

# 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

张慧玲<sup>1,2,3</sup> 丁亚丽<sup>1,2,3</sup> 陈洪松<sup>1,2</sup> 王克林<sup>1,2</sup> 聂云鹏<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; <sup>2</sup>中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100; <sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 以西南喀斯特地区常见的出露基岩生境为研究对象, 针对该类生境典型乔木类植物菜豆树和圆叶乌桕, 应用 TDP 热扩散探针技术, 结合遮雨试验, 分析了植物树干液流对自然降水和连续干旱的响应特征。结果表明: 在生长季不同时期, 降水后 2 树种液流密度较降水前均有一定程度的升高, 但始终呈现落叶乔木圆叶乌桕高于半落叶乔木菜豆树的特征; 连续 2 个月遮雨条件下, 2 树种液流密度均无明显降低的趋势, 表明 2 树种均不依赖受近期降水主导的水源; 通过对降水前后及连续干旱条件下 2 树种液流密度与环境因子的拟合关系研究发现, 气象因素差异对水分环境变化条件下植物蒸腾耗水的影响较小。自然降水和短时期的连续干旱并未显著改变 2 树种的蒸腾耗水特征, 这可能与出露基岩生境特殊的水分蓄持环境和乔木类植物依赖相对稳定的深层水源有关。

**关键词** 喀斯特; 菜豆树; 圆叶乌桕; 液流密度; 蒸腾耗水量

**Responses of sap flow to natural rainfall and continuous drought of tree species growing on bedrock outcrops.** ZHANG Hui-ling<sup>1,2,3</sup>, DING Ya-li<sup>1,2,3</sup>, CHEN Hong-song<sup>1,2</sup>, WANG Ke-lin<sup>1,2</sup>, NIE Yun-peng<sup>1,2\*</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; <sup>2</sup>Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, Guangxi, China; <sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

**Abstract:** This study focused on bedrock outcrops, a very common habitat in karst region of south-west China. To reveal the responses of plant transpiration to natural rainfall and continuous drought, two tree species typical to this habitat, *Radermachera sinica* and *Triadica rotundifolia*, were selected as test materials. A rainout shelter was used to simulate continuous drought. The sap flow dynamics were monitored using the method of Granier's thermal dissipation probe (TDP). Our results showed that sap flow density increased to different degrees after rain in different stages of the growing season. Sap flow density of the deciduous species *T. rotundifolia* was always higher than that of the semi-deciduous species *R. sinica*. After two months without rainfall input, both species exhibited no obvious decrease in sap flow density, indicating that rainfall was not the dominant source for their water uptake, at least in the short-term. Based on the regression relationships between sap flow density and meteorological factors before and after rainfall, as well as at different stages of continuous drought, we found that the dynamics of meteorological factors contributed little to plant transpiration. The basic transpiration characteristics of both species were not changed in the circumstance of natural rainfall and short-term continuous drought, which would be closely related to the special water storage environments of bedrock outcrops and the reliance on deep water sources by tree species.

**Key words:** Karst; *Radermachera sinica*; *Triadica rotundifolia*; sap flow density; transpiration water consumption.

本文由国家重点研发计划项目(2016YFC0502402)、国家自然科学基金项目(31570428)和中国科学院西部青年学者项目(聂云鹏)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0502402), the National Natural Science Foundation of China (31570428) and the Young Scholars of Western China (for Yunpeng Nie).

2017-05-18 Received, 2018-01-17 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nyp@isa.ac.cn

我国西南喀斯特地区(总面积约 54 万 km<sup>2</sup>)是全球三大喀斯特集中分布区(欧洲地中海沿岸、北美东部和中国西南部)中碳酸盐岩连片出露面积最大、岩溶发育最强烈的地区,也是景观类型复杂、生物多样性丰富、生态系统极为脆弱的典型地区<sup>[1-2]</sup>。在人口超载和经济社会落后的双重压力下,该地区植被破坏严重,水土流失不断加剧,产生了以石漠化为特征的土地退化。如何进行植被的恢复重建、实现水土资源的协调利用是该地区石漠化治理和消除贫困的关键<sup>[3]</sup>。该地区虽降水充沛,但因地表地下二元结构发育程度高、土层浅薄且分布不连续等原因,降雨只能维持雨后数日的湿润环境,加上降水时空分布不均,使得水分问题始终是该地区植被恢复重建的首要问题<sup>[4-5]</sup>。

