

黄土高原半湿润区刺槐树干液流对人工截留降雨输入及环境因子的响应

何秋月^{1,2} 闫美杰^{2,3} 张建国⁴ 杜盛^{2,3*}

¹西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; ²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; ³中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ⁴黄河上中游管理局, 西安 710021

摘要 随着全球气候变化加剧, 局部地区温度上升和降水量改变将对区域植被的分布与生长产生重要影响。在黄土高原半湿润及半干旱地区植被恢复中, 刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是大面积种植的人工林树种。为探究该树种蒸腾耗水特征对降水量改变及水分条件差异的响应, 于2015年4月起, 在地处黄土高原半湿润区的陕西省永寿县槐平林场, 于35年生刺槐人工林样地中布设了人工截留降雨试验, 减少了47.5%的降雨输入。处理当年生长季内, 截留降雨处理区0–100 cm土层的平均土壤含水量相对于对照区(23.76%)有明显降低(22.59%)。采用Granier热扩散探针针对截留降雨处理区和对照区的样树干液流动态进行连续监测, 并同步监测主要气象环境因子(太阳辐射、空气温度和湿度)和林地土壤含水量, 分析了截留降雨处理区与对照区树干液流通量密度动态特征及其对环境因子的响应。结果表明: 截留降雨输入处理降低了刺槐树干液流通量密度, 截留降雨处理期间典型天气的平均液流通量密度($1.64 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)不仅低于同组样树在处理前一年同期的水平($2.42 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 而且远低于试验期间对照区样树的平均水平($3.38 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); 同时, 截留降雨处理还降低了刺槐液流通量密度对气象因子变化的敏感性, 截留降雨处理区样树液流通量密度响应空气水汽压亏缺的拟合方程参数值与对照区样树差异显著。分析可知, 降水量水平不仅影响土壤水分状况, 而且影响刺槐对气象环境因子响应的敏感性, 降水量减少导致的土壤含水量整体降低会使得该区域刺槐蒸腾耗水量下降, 显示其对环境因子的适应性, 但最终会导致生产力的大幅度降低。

关键词 刺槐; Granier热扩散探针; 截留降雨; 树干液流; 蒸腾

何秋月, 闫美杰, 张建国, 杜盛 (2018). 黄土高原半湿润区刺槐树干液流对人工截留降雨输入及环境因子的响应. 植物生态学报, 42, 466–474. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0249

Sap flow of *Robinia pseudoacacia* in response to rainfall exclusion treatment and environment factors in a sub-humid area in Loess Plateau

HE Qiu-Yue^{1,2}, YAN Mei-Jie^{2,3}, ZHANG Jian-Guo⁴, and DU Sheng^{2,3*}

¹College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; ²State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; ³Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; and ⁴Upper and Middle Yellow River Bureau, Xi'an 710021, China

Abstract

Aims Global climate change will increase the uncertainty of precipitation patterns and affect the growth and distribution of plants. In the sub-humid and semi-arid areas of central China, black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations are widely planted in reforestation practices. These forests are vulnerable to climate change induced water stress. This research aims to clarify the responses of black locust transpiration to rainfall and soil water conditions.

Methods To evaluate the responses of transpiration to precipitation changes, we measured and contrasted sap flow of black locust trees under throughfall exclusion treatment and the non-treated control in the Huaping plantation forest of Yongshou County, a sub-humid area in Loess Plateau. Throughfall and soil moisture for both control and treatment plots were monitored. Waterproof panels were set in April 2015 for the treatment plot which excluded about 47.5% of the precipitation during the growing season. Stem sap flow in treatment and control plots have been measured since 2014 using Granier-type sensors. Meteorological factors including solar radiation, air temperature, and relative air humidity were monitored simultaneously outside the forest stand.

收稿日期Received: 2017-09-29 接受日期Accepted: 2018-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(41471440和41411140035)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41471440 and 41411140035).

* 通信作者Corresponding author (shengdu@ms.iswc.ac.cn)

Important findings Difference in soil moisture developed between treatment and control plots, the mean soil moisture content in treatment plot was 23.76%, lower than 22.59% ($p < 0.001$, $n = 31$) in the control plot during the middle growing season. Sap flux densities reduced following the treatment. The mean sap flux density under general weather conditions for the treatment plot was $1.64 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, not only lower than $2.42 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ of the previous year (before treatment), but also lower than $3.38 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for control plot during the same period. The response patterns of sap flux density to solar radiation and vapor pressure deficit were also different, with the trees in treatment plot showing lower sensitivities to meteorological factors than those in the control plot. Our results show that transpiration of planted black locust trees was suppressed by the throughfall exclusion. The responses of transpiration to meteorological factors decreased compared with a pretreatment period or control plot. These results suggest that decrease in precipitation will not only reduce soil moisture, but may cause decreased transpiration, decreased responses to climatic variables, and lowered productivity as well.

