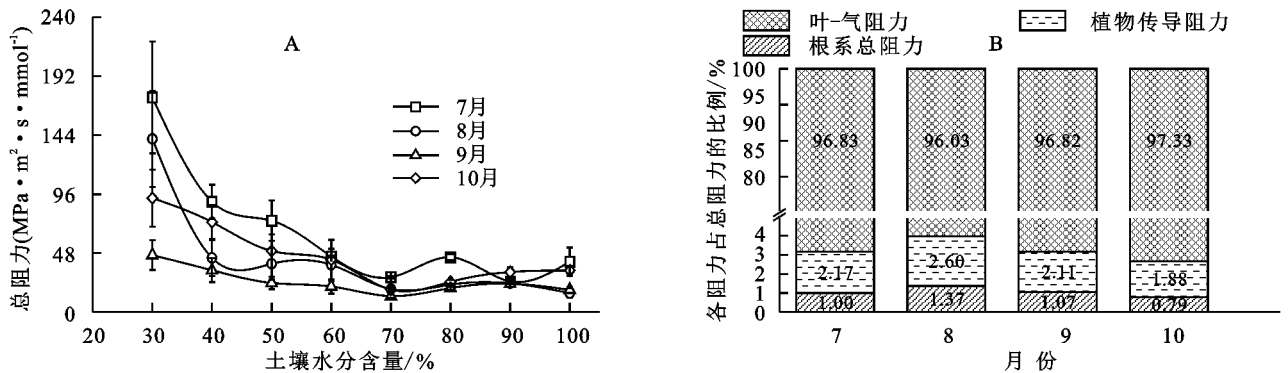
图 2 土壤-刺槐系统的土壤阻力、根系总阻力、植物传导阻力及叶-气阻力在不同水分含量及月份间的变化情况

2.2.4 叶-气阻力 图 2 D 为 R_{la} 随土壤水分含量的变化情况。 R_{la} 在 30%~50% 的田间持水量以下随水分含量的增加而迅速减小;在 50%~70% 的范围减小速率变缓;在 70% 的田间持水量以上有增大的现象。各月的 R_{la} 在水分处理间也存在显著差异。 R_{la} 在生长季的变化趋势为:水分含量低于 70% 的田间持水量时 R_{la} 的大小:7 月 > 10 月 > 8 月 > 9 月;高于 70% 时 R_{la} :7 月 > 10 月 > 8 月 \approx 9 月。

2.3 土壤-刺槐系统总阻力对水分胁迫的响应

图 3A 表明, R_t 在 30%~50% 的田间持水量范围内随水分含量的增加而迅速减小,在 50%~70% 的田间持

水量范围减小速率变缓,在 70% 的田间持水量以上呈现的增加现象与 R_{la} 相似。值得注意的是,土壤-刺槐系统的 R_t 随土壤水分含量及时间的变化趋势与 R_{la} 基本相同。各月 R_t 的水分处理间存在显著差异。从时间尺度来看,土壤-刺槐系统的 R_t 大小:7 月 > 10 月 > 8 月 > 9 月。由 3B 可知,各部分水流阻力占总阻力的百分比于 7—10 月在波动,但总体遵循着一定的大小比例,即:在土壤-刺槐系统内 R_{la} 占比最大,占 R_t 的 96.0% 以上; R_p 次之,占比 1.9%~2.2%; R_r 占比 0.8%~1.4%; R_s 最小,与系统内其他阻力相比小 $10^6 \sim 10^8$ 倍,其大小可以忽略,故在图 3B 中未参与比较。



注: B 中数字代表相应阻力占总阻力的比例。

图 3 土壤-刺槐系统总阻力随土壤水分含量及时间的变化及土壤-刺槐系统各部分阻力占总阻力比例

3 讨论

生长在 30%~70% 田间持水量范围内的刺槐,通过调节气孔导度使叶片 T_r 随着水分含量的增加

而增大,以减缓水分胁迫对植物的不良影响^[20];当水分含量高于田间持水量的 80% 时,刺槐叶片 T_r 基本稳定,这与以往关于侧柏的研究结果相近^[21]。刺槐叶片 T_r 于 7—9 月增大、10 月减小的变化趋势,是刺

槐适应干旱环境的结果^[22]。7—9月刺槐处于旺盛的生长时期,叶面积、 T_r 等随生长时间的增加而迅速增大,刺槐植株快速生长;10月由于气温降低、光照时长等的减少及刺槐固有的落叶习性,使刺槐的生长受限、 T_r 减小。植物水势可以反映出植物的水分利用状况。植物在遭遇水分胁迫时,根区吸水受限导致植物根直径减小、根轴向萎缩^[23],使 ψ_r 下降,降低了液流速率,从而引起 ψ_l 的下降^[24]。刺槐的 ψ_r 和 ψ_l 随着水分条件的改善均呈现增大的趋势,二者在30%~50%的田间持水量范围增加最快,且7—10月刺槐的水势逐渐降低,降低的植物水势增大了水势差,有助于刺槐根系吸水及植物传输水^[6]。

