

DOI: 10.5846/stxb201903060423

凌海燕,刘世荣,栾军伟,刘晓静,牛晓栋,张京磊,李想.模拟穿透雨减少对锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)树干液流密度的影响.生态学报,2020,40(8): - .

Ling H Y, Liu S R, Luan J W, Liu X J, Niu X D, Zhang J L, Li X. Effects of manipulated throughfall reduction on sap flux density of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): - .

## 模拟穿透雨减少对锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*) 树干液流密度的影响

凌海燕<sup>1</sup>, 刘世荣<sup>1,2,\*</sup>, 栾军伟<sup>1</sup>, 刘晓静<sup>3</sup>, 牛晓栋<sup>2</sup>, 张京磊<sup>2</sup>, 李想<sup>2</sup>

1 国际竹藤中心竹藤资源与环境研究所, 北京 100102

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

3 河南宝天曼国家级自然保护区管理局, 南阳 474350

**摘要:**降水格局变化是全球气候变化的重要特征之一, 未来气候变化下, 较为频繁和严峻的干旱将威胁地球中纬度部分地区的森林, 但森林植被如何响应季节性干旱胁迫及其机制尚不清楚。北亚热带—暖温带过渡区分布着以锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*) 为优势树种的落叶阔叶林, 研究其水分蒸腾代谢过程对干旱的响应是评估气候变化对过渡区天然落叶阔叶林生态系统水碳影响的关键科学问题。在典型的锐齿栎天然林中通过开展模拟穿透雨减少大型野外实验, 采用 Granier 热扩散式探针技术监测锐齿栎树干液流密度的动态变化, 研究了不同径级锐齿栎树干液流密度对模拟干旱的响应规律。结果表明: (1) 穿透雨减少对树干液流密度的影响呈现季节变异。在 7 月份, 林内穿透雨减少显著降低了锐齿栎的树干液流密度, 但生长季后期的 10 月份林内穿透雨减少反而使锐齿栎树干液流密度显著升高。(2) 不同径级的锐齿栎树干液流密度在生长季内对干旱有不同的响应, 特别是小径级的树干液流密度与其他径级有较多的不同。小径级的锐齿栎树干液流密度在 5、7 月份表现为减雨样地显著小于对照样地, 在 9、10 月份则表现为减雨样地显著大于对照样地。中径级的锐齿栎树干液流密度在 5、10 月份表现为减雨样地显著大于对照样地, 在 7 月份则表现为减雨样地极显著小于对照样地。大径级的锐齿栎树干液流密度在 6、7 月份表现为减雨样地显著小于对照样地, 在 10 月份则表现为减雨样地显著大于对照样地。

**关键词:** 锐齿栎; 树干液流密度; 穿透雨减少; 热扩散探针; 土壤含水量

## Effects of manipulated throughfall reduction on sap flux density of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*

LING Haiyan<sup>1</sup>, LIU Shirong<sup>1,2,\*</sup>, LUAN Junwei<sup>1</sup>, LIU Xiaojing<sup>3</sup>, NIU Xiaodong<sup>2</sup>, ZHANG Jinglei<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>2</sup>

1 Institute of Resource and Environment of Bamboo and Rattan, International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

2 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Baotianman National Nature Reserve Administrative Bureau, Nanyang 474350, China

**Abstract:** The change in precipitation pattern is one of the characteristics of global climate change. Some regions at mid-latitude might experience more frequent and severe drought. However, it is unclear how the precipitation change will affect the forest vegetation in those regions. Amongst, *Quercus aliena* var. *acuteserrata* is the dominant canopy tree species of deciduous broad-leaved forests in the warm temperate zone of middle China. Understanding the evapotranspiration responses of *Q. aliena* to drought induced by climate change is crucial to elucidate carbon-water coupling process. In order to explore the warm-temperate deciduous broad-leaved forest response to precipitation change, a manipulated throughfall reduction

基金项目: 国际竹藤中心基本科研业务费专项基金项目(1632018002, 1632018004, 1632017016); 国家重点研发计划(2018YFC0507301)

收稿日期: 2019-03-06; 网络出版日期: 2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

experiment was conducted in Baotianman National Nature Reserve since 2013. The Granier thermal diffusion probe (TDP) was used to measure the dynamic change of sap flux density of *Q. aliena*. The results showed that the throughfall reduction had significant effects on the sap flux density ( $J_s$ ) during the growing season. Firstly, the throughfall reduction significantly reduced the sap flux density of *Q. aliena* in July. However, in the late growing season (October), the throughfall reduction increased the sap flux density of *Q. aliena* significantly. Therefore, the sap flux density of *Q. aliena* differently responded to the throughfall reduction among months during the growing season. Secondly, the sap flux density of *Q. aliena* of different tree sizes showed different responses to drought during the growing season, especially the small trees (diameter at breast height,  $DBH \leq 21$  cm) was different from that of medium ( $21 \text{ cm} < DBH < 30 \text{ cm}$ ) and large ( $DBH \geq 30 \text{ cm}$ ) trees. For example, the sap flux density of the small trees were significantly reduced by throughfall reduction in May and July, but were significantly raised in September and October. The sap flux density of the medium trees were raised by throughfall reduction in May and October, but were decreased in July. The sap flux density of the large trees were decreased by the throughfall reduction in June and July, but were raised in October.