Key words *Robinia pseudoacacia*; Granier-type sensor; rainfall exclusion; sap flow; transpiration

He QY, Yan MJ, Zhang JG, Du S (2018). Sap flow of *Robinia pseudoacacia* in response to rainfall exclusion treatment and environment factors in a sub-humid area in Loess Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 466–474. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0249

蒸腾不仅是植物吸收和运输水分、无机离子的主要驱动力,而且是森林水文循环的重要组分。植物蒸腾除受物种本身特性调控外,也受气象和土壤等环境因素的影响。

降雨改变引起的干旱会对森林蒸腾耗水产生重要影响,而降雨的随机性会造成早期强度和持续时间变化,从而影响林分蒸腾(Wullschlegel & Hanson, 2006; Knapp *et al.*, 2008)。国内外多数研究表明,区域范围降雨格局的变化,会引起土壤含水量的变化,从而影响蒸腾。降雨增加引起的土壤含水量升高通常会促进树木蒸腾;降雨减少则会导致蒸腾的降低。Cermak等(1995)在瑞典中部的研究表明,欧洲赤松(*Pinus silvestris*)和挪威云杉(*Picea abies*)林分蒸腾在降雨后分别增加了3.5和4.5倍。Llorens等(2010)对伊比利亚半岛欧洲赤松林研究发现,在贫水年的夏季,林分日蒸腾量比平常年份减少约40%。Wullschlegel和Hanson(2006)通过人工控雨试验证明,增加降雨的林分季节蒸腾增加了9%,而减少降雨的样地降低了26%–30%。在长期人工截留降雨试验的栎林,降水量减少29%导致年蒸腾量下降23%(Limousin *et al.*, 2009)。不过,也有一些研究未发现减少降雨对蒸腾有显著的影响,Wightman等(2016)在美国佛罗里达州北部的人工截留降雨试验并未说明降低降雨量对蒸腾耗水的影响,可能的原因是该区域存在可利用的地下水,人工截留降雨试验尚未对林分水分供应产生影响。Otieno等(2005)在肯尼亚对当地两个树种的对比研究发现,当土壤含水量下降到一定阈值时,树干液流开始下降,其土壤含水量阈值的大小和液流下降的速率与树木根

系深度有关。因此,降雨改变对土壤水分条件的影响因环境条件不同而异,而降水量改变对树木及林分蒸腾的影响不仅与土壤水分变化幅度有关,而且与植物本身的生理状况关系密切,对其影响程度及作用机理还需进一步的研究与分析。

人工造林是黄土高原地区植被恢复的主要措施。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是一种典型的中生树种,既喜湿润肥沃,又耐旱耐瘠薄,生长迅速,是优良造林树种(中国树木志编委会, 1978)。广泛人工造林促进了刺槐生态适应性,使其具有向更暖、更冷以及更干旱区迁移的趋势(Li *et al.*, 2018)。在黄土高原,刺槐的栽种面积居该区域人工林面积之首(杜盛和刘国彬, 2015)。由于刺槐具有高耗水特性,对土壤水分吸收较快,消耗较大(韩蕊莲等, 1994; 茹桃勤等, 2005),对水分条件的变化也表现得较为敏感,因而适生区存在很大局限性,加之全球气候变化引起降雨波动,使得人们对黄土高原人工刺槐林的长期可持续发展仍有质疑,亟待考证。

测定树干液流是实时监测蒸腾耗水动态的重要手段,便于分析植物生理作用对环境因子的适应性和响应特征。本研究人工设置野外截留降雨输入实验,研究刺槐树干液流对土壤水分变化的响应,以及不同土壤水分条件下树干液流与气象环境因子的响应关系,为探究刺槐人工林的适生范围和降水量阈值提供数据支撑。

1 材料和方法

1.1 研究地概况及截留降雨处理

试验样地(34.80° N, 107.97° E, 海拔1 430 m)位

于陕西省永寿县槐平林场,属于黄土高原沟壑区的温带半湿润森林区(Tsunekawa *et al.*, 2014; 杜盛和刘国彬, 2015)。据永寿县气象局资料,当地年平均气温10.8 °C,年降水量601.6 mm,其中70%发生在7–9月,年潜在蒸散约807.4 mm (Wang *et al.*, 2015)。

刺槐人工林固定样地(20 m × 20 m)布设于东北向坡面,坡度25°,林龄35年(2015年测),林分密度1 700株·hm⁻²,林分平均胸径14.0 cm,平均树高14.7 m。2014年和2015年生长季林分叶面积指数分别为2.54和2.14。降雨截留板于2015年4月开始设置,在树木行间搭建的塑料材质截留板占截留降雨处理区样地面积的57.8%,高度1–2 m,可将截留的穿透雨导流至样地外。

通过设置穿透雨收集筒,测量林分多次降雨事件的穿透雨比例,依据截雨板面积比例,计算得到截留降雨处理区截留降雨约为总降雨量的47.5%。

1.2 环境因子监测

通过安装于样地外开阔地的自动气象站对主要气象因素连续自动监测。测定指标包括太阳辐射、空气温度、空气湿度和降雨量等。太阳辐射监测采用LI-200型传感器(LI-COR, Lincoln, USA),水平安装于距地面2 m高的观测塔顶端;HMP110型温湿度传感器(Vaisala, Helsinki, Finland)安装于距地面1.8 m高的防辐射罩内。太阳辐射和温湿度数据每30 s读取一次,用CR1000数据采集器(Campbell Scientific, Logan, USA)记录每30 min的平均值;降雨量由7852型翻斗式自记雨量桶(Davis Instruments, Hayward, USA)测定,水平安装于地面50 cm高处。为反映大气温湿度的协同效应,本文采用Campbell和Norman (1998)公式依据空气温度(T , °C)和相对湿度(RH , %)计算空气水汽压亏缺(VPD , kPa),其计算公式为:

$$VPD = 0.611e^{\left(\frac{17.502T}{T+240.97}\right)} (1 - RH)$$

同时,在截留降雨处理区和对照区内,均安装土壤水分自动监测系统,在100 cm深度内土壤剖面上设置6个S-SMC-M005土壤水分探头(Onset, Bourne, USA),对不同深度土壤水分实时连续监测,每60 s读取一次数据,每隔1 h记录一个平均值,存储于HOBO的H21-002型数据采集器中(Onset, Bourne, USA)。按照各探头所代表的土层深度加权平均计算获得0–100 cm土层的平均土壤含水量。