自然恢复被视为喀斯特退化生态系统恢复与重建最重要和切实可行的途径<sup>[6]</sup>。自然恢复条件下,植被呈现片段化分布格局,无可见土分布的出露基岩生境大多对应着类似于次生林的群落结构,而大部分基岩出露率低、土层浅薄但分布较为连续的地段却长期处于先锋灌木和草本占优势的演替初级阶段<sup>[7]</sup>。对于长期处于低演替阶段的植物群落,首要任务是探索植被正向演替的关键限制因子,而对于自然是次生林的植物群落,关键是要弄清群落稳定性维持机制,首当其冲是揭示代表性植物种对水分条件变化的响应<sup>[8]</sup>。然而受喀斯特水文地质结构特殊性的影响,植物-水分关系方面的研究难以从根系等地下部分入手<sup>[9]</sup>。例如,目前仍无法对出露基岩生境地下相互连通的裂隙、管道以及底部密封或横向裂隙中存储的雨水进行动态监测,亦难以揭示代表性植物种根系在裂隙、管道中的穿插特征<sup>[10]</sup>。因此,相关研究需借助适宜的研究方法,从地上部分着手。

树干液流热消散技术克服了喀斯特地区下垫面特殊性的限制,可以连续动态地掌握整株树木的蒸腾耗水特征<sup>[11]</sup>。植物树干液流对降水的响应除了受自身生理特性的影响,主要还受降水后的水分条件(土壤供水)和周围气象因素的影响<sup>[12-13]</sup>。有研究表明,降水后由于土壤水分条件的改善,加速了木质部水力导度的释放,从而增大了液流速率<sup>[14-15]</sup>。另外,不同生活型,同种生活型不同地区植物对降水的响应可能存在较大差异<sup>[16]</sup>。例如,澳大利亚南部灌木种 *Isopogon gardneri* 在经历夏季 34 mm 降水后,液流迅速增加到降水前的 5 倍,桉属植物 *Eucalyptus wandoo* 对夏季降水并则没有响应<sup>[17-18]</sup>,而澳大利亚东部桉属植物 *Eucalyptus crebra* 的液流在经历夏季

5~20 mm 降水后快速增加<sup>[19]</sup>。连续干旱条件下,植物的蒸腾速率若超过植物水分吸收能力,将会造成植物水分长时间亏缺而导致其死亡<sup>[20]</sup>。为避免这种情况,植物会主动做出一系列的响应,以减轻干旱所造成的危害<sup>[21]</sup>,包括气孔开度的调节以防止植物体内水分的过度散失<sup>[22]</sup>,以及其他植物生理方面的响应以抑制植物光合蒸腾耗水等<sup>[21]</sup>。由此可见,树干液流能够有效地反映植物蒸腾耗水对水分条件变化,尤其是对自然降水和干旱胁迫的响应。另一方面,由于植物蒸腾耗水同时会受到环境因素中太阳辐射( $R_s$ )和水汽压亏缺(VPD)等的影响,通过分析树干液流与蒸腾变量(VT,能够反映 $R_s$ 与VPD的综合作用)的协同特征,能够分析植物对环境变化的适应性<sup>[23-25]</sup>。

本研究针对出露基岩生境代表性植物种圆叶乌桕(*Triadica rotundifolia*)和菜豆树(*Radermachera sinica*),应用 TDP 热扩散探针技术,结合遮雨试验,分析生长季不同时期自然降水和连续干旱对两树种树干液流的影响,探讨植物树干液流对蒸腾变量(VT)的响应,从而判断两树种对降水和干旱的敏感性,解析环境变化条件下典型生境植物水分关系特征,为揭示典型生境植物群落稳定性维持机制奠定基础。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区中国科学院环江喀斯特生态系统研究观测站木连综合研究区(24°43'58.9"—24°44'48.8" N、108°18'56.9"—108°19'58.4" E),属中亚热带季风气候。多年平均气温 16.5~20.5 °C,多年平均降水量 1389.1 mm。该区域是典型的喀斯特峰丛洼地地貌,地形破碎,土被分布极不均匀,基岩广泛出露。坡地基岩裸露面积 ≥30%,土壤为黑色或棕色石灰土,土层较薄,土层厚度为 10~50 cm;洼地基岩裸露面积约 15%,土壤厚度为 20~160 cm。