**Key Words:** *Quercus aliena* var. *acuteserrata*; sap flux density; throughfall reduction; thermal diffusion probe; soil water content

伴随着全球气候变化,区域的降水格局发生了显著改变,造成水分分配不均和季节性干旱的现象<sup>[1]</sup>。这不仅极大地影响了区域水循环,而且还影响了土壤—植被—大气连续体系统<sup>[2]</sup>。森林生态系统具有极强的碳固持和水源涵养功能,树木的蒸腾耗水对区域水循环和碳循环均有较大的影响,因此,植被蒸腾成为了全球气候变化生态学研究关注的重要问题。树干液流密度可以长期、连续和较准确地反映单木水分蒸腾<sup>[3]</sup>。通过测定树干液流密度,探求树木的蒸腾耗水特征及其对环境变化的响应,在森林生态系统的水分循环研究中得到广泛应用<sup>[4-5]</sup>。

不同树种的树干液流密度在不同环境条件下呈现出不同的变化特征,大多数研究只是定性地描述了树种之间的差异<sup>[6]</sup>。同一树种(如:毛白杨 *Populus tomentosa*、雪松 *Cedrus deodara*、香樟 *Cinnamomum camphora*)的整树蒸腾量随着胸径的增大而增大<sup>[7]</sup>。树木胸径、边材面积<sup>[8]</sup>、太阳辐射以及空气水汽压亏缺等<sup>[9]</sup>均可影响树木的蒸腾量。较大的树木因其根系较深和茎干储水能力强,能更好地适应夏季干旱<sup>[10]</sup>。然而,红桦(*Betula albosinensis*)的蒸腾作用与土壤含水量之间无直接关系<sup>[11]</sup>。连续 2 个月的短期减雨处理对菜豆树(*Radermachera sinica*)和圆叶乌桕(*Sapium rotundifolium*)的树干液流密度无显著影响<sup>[12]</sup>。美国西部科罗拉多州的美洲山杨(*Populus tremuloides*)<sup>[13]</sup>和澳大利亚东北部昆士兰州的桉树(*Eucalyptus robusta*)<sup>[14]</sup>,由于干旱,造成树木水分供应不足,发生了大面积死亡的现象。在长白山移除 2 个月的林内穿透雨后,土壤含水量下降了 24.6%,但成熟蒙古栎(*Quercus mongolica*)的光合生理、水分生理并没有受到影响<sup>[15]</sup>。以树干液流密度为代表的树木水分代谢过程对干旱响应的生理生态学机制还缺乏深入的研究。

锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)作为优势树种广泛分布于华北暖温带落叶阔叶林区,在河南宝天曼地区常形成以锐齿栎为单优势种的落叶阔叶林<sup>[16]</sup>。本研究在宝天曼森林生态站建立模拟干旱的野外固定实验样地,利用热扩散探针技术,测定锐齿栎不同径级树干液流密度的动态变化,分析其对模拟林内穿透雨减少后的响应规律及其原因。研究目的是:(1)揭示模拟降雨减少下锐齿栎树干液流密度的季节变化规律,探究锐齿栎树干液流密度对干旱的响应;(2)不同径级锐齿栎的树干液流密度对干旱的响应特征是否一致;(3)阐明干旱胁迫环境条件下,树干液流密度与叶片生理参数及环境因子之间的关系。在此基础上,评价锐齿栎对气候变化背景下干旱的响应,解析干旱对锐齿栎水分利用特征的影响。本研究可为认识锐齿栎生态系统的耗水特征及其对气候变化背景下干旱的响应提供基础数据,也为制定暖温带落叶阔叶林适应气候变化的管理对策提供科学依据。

## 1 实验地概况和研究方法

### 1.1 研究区域

研究地点位于河南省西南部的南阳市内乡县宝天曼国家级自然保护区内的宝天曼森林生态系统定位研究站,属伏牛山南坡(111°47′—12°04′ E, 33°20′—33°36′ N),是暖温带向亚热带过渡地区,属大陆性季风气候。宝天曼的最高海拔为 1830 m,研究地海拔约 1400 m。年均降水量 900 mm,年蒸发量 991.6 mm,年平均气温 11—14 °C,气温在年际间的变化比较稳定。2018 年观测期内 5 月份降雨量最高,为 186.2 mm,5—8 月份降雨量均超过 100 mm,10 月份降雨量只有 8.8 mm;最高气温为 7 月份,月均温达 21.3 °C,生长季内雨热基本同