1.3 树干木质部边材液流测定

本研究测定6株生长正常、具代表性的刺槐样树的树干液流。其中1–3号样树位于截留降雨处理区,4–6号样树位于对照区。6株样树基本信息见表1。

采用长10 mm的Granier型热扩散探针对样树边材进行液流监测,在样树南北两侧各安装一组探针,包括参考和加热探针,两探针间距约15 cm,采用专用电流调节装置为加热探针提供稳定电流以保持0.15 W功率的持续加热(James *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2010)。为防止太阳辐射对树干造成自然温度梯度差,将所有探针覆盖铝箔。采用CR1000数据采集器每30 s读取一次加热和参考探针的温差,并记录每30 min的平均值。根据Granier经验公式(Granier, 1987)计算液流通量密度,计算公式如下:

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

式中, F_d 为液流通量密度(mL·m⁻²·s⁻¹), ΔT 为两探针之间的温度差, 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。

1.4 数据分析与处理

本文涉及液流数据为截留降雨试验布设前的2014年7月以及截留降雨试验布设后的2015年7月期间典型天气(非阴天和雨天)监测值。使用Baseliner软件将探针温度差数据转换为树干液流通量密度数据,通过SigmaPlot 12.5软件建立截留降雨处理区和对照区样树液流通量密度与空气水汽压亏缺的回归方程。选取两个试验时段内从早晨(7:00)液流启动到

表1 供试样树基本信息
Table 1 Basic parameters of sample trees

年份 Year	样树号 Sample tree No.	树高 Tree height (m)	胸径 Diameter at breast height (cm)	边材厚度 Sap wood thickness (cm)
2014	1	14.1	13.8	3.6
	2	17.7	19.5	4.6
	3	10.7	10.3	2.9
	4	10.4	10.4	2.9
	5	10.6	10.4	2.9
	6	18.7	20.0	4.7
2015	1	16.5	14.1	3.6
	2	19.9	20.0	4.7
	3	10.7	10.3	2.9
	4	11.3	10.8	3.0
	5	11.3	10.5	2.9
	6	18.8	20.3	4.7

液流通量密度达到最大值(14:00)之间液流迅速增长长期的数据, 采用线性回归方程拟合分析该时段平均液流通量密度与空气水汽压亏缺的响应关系。使用SPSS 23.0统计分析软件对试验数据分析和处理, 并对不同处理的样本拟合方程系数进行差异性检验。作图工具为SigmaPlot 12.5。

2 结果

2.1 截留降雨处理前与截留降雨处理中降雨量及林地土壤含水量变化特征

选取截留降雨处理实施前后的生长盛期各一个月(2014和2015年7月), 两个时段内研究区的降雨量和平均土壤含水量变化动态如图1所示。从图中可以看出, 土壤含水量的变化动态与降雨密切相关, 降雨事件使得土壤含水量得到明显的补充, 但截留降雨处理区和对照区对降雨的响应不尽相同。实施截留降雨处理期间(2015年7月), 处理区土壤含水量(22.59%)显著低于($p < 0.001$, $n = 31$)对照区土壤含水量(23.76%), 且对照区土壤含水量在降雨事件后补充迅速, 变化幅度较为明显, 而截留降雨处理区

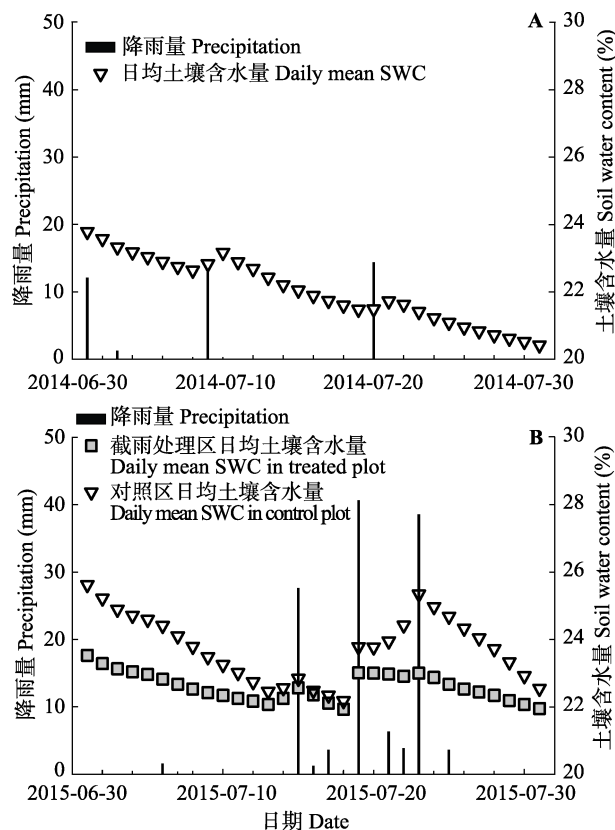


图1 两个试验时段土壤含水量(SWC)及降雨量动态。
Fig. 1 Soil water content (SWC) and precipitation during the two study periods.