本研究选择分布于坡地大小不一的十几块孤立出露基岩中的一块。该岩石出露地表的部分接近立方体形状,平均高度为 8 m,顶部面积约 100 m<sup>2</sup>,分布有深浅不一、形状各异的凹陷、岩石裂缝和裂隙。该岩石上乔木层植物有菜豆树、粉苹婆(*Sterculia euosma*)、圆叶乌桕,灌木层主要为红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、黄荆条(*Vitex negundo*)、欆木(*Loropetalum chinensis*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)

表 1 样木形态特征

Table 1 Morphological characteristics of sample trees

样木树种 Sample tree	序号 Serial number	胸径 DBH (cm)	胸高断面面积 $S_{DBH}$ ( $\text{cm}^2$ )	边材厚度 Sapwood width (cm)	边材面积 Sapwood area ( $\text{cm}^2$ )
菜豆树	1	14.14	156.96	0.90	37.42
<i>Radermachera</i>	2	12.13	115.57	0.85	30.12
<i>sinica</i>	3	9.70	73.82	0.83	23.11
圆叶乌桕	1	10.51	86.70	0.90	27.16
<i>Triadica rotundifolia</i>	2	9.14	65.58	0.85	22.13

等,草本层主要为石山棕(*Guihaia argyrata*)、石油菜(*Pilea cavaleriei*)等.分别选择树高相近、长势良好的半落叶乔木菜豆树 3 棵、落叶乔木圆叶乌桕 2 棵作为测定树干液流的样树(表 1).

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 树干液流的测定与计算

应用德国 Ecomatik 公司生产的 SF-L 四针型热扩散式树干边材液流测定装置,因考虑到待测样木的胸径大小,为最大限度减小测定误差,故请工程师将其改装成 SF-G 两针型测定装置对样树进行长期连续监测.在选定的试验样树胸高处北向安装探针,此装置包括上下 2 根探针,两探针之间的距离约 10 cm,上探针加热丝供应恒定 100 mA 的直流电,下探针作为参考不加热.用数据采集器 CR1000 采集数据,采集器的取值间隔为 10 min.以 Granier<sup>[26]</sup>提出的液流密度经验公式为依据进行公式修正而计算初始液流密度:

$$U = 0.714 \times \left( \frac{\Delta T C_{\max} - \Delta T C}{\Delta T C} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中: $U$  为初始液流密度( $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ); $\Delta T C$  为 2 探针之间的温差; $\Delta T C_{\max}$  为每晚的最大  $\Delta T C$  值.

胸径用胸径尺测量;边材用生长锥钻取木条后,根据边材和心材颜色差异用直尺测量.本研究暂不考虑树龄差异,用探针测定得到的初始液流密度代表整个边材厚度上的液流密度值.因此,整树液流通量( $T_r, \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )可由下式计算:

$$T_r = F_d \times A \quad (2)$$

式中: $A$  为边材面积( $\text{m}^2$ ); $F_d$  为瞬时液流密度( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

单位断面积液流密度( $F_d', \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )可由下式计算:

$$F_d' = T_r / S_{DBH} \quad (3)$$

式中: $S_{DBH}$  为胸高断面面积.

瞬时液流密度( $F_d$ )的大小不是与树木形态相关联的固有特征指标<sup>[27]</sup>,而  $F_d'$  可用于树木个体或树种间的耗水比较<sup>[28]</sup>.以下文中所指液流密度均为  $F_d'$ .