期(图 1)。研究地区植物种类丰富,共有种子植物 150 科 783 属 2147 种,植被区划属暖温带落叶阔叶林,林冠层优势树种是锐齿栎,占林分树种组成的 65%,林分平均年龄约为 65 年,锐齿栎的树高基本在 20 m 左右,2015 年锐齿栎的平均胸径为 25.2 cm<sup>[16]</sup>。样地内亚冠层小乔木伴生种有短柄枹(*Quercus brevipedunculata*)、四照花(*Dendrobenthamia japonica*)、化香(*Platycarya strobilacea*)、三桠乌药(*Lindera obtusiloba*)、水榆花楸(*Sorbus alnifolia*)等。

### 1.2 减雨实验设计

依托宝天曼森林生态系统定位研究站,在以锐齿栎为优势树种的天然林中,建立了 6 块(20×20 m<sup>2</sup>)标准样地,设计了林内穿透雨减少(减雨)和对照 2 种不同的实验处理,每个处理 3 个重复。在减雨样地内安装 1.5—2.5 m 高的不锈钢钢架搭上减雨膜(主要拦截林内穿透雨),由导水槽将截留的雨水导出样地。每块减雨样地四周均设有 70 cm 深的透明隔水板,防止样地内外土壤水分交换。样地建于 2013 年,每年(5—10 月)对减雨样地进行覆膜减雨,减雨膜的覆盖面积占样地面积的 50%,减雨量约占年降雨量的 30%<sup>[17]</sup>。2018 年 5 月开始将减雨膜覆盖面积增加至 70%,实际样地减雨量约占年降雨量的 40%,以适度增加减雨样地的水分胁迫。

2018 年 4 月在每块减雨样地和对照样地中分别选取 15 棵生长良好,树干通直、无被挤压现象的锐齿栎作为测定树干液流密度的对象。每个样地锐齿栎分三个径级(胸径≤21 cm 为小径级、21—30 cm 为中径级、≥30 cm 为大径级),每个径级长期连续测定 5 棵。由于 2018 年 7 月遭受强雷击事件,造成部分观测仪器设备损坏,因此,锐齿栎树干液流密度的数据只采用了一个减雨样地和一个对照样地在 2018 年 5—10 月份的数据。减雨样地和对照样地样树的平均胸径分别为 25.5、26.3 cm,平均冠幅分别为 14.2、16.7 m<sup>2</sup>,边材面积分别为 188.9、198.1 cm<sup>2</sup>,样树基本特征见表 1(对照样地实际有效样树只有 13 棵)。

### 1.3 测定指标及方法

#### 1.3.1 树干液流密度的测定

2018 年 4 月对选定锐齿栎安装探针,Granier 探针安装方法参照赵平等<sup>[3]</sup>,即在锐齿栎树干胸高处、正北方向进行安装。将探针与数据采集器 CR1000-ST(Campbell Scientific, Logan, UT, USA)和通道扩展版 AM16/32B(Campbell Scientific, Logan, UT, USA)相连,每 10 s 读一次数据,每 10 min 进行平均并记录一次数据,每隔一星期导出数据并使用软件计算树干液流密度。

探针读取的原始电压值,需要借助 Granier 经验公式换算为液流密度值<sup>[18]</sup>:

$$J_s = 119 \times \left( \frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231}$$

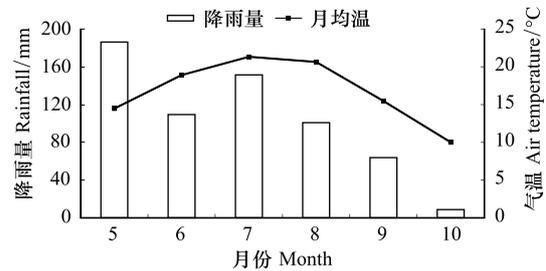


图 1 2018 年生长季降雨及气温变化特征

Fig.1 Characteristics of rainfall and air temperature change in the growth season of 2018

式中,  $(J_s)$  为瞬时液流密度 (sap flux density) ( $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $(\Delta T_m)$  为昼夜最大温差,  $(\Delta T)$  为瞬时温差。瞬时液流密度 ( $J_s$ ) 的计算采用美国杜克大学环境学院植物生理生态实学实验室 Ram Oren 团队开发的 Basliner 3.0.8 软件<sup>[10]</sup>。

表 1 样树的基本特征

Table 1 Characteristics of measured trees

样树 Tree number	胸径 Diameter at breast high/cm	冠幅 Canopy width/ $\text{m}^2$	边材面积 Sapwood area/ $\text{cm}^2$	样树 Tree number	胸径 Diameter at breast high/cm	冠幅 Canopy width/ $\text{m}^2$	边材面积 Canopy width/ $\text{cm}^2$
TR1	18.3	4.0	106.5	TR15	34.7	36.0	293.4
TR2	18.7	3.0	111.0	CK1	18.5	0.7	108.8
TR3	19.6	26.0	121.3	CK2	19.0	5.1	114.5
TR4	19.9	7.5	124.7	CK3	20.9	5.4	136.1
TR5	20.1	9.0	127.0	CK4	20.7	6.0	133.8
TR6	22.4	12.0	153.2	CK5	23.3	8.0	163.5
TR7	23.0	14.4	160.1	CK6	24.7	15.2	179.4
TR8	23.5	6.0	165.8	CK7	25.9	15.0	193.1
TR9	24.0	9.9	171.5	CK8	27.5	21.0	211.4
TR10	25.2	13.5	185.1	CK9	28.4	12.1	221.6
TR11	30.5	16.5	245.5	CK10	31.1	24.0	252.4
TR12	34.2	8.0	287.7	CK11	32.8	36.0	271.8
TR13	32.3	7.5	266.1	CK12	33.8	12.0	283.2
TR14	36.5	39.2	313.9	CK13	35.8	56.0	306.0