的土壤含水量变化幅度总体较小, 在雨量较小的降雨事件后, 截留降雨处理区土壤含水量没有明显变化。例如, 在2015年7月19日出现40.64 mm的短时间强降雨事件后, 对照区的平均土壤含水量升高了1.60%, 而截留降雨处理区的土壤含水量只升高了1.08%; 在2015年7月23日38.35 mm的降雨事件后, 对照区的土壤含水量升高了0.92%, 截留降雨处理区的土壤含水量仅升高了0.09%。但是, 在降雨过后, 对照区土壤含水量的下降幅度明显大于截留降雨处理区, 说明对照区的蒸散水平总体上高于处理区。

尽管两个试验时段属于两年内对应的同期, 但是降雨量和土壤水分动态也都不同。2014年对照区7月初的土壤含水量为23.79%, 而2015年7月初的土壤含水量为25.62%, 比2014年高1.83%; 两个试验时段内的降雨量差异也极为明显, 2014年该月内降雨8次, 总降水量43.18 mm, 而2015年该月内降雨13次, 总降水量达127.76 mm。由于2015年的降雨事件多为强降雨, 雨量大但降雨时间短, 在一定程度上影响了对土壤水分的补充作用, 因此2014和2015年同期该月末的土壤含水量分别为20.42%和22.54%, 差值较月初略有扩大。

2.2 截留降雨处理前与截留降雨处理中刺槐边材液流日变化特征

为了阐明截留降雨处理对树干边材液流的影响, 在截留降雨处理前(2014年)和截留降雨处理中(2015年)各选择了6个较为典型的天气(晴天或多云), 对6株样树的液流日变化动态进行对比分析(图2)。从图中可以看出, 虽然处理区和对照区样树间存在个体差异, 相同样树在不同年份、不同日期的表现也有所不同, 但日变化的总体趋势都大致相同, 基本反映了对当日太阳辐射和空气水汽压亏缺的响应。刺槐液流通常于7:00启动, 在12:00左右到达峰值, 稍早于太阳辐射和空气水汽压亏缺的峰值时间。12:00–15:00为液流通量密度较为稳定的高峰段, 15:00后开始下降, 于次日凌晨日出前达到最低点。该区域刺槐液流日变化曲线通常为单峰型, 偶尔受气象因子影响呈现不规则的变化, 但总体上与太阳辐射和空气水汽压亏缺变化趋势相同, 说明在日尺度上蒸腾作用的主要驱动因子是太阳辐射及空气水汽压亏缺。