水流阻力受水分胁迫的影响,水从土壤进入植物根系,经茎、叶扩散到大气的全过程贯穿着土壤-植物系统各部分的阻力。水分胁迫导致植物根系收缩,土-根界面空隙变大, R_s 增大^[25]。邵明安等^[7]认为水分含量低于田间持水量的40%时 R_s 较大,否则作用甚微,这与本研究仅30%田间持水量下的 R_s 与40%~100%田间持水量之间存在显著差异相符。由于土壤水分含量增加使刺槐的 T_r 和 ψ_r 均增大,故 R_r 随水分含量的增加而减小。其中7月、8月的 R_r 值更大的原因可能是该阶段叶片处于生长发育前期,叶面积较小、蒸腾作用相对较弱。 R_p 与 R_r 的变化趋势相近,是因为水分在植物内部传输过程中阻力变化较小且变化趋势相近^[26]。 R_{la} 与水分含量间也呈负相关关系,这是 ψ_l 和 T_r 共同作用的结果^[1]。 R_{la} 在70%的田间持水量以上有较小的增大趋势是因为植物生长差异引起了该水分范围的叶水势(图1C)降低。由于 R_{la} 占 R_t 的96.0%以上,故 R_t 与 R_{la} 呈相似的变化趋势,以往关于葡萄、玉米、小叶锦鸡儿等的研究均表明 R_{la} 是土壤-植物系统“耗能”最多的阻力部分,该过程主导了植物被动吸水的过程,引发了水由液态—气态的相变^[10]。整体来讲,7—9月水流阻力逐渐减小,10月增大,其大小为:7月>10月>8月>9月。生长季内的水流阻力随水分含量的增加而减小,是刺槐调节自身与土壤水分间的关系、促进生长发育的结果。

根据刺槐生长季内 T_r 的变化趋势,我们认为刺槐蒸腾耗水的水分利用阈值为75%的田间持水量^[15],大于该水分含量刺槐 T_r 处于最大值,小于该水分含量 T_r 随含水量的减少而降低。生长季内刺槐对水分的利用状况与植株从土壤中可获得的水量相关^[27]。黄土高原降水少、蒸发量大、年际间降雨不均等使土壤蓄水不足,导致刺槐生长受水分胁迫的影

响^[28],但该地区的降雨多集中在刺槐生长季,一定程度上减缓了水分胁迫对植株带来的伤害^[29],使刺槐得以生存。以往的研究结果表明,黄土高原塬土的年平均水分含量为田间持水量的50%~59%^[28,30],结合本研究 T_r 、 ψ_r 、 ψ_l 和水流阻力等的变化、分布趋势,我们推测黄土高原刺槐林地合理的水分范围为50%的田间持水量以上。该水分范围使土壤-刺槐系统拥有相对高的 T_r ,低的水流阻力,以适应黄土高原干旱缺水的土壤环境,保证刺槐林可持续生长。

4 结论

(1) 刺槐的 T_r 在30%~70%(或80%)的田间持水量范围,随着土壤水分含量的增加而增大,在80%的田间持水量以上基本保持稳定,生长季内的变化趋势为7—9月增大,10月减小; ψ_r 和 ψ_l 在30%~50%的田间持水量范围均随水分含量的增加而迅速增大,此后变化较小,7—10月的 ψ_r 和 ψ_l 呈减小趋势;

(2) 水流阻力随着水分含量的增加而减小。 R_s 、 R_r 和 R_p 在30%~50%的田间持水量范围随着水分含量的增加迅速减小,在50%的田间持水量以上的变化较小; R_{la} 在30%~50%的田间持水量范围减小的速率最快,在50%~70%的范围减小速率变缓,在70%的田间持水量以上有增大的现象。 R_t 的变化趋势与 R_{la} 相近,是因为 R_{la} 占 R_t 的96.0%以上,主导了总阻力的变化。水流阻力于7—9月减小,10月增大;

(3) 根据的刺槐 T_r 、 ψ_r 、 ψ_l 和水流阻力等的分布及变化趋势,我们推测生长在大于50%田间持水量范围的刺槐可以保证相对高的 T_r 、低的水流阻力,以适应黄土高原干旱缺水的土壤环境,促进刺槐林可持续生长。

参考文献:

- [1] 杨斌.刺槐幼苗对水分胁迫的响应:基于生长、生理及非结构性碳的分配与动态[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [2] 国家林业局.中国森林资源报告(2014—2018)[M].北京:中国林业出版社,2019.
- [3] 胡新生,王世继.树木水分胁迫生理与耐旱性研究进展及展望[J].林业科学,1998,34(2):77-89.
- [4] Maruyama K, Toyama Y. Effect of water stress on photosynthesis and transpiration in three tall deciduous trees[J]. Journal of the Japanese Forestry Society, 1987,69(5):165-170.
- [5] 黄明斌,邵明安.土壤-植物系统中水流阻力的变异性[J].土壤学报,1996,33(2):211-216.