TR: 减雨 Throughfall reduction; CK: 对照 Control

### 1.3.2 环境因子测定

(1) 气象因子数据来源于宝天曼国家森林生态系统定位研究站的蛮子庄自动气象站, 降雨量 (Rainfall) 由翻斗式自计雨量计 (Davis Rain collector II model 7F852, Davis Instruments, USA) 测定、光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation) 由 (Model LI190SB, Li-cor, Inc., USA) 测定、空气温度 (Air Temperature) 和空气相对湿度 (Air Relative Humidity) 由 (Model HMP45D Vaisala, Finlan) 测定。将每半小时的平均值自动记录于数据采集器 CR3000 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA) 和通道扩展模块 AM16/32B (Campbell Scientific, Logan, UT, USA) 内。

(2) 每个减雨样地与对照样地内均在距土壤表面 5 cm、20 cm、30 cm 设有 5TM 传感器 (Decagon Devices, Inc., USA), 5TM 传感器可以测定土壤温度 (Soil Temperature) 和土壤含水量 (Soil Moisture Content), 数据每半个小时平均一次并记录, 由 Em50 Series 数据采集系统 (Decagon Devices, Inc., USA) 进行储存。

### 1.3.3 植物叶片光合生理的测定

使用便携式光合仪 (LI-6400XT, Li-Cor, Lincoln Inc. NE, USA) 测定锐齿栎叶片的光合速率 (Photosynthetic Rate)、气孔导度 (Stomatal Conductance) 以及蒸腾速率 (Transpiration Rate), 由于锐齿栎树高基本在 20 m 左右, 直接冠层测量存在一定困难, 因此采用离体测量法。每个样地用高枝剪剪下向阳的枝条放入水中每次测定 3 个叶片, 每个叶片重复测 3 次, 2018 年 5—9 月每月测定 1 次日变化 (7:00—18:00)。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件进行独立样本 T 检验, 分析减雨样地和对照样地不同径级锐齿栎树干液流密度的差异。采用 Pearson 相关分析, 研究液流密度和光合速率、气孔导度以及蒸腾速率的相关性, 分析影响锐齿栎树干液流密度的叶片光合生理参数。采用逐步多元回归分析, 研究液流密度和空气温度、光合有效辐射、空气相对湿度、土壤温度和土壤含水量的关系, 分析树干液流密度的驱动因子在降雨减少后的变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 穿透雨减少对生长季内土壤温度和土壤含水量的影响

2018 年生长季内,不同深度的土壤温度随时间均呈先升高后下降的趋势(图 2),5—8 月份减雨样地与对照样地均表现为表层土壤温度(5 cm)高于深层土壤温度(30 cm),9—10 月份则表现为表层土壤温度(5 cm)低于深层土壤温度(30 cm)。不同深度的土壤含水量变化与降雨事件存在很大关系。对照样地的土壤含水量在 5—8 月份表现为:30 cm>20 cm>5 cm,在 9—10 月份则表现为:30 cm>5 cm>20 cm。减雨样地不同深度的土壤含水量变化较大,整体表现为减雨样地的土壤含水量小于对照样地。

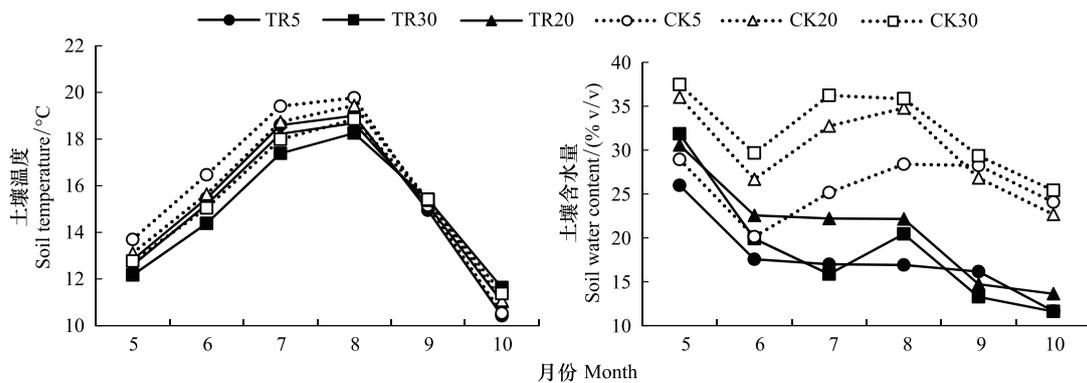


图 2 生长季样地土壤温度和土壤含水量动态

Fig.2 Dynamics of soil temperature and soil moisture content in the growth season