虽然两组样树因个体差异在截留降雨处理前的2014年也存在液流通量密度的差异, 但实施截留降

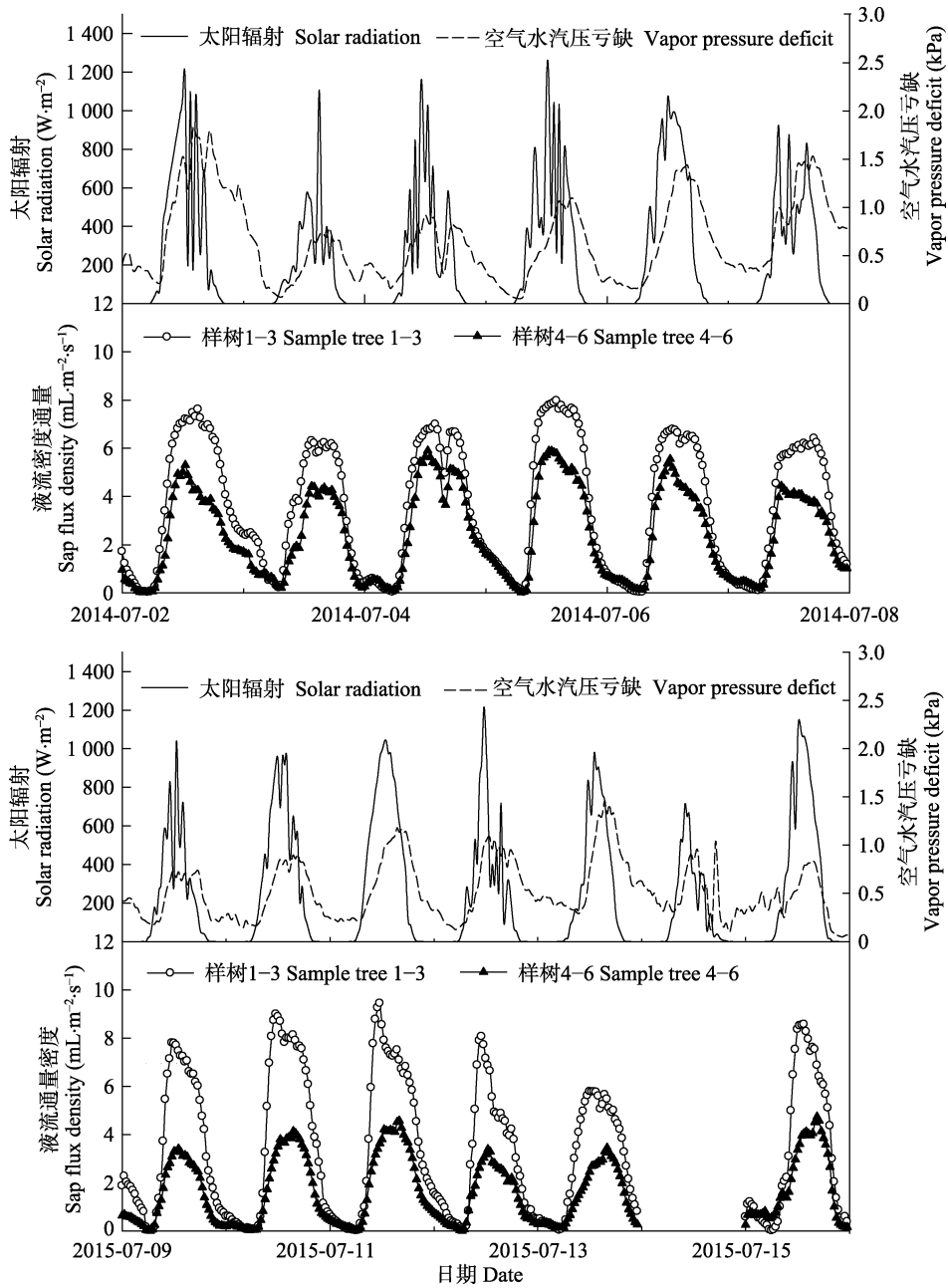


图2 两试验时段刺槐样树液流通量密度及气象因子日变化曲线(2015年7月14日为阴天, 未包括)。

Fig. 2 Diurnal courses of sap flux density of sample trees and meteorology factors during two study periods (14 July 2015 was excluded from analyses due to overcast).

雨处理后, 2015年截留降雨处理区和对照区样树之间液流通量密度的差异比2014年有明显的增大, 表明截留降雨处理明显降低了液流日变化的峰值。

为了联系气象环境因子比较处理之间及两个试验时段的液流通量密度, 将两个时段的观测值进行汇总分析(表2)。结果表明, 两个时段的平均日总太阳辐射和空气水汽压亏缺比值分别为1.07和0.81, 即差值在20%之内; 样树1-3 (对照区)平均液流通量密度对应的比值为0.96, 处理区样树4-6平均液流

通量密度对应的比值却仅为0.68。说明截留降雨处理中的样树液流通量密度不仅远低于同一时期的对照区样树, 而且远低于处理实施前的水平。

2.3 截留降雨处理前与截留降雨处理中刺槐液流通量密度对主要环境因子的响应特征

一般认为, 在短时间尺度上植物的蒸腾作用主要受到气象因子的影响, 空气水汽压亏缺和光照是植物气孔蒸腾的主要驱动因子(Green, 1993; Zhang *et al.*, 1997)。目前, 对于树干液流通量密度对气象

表2 两个试验时段太阳辐射、空气水汽压亏缺、液流通量密度及比值(平均值±标准误差, $n = 6$)Table 2 Solar radiation, vapor pressure deficit and sap flux densities (F_d) in the two study periods and their ratios (mean \pm SE, $n = 6$)

测定时段 Study period	平均日总太阳辐射 Mean daily solar radiation ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	平均空气水汽压亏缺 Mean vapor pressure deficit (kPa)	样树1-3平均液流通量密度 Mean sap flux density of sample tree 1-3 ($\text{mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	样树4-6平均液流通量密度 Mean sap flux density of sample tree 4-6 ($\text{mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
处理前 Before treatment (2014)	20.62 ± 1.69	0.65 ± 0.03	3.53 ± 2.67	2.42 ± 1.84
处理期 Treatment (2015)	21.96 ± 1.51	0.53 ± 0.0201	3.38 ± 2.93	1.64 ± 1.39
处理期/处理前 Treatment/Before treatment	1.07	0.81	0.96	0.68

环境因子的响应规律多采用指数饱和和曲线函数进行拟合分析, 例如Du等(2011)以及张建国等(2011)。由于空气水汽压亏缺和太阳辐射较低蒸腾作用未出现气孔调节时, 液流通量密度与气象环境因子的关系近似线性, 为了避免空气水汽压亏缺和液流通量密度时滞效应对二者的回归关系分析产生影响, 采用线性回归方程 $y = ax$ 分别对样树1-3和样树4-6的平均液流通量密度在迅速上升时段对空气水汽压亏缺的响应进行拟合。结果(图3)表明, 两年试验期间的线性回归关系均达到极显著水平。截留降雨处理前, 样树1-3与样树4-6的回归方程斜率分别为8.41和6.78, 斜率值相近; 截留降雨处理中, 样树1-3和样树4-6的斜率值差异加大, 分别为12.33和5.34。进一步对拟合直线的斜率进行差异显著性检验, 结果(表3)显示, 在2014年试验期间, 样树1-3与样树4-6的拟合方程斜率差异未达到显著水平($p > 0.05$); 在2015年截留降雨处理中, 两组样树的拟合方程斜率差异呈现极显著水平($p < 0.001$), 进一步说明了截留降雨处理中的样树液流通量密度随着空气水汽压亏缺上升速率明显低于对照区样树, 且相同气象条件下, 截留降雨处理下的样树液流通量密度也明显低于对照区样树。可以推测, 截留降雨处理导致的土

壤供水不足使蒸腾作用明显受到吸水阻力的抑制。

3 讨论

截留降雨处理明显降低了该区域土壤含水量, 对比对照区的土壤含水量, 截留降雨处理区土壤含水量波动也较小。通常情况下, 两区土壤含水量的差异在降雨事件后增大, 随着时间逐渐减小, 直到下一次降雨的发生。说明截留降雨处理不仅降低了降雨对土壤含水量的补充作用, 而且降低了总的蒸散作用。