### 1.2.2 环境因子的测定

在距样地约 200 m 处设有 MAWS301 型自动气象观测站,对主要气象要素进行长期连续地同步监测,测定指标包括太阳辐射( $R_s$ )、大气温度( $T, ^\circ\text{C}$ )、空气相对湿度( $RH, \%$ )、水汽压亏缺( $VPD$ )由以下公式计算:

$$VPD = e_s(T) - \frac{e_s \times RH}{100} \quad (4)$$

$$e_s(T) = 0.611 \times \exp\left(\frac{17.502T}{T+240.97}\right) \quad (5)$$

式中: $RH$  为空气相对湿度(%); $T$  为温度( $^\circ\text{C}$ ); $e_s(T)$  为饱和水汽压(kPa).

## 1.3 数据分析

本文根据前期研究<sup>[29]</sup>中 2015—2016 年该区域降水及温度变化情况,以及两树种树干液流密度日均值的季节变化定义两树种的生长季(4—10 月).为研究整个生长季内降雨前后菜豆树和圆叶乌桕树干液流对降水的响应,在 2015 年 4—6、7—8 和 9—10 月各选择 1~2 次降水事件为中心时间点,通过对比降水前后(分别 3 d)所选样木树干液流的变化特征,分析菜豆树和圆叶乌桕的水分利用变化状况.为研究生长季不同时期干旱条件下(遮雨控水)菜豆树和圆叶乌桕树干液流对水分环境变化的响应,在 2016 年 7 月 10 日开始对孤立出露基岩生境进行模拟干旱试验,将覆膜后的时间段模拟为干旱期,选择 6 个典型晴天(2016 年 7 月 16、18 日,8 月 29、30 日,9 月 17、18 日)进行遮雨条件下两树种的树干液流变化特征分析.

此外,本研究选取能表征  $R_s$  和  $VPD$  协同变化的蒸腾变量( $VT$ )(本文中  $VT$  仅指表征指数).分析较短时间尺度下 2 树种对主要环境因子的响应,使用下列公式<sup>[30-31]</sup>计算:

$$VT = VPD \times R_s^{1/2} \quad (6)$$

已有研究表明,可以使用下列指数饱和函数来分析  $F_d'$  和  $VT$  的关系<sup>[13,24,32]</sup>

$$Y = a [1 - \exp(-bx)] \quad (7)$$

式中: $x$  即  $VT$ ;  $Y$  即  $F_d'$ ;  $a$  代表曲线偏移横坐标的程度,值越大,表明所选样木树干液流受环境因素的影响越大;代表拟合曲线的斜率,  $b$  值越大,表明树木导水能力越强.

本研究使用 Excel 2016 软件对树干液流数据进行整理和计算,使用 Origin 8.0 进行方程拟合,使用 SPSS 17.0 对菜豆树和圆叶乌桕生长季内不同生长时期树干液流对降水及干旱的响应差异性进行分析,使用一般线性模型(GLM)对降水前后、遮雨条

件下进行  $F_d'$  和 VT 拟合曲线参数的显著性检验<sup>[33]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 菜豆树和圆叶乌桕树干液流对自然降水的响应特征

2015年观测时期(4—10月)研究区的总降水量为1079.7 mm, 降水分布不均匀(图1), 其中约64%的降水集中在5—7月, 春初和夏末则不足. 2015年4—10月所选3个研究时段的  $R_s$  和日均VPD变化特征中,  $R_s$  最高值( $7250.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 和日均VPD最高值(1.77 kPa)均出现在7—8月(图2). 4—6月和9—10月的辐射量均明显低于7—8月,  $R_s$  和日均VPD整体上有相似的变化趋势.

由图3可知, 3个降水事件后2树种  $F_d'$  均不同程度地高于降水前, 除7—8月差异不显著外, 4—6、9—10月降水后2树种  $F_d'$  均显著高于降水前. 由图4可知, 降水前后, 4—6和7—8月圆叶乌桕的  $F_d'$  显

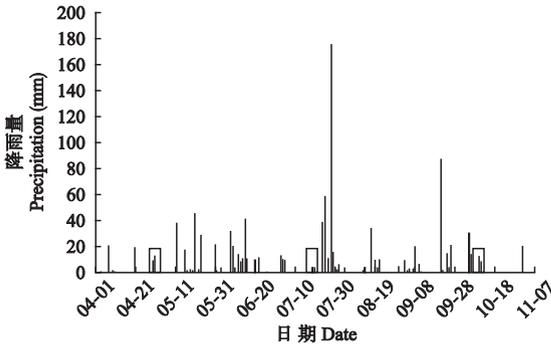


图1 2015年4—10月降水量

Fig.1 Changes of precipitation from April to October, 2015.