TR: 减雨 Throughfall reduction, 即:TR5、TR20、TR30 分别表示减雨样地距土壤表面 5 cm、20 cm、30 cm 的土层深度数据; CK: 对照 Control, 即:CK5、CK20、CK30 分别表示对照样地距土壤表面 5 cm、20 cm、30 cm 的土层深度数据

### 2.2 穿透雨减少对锐齿栎树干液流密度的影响

在生长季内,减雨样地和对照样地中不同径级的锐齿栎树干液流密度在不同月份的月均值(忽略夜间液流密度,取每天 5:00—19:00 的数据求得日均值再进行月均值计算)有所不同(图 3),6、7 月份减雨样地中的平均树干液流密度小于对照样地,而随着减雨处理时间的累积,8—10 月份减雨样地的平均树干液流密度大于对照样地。小径级的树干液流密度,在 5—7 月份减雨样地低于对照样地,而在 8—10 月份减雨样地高于对照样地;且小径级的树干液流密度在 5、9、10 月份有显著性差异,在 7 月份达到极显著性差异。中径级的树干液流密度,只在 7 月份减雨样地显著低于对照样地;且在 5、7、10 月份有极显著性差异。大径级的树干液流密度,在 6—9 月份减雨样地低于对照样地;且在 7、10 月份有极显著性差异,在 6 月份有显著性差异。

### 2.3 生长季内树干液流密度与叶片生理参数及环境因子的相关关系

#### 2.3.1 锐齿栎的树干液流密度与叶片生理参数的相关关系

从表 2 可以看出,在减雨样地,锐齿栎树干液流密度与气孔导度及蒸腾速率存在极显著的正相关关系( $P<0.01$ ),与光合速率存在显著的正相关关系( $P<0.05$ );在对照样地,锐齿栎树干液流密度与光合速率、气孔导度、蒸腾速率均存在极显著的正相关关系( $P<0.01$ )。

#### 2.3.2 锐齿栎的树干液流密度与环境因子的关系

对不同径级锐齿栎的树干液流密度与环境因子进行逐步多元回归分析表明(表 3),锐齿栎的树干液流密度均受空气相对湿度和光合有效辐射的影响,锐齿栎树干液流密度与空气相对湿度呈负相关,与光合有效辐射呈正相关。对照样地锐齿栎树干液流密度的影响因子有土壤含水量,而减雨样地中土壤含水量这个因子不进入回归模型。建立的回归模型,均具有显著性,判定系数  $R^2$  也较大,因此模型能较好地说明不同径级的锐齿栎树干液流密度随影响因子变化而变化的规律。

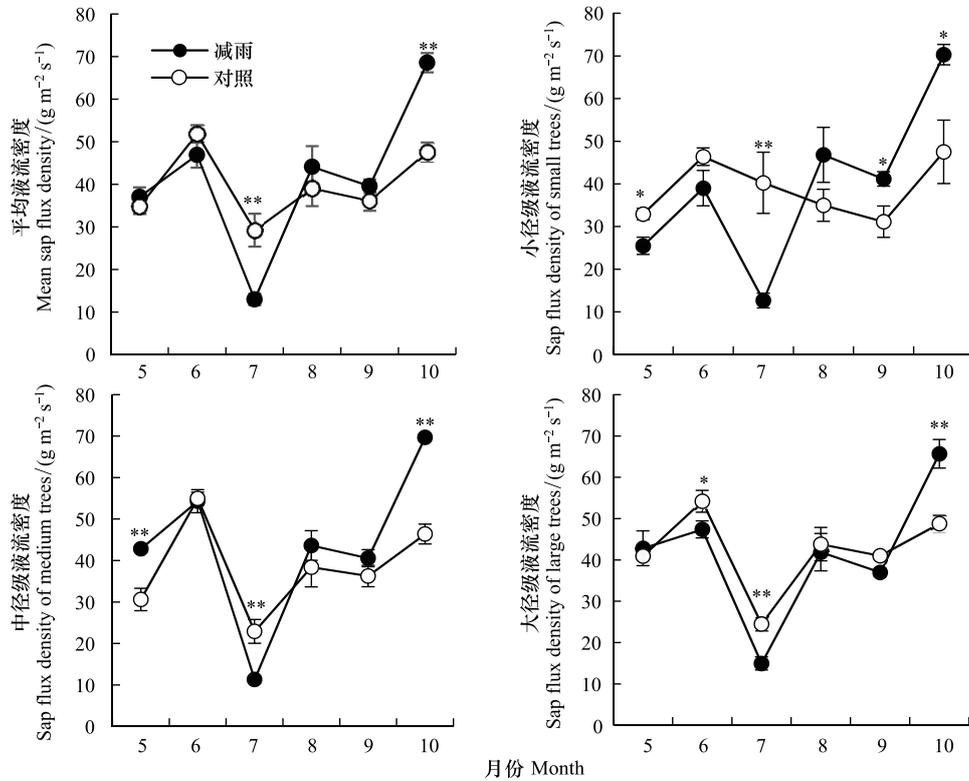


图3 不同径级的树干液流密度

Fig.3  $J_s$  of different diameter classes

TR: 减雨 Throughfall reduction; CK: 对照 Control; \*\* 表示处理间液流密度差异极显著 ( $P < 0.01$ ); \* 表示处理间液流密度差异显著 ( $P < 0.05$ )