由于该地区地下水位较深, 降雨是土壤水分补充的唯一来源, 减少降水量必然会引起土壤含水量的降低, 最终导致林分蒸腾耗水大幅度降低。关于黄土高原其他地区刺槐人工林的研究有相似的报道, Du等(2011)对黄土高原半干旱区的辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、刺槐和山杏(*Armeniaca sibirica*)树干液流在降雨前后的对比研究发现, 刺槐为干旱敏感型树种, 其液流对降雨事件的响应较强烈, 林地的土壤含水量变化对其蒸腾耗水影响大, 而乡土树种对土壤水分的敏感度较低, 对降雨事件的响应不明显。王进鑫等(2005)通过旱棚人工控水对侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐幼树的生理需水规律、

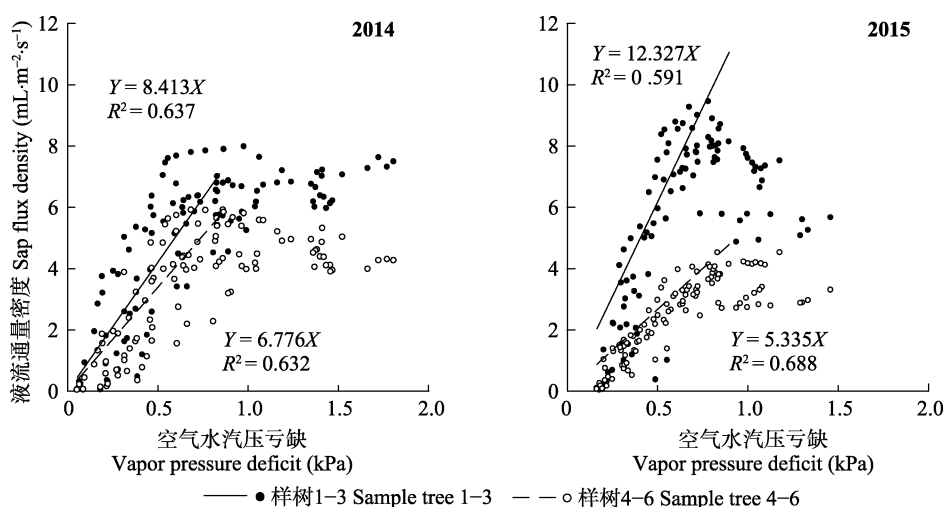


图3 两试验时段液流通量密度在上升阶段对空气水汽压亏缺的响应特征。

Fig. 3 Response patterns of sap flux density to vapor pressure deficit for the arising stage in the morning.

表3 两试验时段平均液流通量密度与空气水汽压亏缺拟合直线斜率的差异性检验**Table 3** Difference analyses on regression parameters for sap flux density vs. vapor pressure deficit

年份 Year	样树1–3 Sample tree 1–3	样树4–6 Sample tree 4–6	斜率差异检验 Difference between slopes
2014	$a = 8.41$	$a = 6.78$	NS
	$R^2 = 0.64$	$R^2 = 0.63$	
	$p < 0.0001$	$p < 0.0001$	
2015	$a = 12.33$	$a = 5.34$	$p < 0.001$
	$R^2 = 0.59$	$R^2 = 0.69$	
	$p < 0.0001$	$p < 0.0001$	

a 为样树液流通量密度与空气水汽压亏缺拟合直线的斜率。NS, 无显著差异。

a refer to the regression parameter for sap density vs vapor pressure deficit. NS, no significant difference.

蒸腾耗水与土壤含水量关系的研究表明, 刺槐的蒸腾耗水量随土壤供水能力的增加而增大, 年均生理需水量是侧柏的5.13倍。

部分其他阔叶类树种蒸腾耗水对降水量变化响应的研究结论也基本相似。Limousin等(2009)通过对地中海地区*Quercus ilex*林的研究发现, 减少该林分29%的降雨会导致林分年蒸腾耗水减少23%, 截留降雨处理对蒸腾作用的影响持续了整个处理期, 即使在雨季, 截留降雨处理样树的蒸腾耗水也明显低于对照的样树。Besson等(2014)通过在葡萄牙南部对*Quercus suber*林进行了截留降雨和灌溉的试验得出了同样的结论: 在干旱的夏季, 减少20%降雨处理的*Q. suber*冠层蒸腾耗水降低了20%–27%, 林分年蒸腾耗水量降低了8%–13%, 而同一时期增加降水量的*Q. suber*冠层蒸腾增加了14%–63%, 林分年蒸腾耗水量增加了11%, 但样树蒸腾耗水存在季节差异, 由于*Q. suber*在生长高峰时期主要依赖降雨补充水分, 而干旱的夏季则主要依赖地下水, 所以春天生长季节截留降雨和对照样地之间蒸腾耗水的差异明显加大, 而夏季差异明显减小。Fisher等(2007)在亚马孙地区的人工截留降雨试验发现, 两个干旱时期中自然条件的林分蒸腾量没有显著变化, 而截去50%降雨的林分年蒸腾量降低了41%–44%, 在极度干旱时期, 林分蒸腾量甚至减少了80%, 说明林分对土壤干旱的抵御能力存在阈值。同时, Pataki和Oren (2003)对河谷地落叶林6个树种的冠层气孔导度研究发现, 在干旱时期, 除北美鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*)的液流受影响下降外, 其余的北美枫香(*Liquidambar styraciflua*)、美国白蜡(*Fraxinus Americana*)、白橡(*Quercus alba*)、山核桃