- [6] 杨晓光, 刘海隆, 于沪宁. 夏玉米农田 SPAC 系统水分传输势能及其变化规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 27-29.
- [7] 邵明安, 杨文治, 李玉山. 土壤-植物-大气连续体中的水流阻力及相对重要性[J]. 水利学报, 1986, 2(9): 10-16.
- [8] Zhang D, Du Q, Zhang Z, et al. Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer [J]. Scientific Reports, 2017, 7. DOI:10.1038/srep43461.
- [9] 张喜英. 冬小麦、夏玉米叶水势、蒸腾和液态水流阻力的田间试验研究[J]. 地理学报, 1997, 52(6): 543-550.
- [10] 巩玉霞. 库布齐沙地基于 SPAC 系统的主要造林灌木耐旱特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [11] 杨启良, 张富仓. 根区不同灌溉方式对苹果幼苗水流阻力的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 128-134.
- [12] Gullo M A L, Nardini A, Salleo S, et al. Changes in root hydraulic conductance(KR) of *Olea oleaster* seedlings following drought stress and irrigation[J]. New Phytologist, 1998, 140: 25-31.
- [13] Perumalla C J, Peterson C A. Deposition of Casparian bands and suberin lamellae in the exodermis and endodermis of young corn and onion roots [J]. Canadian Journal of Botany, 1986, 64(9): 1873-1878.
- [14] 周洪华, 李卫红, 徐茜. 荒漠河岸林植物木质部导水与栓塞特征及其对干旱胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2012, 36(1): 19-29.
- [15] 吴元芝. 黄土区土壤水分对典型植物有效性的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [16] 张新平, 董洁, 张芳芳, 等. 几种常用的树木叶面积测量方法比较[J]. 中国城市林业, 2016, 14(2): 38-42.
- [17] Campbell G S. Transport Models for Soil-plant Systems [M]. Soil Physics with Basic. Amsterdam; Elsevier Science B. V., 1985.
- [18] Gardner W R. Dynamic aspects of water availability to plants[J]. Soil Science, 1960, 89: 63-73.
- [19] 刘昌明, 王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [20] He Q Y, Yan M J, Miyazawa Y, et al. Sap flow changes and climatic responses over multiple-year treatment of rainfall exclusion in a sub-humid black locust plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 457. DOI:10.1016/j.foreco.2019.117730.
- [21] 张光灿, 刘霞, 贺康宁. 黄土半干旱区刺槐和侧柏林地土壤水分有效性及生产力分级研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 858-862.
- [22] Mantovani D, Veste M, Boehm C, et al. Spatial and temporal variation of drought impact on black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) water status and growth [J]. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2015, 8: 1-5.
- [23] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Effects of root dehydration on biomechanical properties of woody roots of *Ulex europaeus* [J]. Plant and Soil, 2018, 431(3): 347-369.
- [24] 井大炜, 邢尚军, 杜振宇, 等. 干旱胁迫对杨树幼苗生长、光合特性及活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1809-1816.
- [25] Liu X P, Zhang W J, Wang X Y, et al. Root-soil air gap and resistance to water flow at the soil-root interface of *Robinia pseudoacacia* [J]. Tree Physiology, 2015(12): 1343-1355.
- [26] 刘洪波, 白云岗, 张江辉, 等. 极端干旱区葡萄 SPAC 系统水流阻力规律研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 185-189.
- [27] Mantovani D, Veste M, Badorreck A, et al. Evaluation of fast growing tree water use under different soil moisture regimes using wick lysimeters [J]. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2013, 6(4): 190-200.
- [28] Zhang Z D, Huang M B, Yang Y N, et al. Evaluating drought-induced mortality risk for *Robinia pseudoacacia* plantations along the precipitation gradient on the Chinese Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 284. DOI:10.1016/j.agrformet.2019.107897.
- [29] Jin Z, Guo L, Lin H, et al. Soil moisture response to rainfall on the Chinese Loess Plateau after a long-term vegetation rehabilitation [J]. Hydrological Processes, 2018, 32: 1738-1754.
- [30] Zhang Z D, Huang M B, Zhao X F, et al. Adjustments of leaf traits and whole plant leaf area for balancing water supply and demand in *Robinia pseudoacacia* under different precipitation conditions on the Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 279. DOI:10.1016/j.agrformet.2019.107733.