表2 液流密度与光合速率、气孔导度、蒸腾速率的 Pearson 相关关系

Table 2 The correlation between Sap flux density and photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate

减雨 Throughfall reduction	液流密度 Sap flux density	光合速率 Photosynthetic rate	气孔导度 Stomatal conductance	蒸腾速率 Transpiration rate	对照 Control	液流密度 Sap flux density	光合速率 Photosynthetic rate	气孔导度 Stomatal conductance	蒸腾速率 Transpiration rate
液流密度 Sap flux density	1				液流密度 Sap flux density	1			
光合速率 Photosynthetic rate	0.335 *	1			光合速率 Photosynthetic rate	0.403 **	1		
气孔导度 Stomatal conductance	0.444 **	0.384 *	1		气孔导度 Stomatal conductance	0.366 **	0.221	1	
蒸腾速率 Transpiration rate	0.378 **	0.535 **	0.716 **	1	蒸腾速率 Transpiration rate	0.338 **	0.293 *	0.698 **	1

\*\* 表示极显著性相关 ( $P < 0.01$ ); \* 表示显著性相关 ( $P < 0.05$ )

### 3 讨论

由图1和图2可以看出,生长季内降雨量少的月份,土壤含水量也较少,减雨样地的土壤含水量显著小于对照样地。林内穿透雨减少对锐齿栎树干液流密度产生了影响,随着时间累积,减雨样地的树干液流密度显著高于对照样地(图3)。Fisher等<sup>[19]</sup>在亚马逊河东部的实验发现经减雨处理会降低林分蒸腾量,Besson等<sup>[20]</sup>通过在葡萄牙南部进行的截留降雨和灌溉试验同样得出截留降雨后降低了林分蒸腾量的结论。而锐齿栎树干液流密度在干旱条件下上升的原因,由于随着减雨处理时间加长,土壤含水量降低,促使锐齿栎呈现适

应性响应,吸收更多水分来维持树木本身水分的需求。以往的研究结果也有发现,对于一些落叶树种,干旱并不会导致其树干液流密度下降,但叶片会在生长季的后期提前衰老、凋落<sup>[21]</sup>。锐齿栎为落叶阔叶树种,其生长季与雨季对应,因此,锐齿栎生长季内极少出现严重或长期的缺水干旱现象;而降水较少的春、冬季节与锐齿栎非生长季对应,其对水分的需求较低,因此不影响锐齿栎生长。干旱在一定程度上可以提高植物的水分利用效率,土壤含水量对干旱时期林分蒸腾有显著影响<sup>[9]</sup>,且对液流密度的总体水平起到决定作用<sup>[22]</sup>。锐齿栎通过在干旱时提高树干液流密度以满足树干和叶片的水分需求。

表 3 液流密度与环境因子的多元线性回归

Table 3 Multiple regression equations between  $J_s$  and main environmental factors

多元回归方程 Multiple stepwise regression equation	判定系数 $R^2$	显著度 Sig.
TR(DBH $\leq$ 21cm) = -2.182RH+0.097PAR-3.292 $T_a$ +283.525	0.66	<0.001
TR(21cm<DBH<30cm) = -1.656RH +0.099PAR-5.04 $T_s$ +271.735	0.72	<0.001
TR(DBH $\geq$ 30cm) = -0.94RH +0.116PAR -5.521 $T_s$ +210.607	0.58	<0.001
TR(mean) = -1.506RH +0.096PAR -4.649 $T_s$ +248.598	0.67	<0.001
CK(DBH $\leq$ 21cm) = -0.683RH +0.14PAR-2.748 $T_s$ +128.857	0.72	<0.001
CK(21cm<DBH<30cm) = -1.526RH +0.082PAR-1.943 $T_s$ +5.96SWC+71.657	0.81	<0.001
CK(DBH $\geq$ 30cm) = -0.689RH +0.068PAR +5.169 $T_a$ -8.476 $T_s$ +6.43SWC+14.011	0.72	<0.001
CK(mean) = -0.971RH+0.088PAR+2.496 $T_a$ -5.35 $T_s$ +5.985SWC +35.914	0.78	<0.001