(*Carya tomentosa*)和红栎(*Quercus rubra*)液流都没有下降, 仅表现为生长季后期叶片衰老和提前凋落。可以看出, 不同树种对降雨改变引起土壤干旱的适应策略和能力存在差异。

Oren等(1996)认为, 植物从土壤到大气的水力导度的大小可以从液流通量密度对空气水汽压亏缺变化响应的相关关系的斜率反映出, 斜率越大说明该植物水力导度越大, 即相同水势梯度下, 土壤水分从植物根系传输到冠层的效率越高, 同时, 土壤含水量下降可能会导致水力导度减小。Du等(2011)发现延安地区的刺槐在降雨事件前后液流的变化远大于乡土树种辽东栎, 显示刺槐对土壤水分的变化有比较显著的反应。本试验中, 对两年间截留降雨处理区和对照区样树液流通量密度与空气水汽压亏缺回归关系的差异性检验发现, 截留降雨处理区样树拟合关系斜率值有明显减小的趋势, 说明刺槐的水力导度随着土壤含水量降低发生了显著变化, 不能迅速响应空气水汽压亏缺的变化, 气孔导度和光合作用必然受到影响。

不少研究人员认为, 减少蒸腾耗水会导致林分生产力的降低。Alberti等(2007)在意大利对*Arbutus cenedo*林地的研究发现, 减少降雨使得该区域生态系统蒸散降低了35%, 最终导致该生态系统初级生产力减少了35%。Fisher等(2007)的模型模拟研究有相似的结论, 在两年截留降雨处理下, 其试验区域的初级生产力降低了13%–14%。袁瀛等(1996)在黄土丘陵区的研究表明, 年降雨量对刺槐胸径生长的影响最为突出, 远大于林龄、坡度、林分密度、地形部位等其他指标, 是该地区刺槐生长的限制因子。结合本试验研究内容, 可以推断截留降雨处理减少了穿透雨量, 降低了土壤含水量, 从而引起刺槐人工林蒸腾耗水大幅度降低, 响应环境因子变化能力也大幅度降低, 这种影响将会进一步降低该林地的生产力。随着全球气候变化, 如果该地区降水量出现减少, 人工林的生产力和稳定性将面临严峻挑战。

4 结论

本研究基于对布设人工截留降雨处理前后2个生长季内典型天气刺槐树干液流通量密度特征的分析, 重点对比了处理区和对照区样树对气象环境因子的响应差异, 可以得出如下结论:

(1)截留降雨处理减少降水量输入导致土壤含水量显著降低。在降雨事件后,截留降雨处理区的土壤含水量变化幅度总体较小,在雨量较小的降雨事件后,截留降雨处理区土壤含水量甚至没有明显变化。

(2)截留降雨处理中的样树液流通量密度不仅远低于同一时期的对照区样树,而且远低于处理实施前的水平。其中,处理前的2014年与处理期的2015年平均液流通量密度比值,对照区样树的比值为0.96,而处理区对应的比值仅为0.68。

(3)截留降雨处理导致的土壤水分下降,进一步使蒸腾作用受到吸水阻力的限制。截留降雨处理中的样树液流通量密度随空气水汽压亏缺上升的速率明显低于对照区样树,且相同气象条件下,截留降雨处理下的样树液流通量密度也明显低于对照区样树。