横坐标上3个矩形方框表示以生长季内的3次降水事件为中心的时段, 3次降水事件分别为4月29—5月1日(14.1 mm)、7月18—19日(5.6 mm)和10月9—10日(21.1 mm). The marked time of three rectangular boxes on X-axis were the study periods with the center of three precipitation events on April 27 to May 1 (14.1 mm), July 18 to 19 (5.6 mm) and October 9 to 10 (21.1 mm).

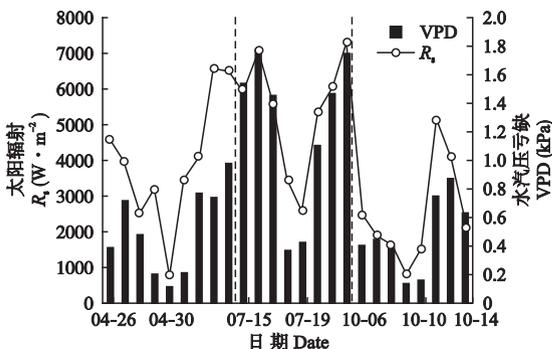


图2 降水前后太阳辐射( $R_s$ )和日均水汽压差(VPD)

Fig.2 Solar radiation ( $R_s$ ) and daytime mean vapor pressure deficit (VPD) measured on pre- and post-precipitation periods.

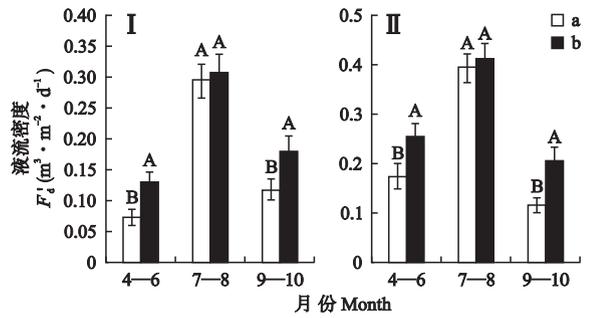


图3 降水前后2树种单位胸高断面液流密度( $F_d'$ )

Fig.3 Sap flow density ( $F_d'$ ) of two tree species measured on pre- and post-precipitation (mean±SE).

a) 降雨前 Pre-precipitation; b) 降雨后 Post-precipitation. I: 菜豆树 *Radermachera sinica*; II: 圆叶乌桕 *Triadica rotundifolia*. 下同 The same below. 不同大写字母表示同一时间段降水前后差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capital letters indicated significant difference between the pre- and post-precipitation at 0.05 level.

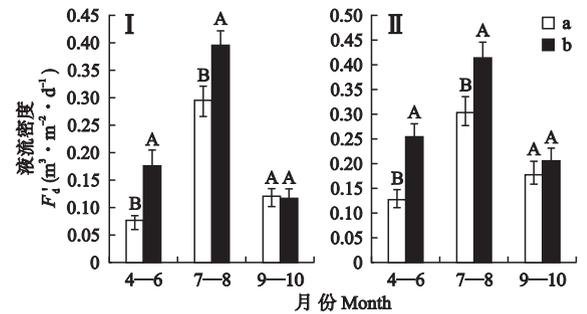


图4 降水前后2树种单位胸高断面液流密度( $F_d'$ )差异

Fig.4 Difference of sap flow density ( $F_d'$ ) of two tree species measured on pre- and post-precipitation (mean±SE).

不同大写字母表示同一时间段降水前或后树种间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capital letters indicated significant difference among trees in pre- or post-precipitation at 0.05 level.

著高于菜豆树, 9—10月2树种  $F_d'$  没有显著差异, 可知2树种液流密度之间的差异显著性并没有因为降水而改变.