TR: 减雨 Throughfall reduction, CK: 对照 Control.  $T_a$ : 空气温度 Air temperature, RH: 空气相对湿度 Air relative humidity, PAR: 光合有效辐射 Photosynthetically active radiation,  $T_s$ : 土壤温度 Soil temperature, SWC: 土壤含水量 Soil water content

减雨样地与对照样地不同径级的锐齿栎树干液流密度存在差异,小径级的树干液流密度经减雨处理后,受到的影响比其他径级大,说明胸径大小在一定程度上影响树干液流密度与土壤含水量的关系(图 2、图 3),与熊伟等<sup>[23]</sup>研究华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)得出的结论一致。罗超等<sup>[24]</sup>发现土壤表层含水量降低时,地下水会在毛管力的作用下使土壤表层水分得到补充,以满足杨树(*Populus*)的生长需求。小径级的锐齿栎冠幅较小,相对应的根系也较小,易受浅层土壤含水量的影响,吕金林等<sup>[25]</sup>研究辽东栎(*Quercus liaotungensis*)发现小径级的树木同样对土壤含水量变化敏感。万艳芳等<sup>[26]</sup>研究发现,青海云杉(*Picea crassifolia*)优势木与被压木相比具有较大的平均液流密度,原因是具有较大冠幅和胸径的优势木能获得更多的水分、营养等资源。可能是由于胸径较大的树木存在较厚的导水及储水组织,使树干液流密度不易受土壤含水量的影响。

无论在减雨样地还是在对照样地,锐齿栎树干液流密度跟叶片光合速率、气孔导度、蒸腾速率均存在显著正相关关系(表 2)。叶片水平上的光合速率和蒸腾速率与单株水平上的树干液流密度虽呈显著性相关,但仍表现出一定的不同步<sup>[21]</sup>。气候变化后,植物会在生理水平上进行一定的调整,短时间内通过调整叶片气孔导度来适应环境变化<sup>[27]</sup>。叶片气孔导度的大小决定了树干液流密度的大小,气孔可以根据环境条件的变化来调节自己开度的大小而使植物在损失水分较少的条件下获取最多的  $\text{CO}_2$ <sup>[28]</sup>,从而得到最大的光合有效速率。陈志成等<sup>[16]</sup>在同一实验样地进行锐齿栎的水力结构研究发现,穿透雨减少后,锐齿栎的叶片气孔密度变大,但气孔长度变小,说明了减雨样地的锐齿栎发生了适应性调节。

树干液流密度在时间尺度上的变化主要是由各种环境因子的共同作用造成的(表 3)。姚依强等<sup>[29]</sup>发现树干液流密度与环境因子的关系会随时间而发生显著改变。本研究中,减雨样地与对照样地不同径级的锐齿栎树干液流密度均与光合有效辐射呈正相关关系,而与空气相对湿度呈负相关关系,这与卢志朋等<sup>[30]</sup>研究结果一致。宝天曼具有极大的空气相对湿度(生长季的大部分时候达 90%以上),保证了锐齿栎生长时的水分需求,即使加大对林内穿透雨的截留面积,周围空气中的水分也会扩散到减雨样地。在降雨减少后,减雨样地与对照样地的所有环境驱动因子中最大的不同就是土壤含水量。土壤含水量的适度减少会提高植物的水分