(4)降雨减少在短期内会表现为土壤含水量减少,导致林分蒸腾耗水下降和响应环境因子变化能力的降低,在长时间尺度上还具有林分生产力降低的必然性。

参考文献

- Alberti G, Inghima I, Arriga N, Piermatteo D, Pecchiari M, Zaldei A, Papale D, Peressotti A, Valentini R, Cotrufo M, Magnani F, Miglietta F (2007). Cambiamenti nel regime pluviometrico in ecosistemi mediterranei: Il progetto MIND. *Forest@*, 4, 460–468.
- Besson CK, Lobo-do-Vale R, Rodrigues ML, Almeida P, Herd A, Grant OM, David TS, Schmidt M, Otieno D, Keenan TF, Gouveia C, Meriaux C, Chaves MM, Pereira JS (2014). Cork oak physiological responses to manipulated water availability in a Mediterranean woodland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 230–242.
- Campbell GS, Norman JM (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer-Verlag, New York.
- Cermak J, Cienciala E, Kucera J, Lindroth A, Bednarova E (1995). Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration: A pilot-study at the central NOPEX site. *Journal of Hydrology*, 168, 17–27.
- Editorial Board of Silva of China (1978). *Technology for Chief Tree Species Afforestation in China* (Volume One). Agriculture Press, Beijing. [中国树木志编委会 (1978). 中国主要树种造林技术(上册). 农业出版社, 北京.]
- Du S, Liu GB (2015). *Ecological Function of Vegetation Restoration in Loess Plateau*. Science Press, Beijing. [杜盛, 刘国彬 (2015). 黄土高原植被恢复的生态功能. 科学出版社, 北京.]
- Du S, Wang YL, Kume T, Zhang JG, Otsuki K, Yamanaka N, Liu GB (2011). Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1–10.
- Fisher RA, Williams M, Da Costa AL, Malhi Y, Da Costa RF, Almeida S, Meir P (2007). The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: Results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment. *Global Change Biology*, 13, 2361–2378.
- Granier A (1987). Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3, 309–320.
- Green SR (1993). Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64, 201–221.
- Han RL, Liang ZS, Hou QC, Zou HY (1994). Water consumption properties of adaptable nursery stocks on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 5, 210–213. [韩蕊莲, 梁宗锁, 侯庆春, 邹厚远 (1994). 黄土高原适生树种苗木的耗水特性. 应用生态学报, 5, 210–213.]
- James SA, Clearwater MJ, Meinzer FC, Goldstein G (2002). Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in trees with deep sapwood. *Tree Physiology*, 22, 277–283.
- Knapp AK, Briggs JM, Collins SL, Archer SR, Bret-Harte MS, Ewers BE, Peters DP, Young DR, Shaver GR, Pendall E, Cleary MB (2008). Shrub encroachment in North American grasslands: Shifts in growth form dominance rapidly alters control of ecosystem carbon inputs. *Global Change Biology*, 14, 615–623.
- Li GQ, Xu GH, Zhang XQ, Huang JH, Wen ZM, Du S (2018). Afforestation and climate niche dynamics of black locust (*Robinia pseudoacacia*). *Forest Ecology and Management*, 407, 184–190.
- Limousin JM, Rambal S, Ourcival JM, Rocheteau A, Joffre R, Rodriguez-Cortina R (2009). Long-term transpiration change with rainfall decline in a Mediterranean *Quercus ilex* forest. *Global Change Biology*, 15, 2163–2175.
- Llorens P, Poyatos R, Latron J, Delgado J, Oliveras I, Gallart F (2010). A multi-year study of rainfall and soil water controls on Scots pine transpiration under Mediterranean mountain conditions. *Hydrological Processes*, 24, 3053–3064.
- Oren R, Zimmermann R, Terborgh J (1996). Transpiration in upper Amazonia floodplain and upland forests in response to drought-breaking rains. *Ecology*, 77, 968–973.
- Otieno DO, Schmidt MWT, Kinyamario JI, Tenhunen J (2005). Responses of *Acacia tortilis* and *Acacia xanthophloea* to seasonal change in soil water availability in the savanna region of Kenya. *Journal of Arid Environments*, 62, 377–400.
- Pataki DE, Oren R (2003). Species differences in stomatal

- control of water loss at the canopy scale in a mature bottomland deciduous forest. *Advances in Water Resources*, 26, 1267–1278.
- Ru TQ, Li JY, Kong LS, Zhu YL (2005). Review on the research of water consumption characteristic of *Robinia pseudoacacia*. *Research of Soil and Water Conservation*, 12, 135–140. [茹桃勤, 李吉跃, 孔令省, 朱延林 (2005). 刺槐耗水研究进展. *水土保持研究*, 12, 135–140.]
- Tsunekawa A, Liu GB, Yamanaka N, Du S (2014). *Restoration and Development of the Degraded Loess Plateau, China*. Springer Japan, Tokyo.
- Wang JX, Huang BL, Wang MC, Wang DH (2005). Transpiration water consumption of young *Platyclusus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* trees and their correction functions under different water supply. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16, 419–425. [王进鑫, 黄宝龙, 王明春, 王迪海 (2005). 不同供水条件下侧柏和刺槐幼树的蒸腾耗水与土壤水分应力订正. *应用生态学报*, 16, 419–425.]
- Wang YL, Liu GB, Kume T, Otsuki K, Yamanaka N, Du S (2010). Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China. *Journal of Forest Research*, 15, 241–251.
- Wang ZH, Miao YF, Li SX (2015). Effect of ammonium and nitrate nitrogen fertilizers on wheat yield in relation to accumulated nitrate at different depths of soil in drylands of China. *Field Crops Research*, 183, 221–224.
- Wightman MG, Martin TA, Gonzalez-Benecke CA, Jokela EJ, Cropper Jr WP, Ward EJ (2016). Loblolly pine productivity and water relations in response to throughfall reduction and fertilizer application on a poorly drained site in northern Florida. *Forests*, 7, 1–19.
- Wullschleger SD, Hanson PJ (2006). Sensitivity of canopy transpiration to altered precipitation in an upland oak forest: Evidence from a long-term field manipulation study. *Global Change Biology*, 12, 97–109.
- Yuan Y, Hui YY, Wu YL, Wang YM, Zhao HP (1996). Study of influence factors locust growing in the Loess hilly region. *Research of Soil and Water Conservation*, 3, 146–154. [袁瀛, 惠养瑜, 吴永麟, 王郁民, 赵惠萍 (1996). 黄土丘陵区刺槐生长的影响因子研究. *水土保持研究*, 3, 146–154.]
- Zhang HP, Simmonds LP, Morison JIL, Payne D (1997). Estimation of transpiration by single trees: Comparison of sap flow measurements with a combination equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 155–169.
- Zhang JG, Kume T, Otsuke K, Yamanaka N, Du S (2011). Sap flow dynamics of dominant trees of *Quercus liaotungensis* forest in the semiarid Loess Plateau region. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(4), 64–69. [张建国, 久米朋宣, 大规恭一, 山中典和, 杜盛 (2011). 黄土高原半干旱区辽东栎的树干液流动态. *林业科学*, 47(4), 64–69.]

责任编辑: 赵平 责任编辑: 李敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答