### 2.2 菜豆树和圆叶乌桕树干液流对连续干旱的响应特征

2016年观测时期(6—9月)所选时段分别为覆盖遮雨膜后每月2 d 典型的晴朗天气, (图5).  $R_s$  和日均VPD变化特征整体没有明显异常.

为探讨短时期的连续干旱条件下, 2树种的树干液流变化特征, 选择了6 d 典型晴天, 分别是2016年遮雨后1周(前期, 7月16、18日)、1个月(中期, 8月29、30日)和2个月(后期, 9月17、18日)进行分析. 在遮雨后不同时期, 2树种  $F_d'$  均没有显著变化, 圆叶乌桕  $F_d'$  均值都显著高于菜豆树(表2).

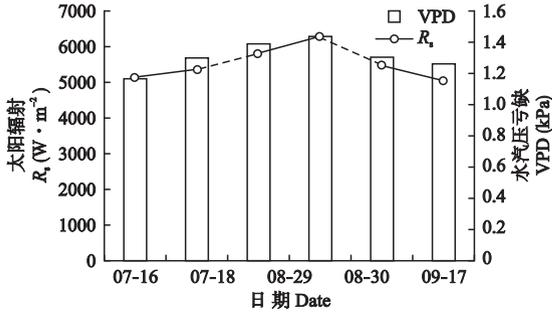
### 2.3 菜豆树和圆叶乌桕树干液流在降水前后对主要环境因素的响应特征

整体上, 生长季内2树种  $F_d'$  和VT之间的关系

表2 遮雨条件下典型晴天2树种单位胸高断面面积液流密度( $F_d'$ )Table 2 Sap flow density ( $F_d'$ ) of two tree species measured under rainfall exclusion conditions ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )

树种 Species	07-16, 07-18	08-29—08-30	09-17—09-18
菜豆树 <i>Radermachera sinica</i>	0.2598±0.0262Ba	0.2950±0.0340Ba	0.2731±0.0337Ba
圆叶乌桕 <i>Triadica rotundifolia</i>	0.8674±0.0777Aa	0.8263±0.0855Aa	0.8147±0.0856Aa

不同大写字母表示同一时间段2树种差异显著,不同小写字母表示不同时间段同一树种差异显著( $P < 0.05$ ) Different capital letters indicated significant difference between tree species in the same time, and different small letters indicated significant difference among times for the same tree at 0.05 level.

图5 遮雨期间不同时段太阳辐射( $R_s$ )和日均水汽压差(VPD)Fig.5 Solar radiation ( $R_s$ ) and daytime mean vapor pressure deficit (VPD) during the rainfall exclusion period.

符合指数饱和和拟合曲线方程。由图6可知,2树种 $F_d'$ 在生长季内随着VT的增加而逐渐增大,2树种 $F_d'$ 变化趋于稳定时的VT约为 $30 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{1/2}$ 。

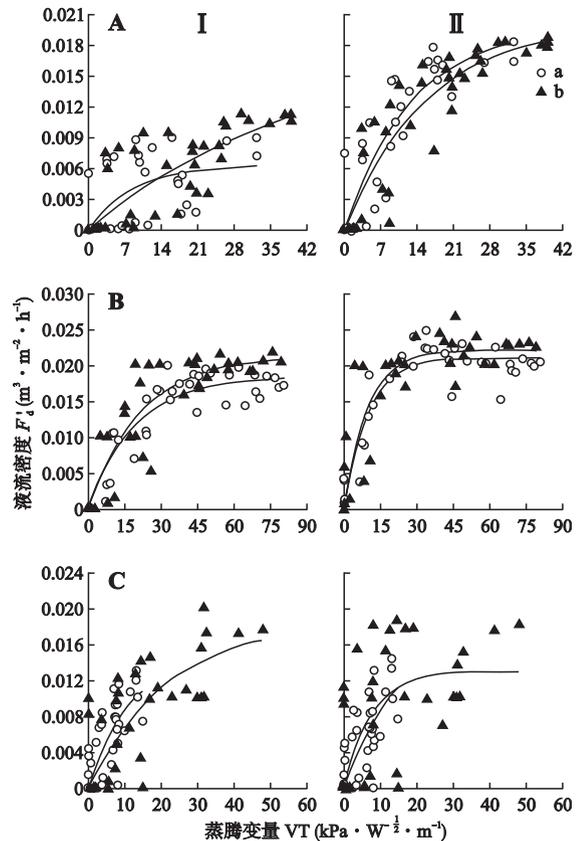
表3 2树种降水前后液流密度( $F_d'$ )和蒸腾变量(VT)的拟合结果Table 3 Fitted results of sap flow density ( $F_d'$ ) and transpiration variable parameter (VT) measured on pre- and post-precipitation