利用效率<sup>[31]</sup>,但本研究的结果表明,土壤含水量不是影响减雨样地树干液流密度的重要因子。

#### 4 结论

在暖温带锐齿栎天然林中通过穿透雨减少模拟气候干旱,土壤含水量显著降低,导致锐齿栎树干液流密度呈现干旱胁迫响应。锐齿栎树干液流密度在生长季6—7月份对林内穿透雨减少处理后呈现下降趋势,但在生长季的5月份和8—9月份不同径级锐齿栎出现差异性响应,特别是小径级的锐齿栎液流密度对土壤含水量下降响应多变,表明不同径级锐齿栎对水分胁迫呈现不同的适应性响应。在以后的研究中,还需要长期和深入地加强穿透雨减少处理后锐齿栎树干液流密度与叶片冠层生理、树木地上茎干和地下根系生长等相互作用关系的研究。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Huang G, Li Y, Su Y G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, Northwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 83: 52-56.
- [ 2 ] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 95-123.
- [ 3 ] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. 马占相思 (*Acacia mangium*) 树干液流密度和整树蒸腾的个体差异. *生态学报*, 2006, 26(12): 4050-4058.
- [ 4 ] Čermák J, Kučera J, Nadezhdina N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees*, 2004, 18(5): 529-546.
- [ 5 ] Reyes-Acosta J L, Lubczynski M W. Optimization of dry-season sap flow measurements in an oak semi-arid open woodland in Spain. *Ecohydrology*, 2014, 7(2): 258-277.
- [ 6 ] Jian S Q, Wu Z N, Hu C H, Zhang X L. Sap flow in response to rainfall pulses for two shrub species in the semiarid Chinese Loess Plateau. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2016, 64(2): 121-132.
- [ 7 ] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 徐海龙, 李俊生, 蒲英霞. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征. *生态学报*, 2018, 38(12): 4234-4244.
- [ 8 ] Laiju N, Otieno D, Jung E Y, Lee B R, Tenhunen J, Lim J H, Sung J H, Kang S K. Environmental controls on growing-season sap flow density of *Quercus serrata* Thunb in a temperate deciduous forest of Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 2012, 35(3): 213-225.
- [ 9 ] 倪广艳, 赵平, 朱丽薇, 牛俊峰, 赵秀华, 曾小平. 荷木整树蒸腾对干湿季土壤水分的水力响应. *生态学报*, 2015, 35(3): 652-662.
- [ 10 ] Macinnis-Ng C, Wyse S, Veale A, Schwendenmann L, Clearwater M. Sap flow of the southern conifer, *Agathis australis* during wet and dry summers. *Trees*, 2016, 30(1): 19-33.
- [ 11 ] Yan C H, Wang B, Zhang Y, Zhang X N, Takeuchi S, Qiu G Y. Responses of sap flow of deciduous and conifer trees to soil drying in a subalpine forest. *Forests*, 2018, 9(1): 32.
- [ 12 ] 张慧玲, 丁亚丽, 陈洪松, 王克林, 聂云鹏. 出露基岩生境典型植物树干液流对自然降水和连续干旱的响应特征. *应用生态学报*, 2018, 29(4): 1117-1124.
- [ 13 ] Worrall J J, Egeland L, Eager T, Mask R A, Johnson E W, Kemp P A, Shepperd W D. Rapid mortality of *Populus tremuloides* in southwestern Colorado, USA. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 686-696.
- [ 14 ] Fensham R J, Fairfax R J. Drought-related tree death of savanna eucalypts: species susceptibility, soil conditions and root architecture. *Journal of Vegetation Science*, 2007, 18(1): 71-80.
- [ 15 ] 程徐冰, 吴军, 韩士杰, 周玉梅, 王秀秀, 王存国, 隋心, 闫彩凤. 减少降水对长白山蒙古栎叶片生理生态特性的影响. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 1908-1914.
- [ 16 ] 陈志成, 陆海波, 刘世荣, 刘晓静, 刘畅, 万贤崇. 锐齿栎水力结构和生长对降雨减少的响应. *生态学报*, 2018, 38(7): 2405-2413.
- [ 17 ] Lu H B, Liu S R, Wang H, Luan J W, Schindlbacher A, Liu Y C, Wang Y. Experimental throughfall reduction barely affects soil carbon dynamics in a warm-temperate oak forest, central China. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 15099.
- [ 18 ] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [ 19 ] Fisher R A, Williams M, da Costa A L, Malhi Y, da Costa R F, Almeida S, Meir P. The response of an eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2361-2378.

- [20] Besson C K, Lobo-do-Vale R, Rodrigues M L, Almeida P, Herd A, Grant O M, David T S, Schmidt M, Otieno D, Keenan T F, Gouveia C, Mériaux C, Chaves M M, Pereira J S. Cork oak physiological responses to manipulated water availability in a Mediterranean woodland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 184: 230-242.
- [21] 夏江宝, 张淑勇, 朱丽平, 赵自国, 赵艳云. 贝壳堤岛酸枣树干液流及光合参数对土壤水分的响应特征. *林业科学*, 2014, 50(10): 24-32.
- [22] 李浩, 胡顺军, 王泽峰. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭茎干液流变化及其对环境因子的响应. *干旱区地理*, 2017, 40(4): 795-804.
- [23] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 刘海龙, 徐丽宏, 时忠杰, 莫菲. 华北落叶松树干液流的个体差异和林分蒸腾估计的尺度上推. *林业科学*, 2008, 44(1): 34-40.
- [24] 罗超, 查同刚, 朱梦洵, 朱志俊, 王子尧, 刘文娜. 浅层地下水对华北地区河岸杨树林树干液流的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1401-1407.
- [25] 吕金林, 何秋月, 闫美杰, 李国庆, 杜盛. 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.
- [26] 万艳芳, 于澎涛, 刘贤德, 王顺利, 王彦辉, 熊伟. 祁连山青海云杉树干液流密度的优势度差异. *生态学报*, 2017, 37(9): 3106-3114.
- [27] Chaves M M. Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of Experimental Botany*, 1991, 42(1): 1-16.
- [28] Doronila A I, Forster M A. Performance measurement via sap flow monitoring of three *Eucalyptus* species for mine site and dryland salinity phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17(2): 101-108.
- [29] 姚依强, 陈珂, 王彦辉, 王艳兵, 李振华, 徐丽宏, 韩新生. 华北落叶松树干液流速率主要影响因子及关系的时间尺度变化. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2): 155-161.
- [30] 卢志朋, 魏亚伟, 李志远, 郭鑫炜, 周永斌. 辽西北沙地樟子松树干液流的变化特征及其影响因素. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3182-3189.
- [31] Rouhi V, Samson R, Lemeur R, Van Damme P. Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2): 117-129.