树种 Species	月份 Month	降水前 Pre-precipitation	降水后 Post-precipitation	显著性 Significance
菜豆树 <i>Radermachera sinica</i>	4—6	$a = 0.006$ $b = 0.121$ $R^2 = 0.363$ $P < 0.001$	$a = 0.018$ $b = 0.023$ $R^2 = 0.605$ $P < 0.001$	$P > 0.05$ $P > 0.05$
	7—8	$a = 0.018$ $b = 0.053$ $R^2 = 0.892$ $P < 0.001$	$a = 0.021$ $b = 0.047$ $R^2 = 0.817$ $P < 0.001$	$P > 0.05$ $P > 0.05$
	9—10	$a = 0.015$ $b = 0.091$ $R^2 = 0.583$ $P < 0.001$	$a = 0.018$ $b = 0.047$ $R^2 = 0.569$ $P < 0.001$	$P > 0.05$ $P < 0.01$
圆叶乌桕 <i>Triadica rotundifolia</i>	4—6	$a = 0.019$ $b = 0.078$ $R^2 = 0.842$ $P < 0.001$	$a = 0.020$ $b = 0.063$ $R^2 = 0.838$ $P < 0.001$	$P > 0.05$ $P < 0.05$
	7—8	$a = 0.021$ $b = 0.101$ $R^2 = 0.878$ $P < 0.001$	$a = 0.022$ $b = 0.105$ $R^2 = 0.771$ $P < 0.001$	$P > 0.05$ $P > 0.05$
	9—10	$a = 0.019$ $b = 0.060$ $R^2 = 0.509$ $P < 0.001$	$a = 0.013$ $b = 0.134$ $R^2 = 0.316$ $P < 0.001$	$P > 0.05$ $P < 0.05$

2树种拟合曲线降水后较降水前向上发生偏移的程度均不显著(表3),表明2树种受降水前后环境因素变化的影响小。

#### 2.4 菜豆树和圆叶乌桕树干液流在连续干旱条件下对主要环境因素的响应特征

分别对VT和两树种 $F_d'$ 进行指数饱和和曲线拟合(图7),发现随着VT的增大 $F_d'$ 逐渐增大,VT增加到约 $25 \text{ kPa} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{1/2}$ 时,菜豆树 $F_d'$ 变化趋于稳定;VT增加到 $20 \text{ kPa} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{1/2}$ 左右时,圆叶乌桕 $F_d'$ 变化趋于稳定,说明2树种均启动了气孔调

图6 不同时期降水前后菜豆树和圆叶乌桕单位胸高断面面积液流密度( $F_d'$ )和蒸腾变量(VT)的关系Fig.6 Relationships between sap flow density ( $F_d'$ ) and transpiration (VT) of *Radermachera sinica* and *Triadica rotundifolia* measured on pre- and post-precipitation.

A: 4—6月 April-June; B: 7—8月 July-August; C: 9—10月 September-October.

表4 遮雨条件下液流密度 ( $F_d'$ ) 和蒸腾变量 (VT) 的拟合结果

Table 4 Fitted results of sap flow density ( $F_d'$ ) and transpiration (VT) under rainfall exclusion conditions

树种 Species	日期 Date		
	2016-07-16, 18	2016-08-29, 30	2016-09-17, 18
菜豆树 <i>Radermachera sinica</i>	$a=0.016$ $b=0.075$ $R^2=0.892$ $P<0.001$	$a=0.018$ $b=0.054$ $R^2=0.833$ $P<0.001$	$a=0.018$ $b=0.061$ $R^2=0.862$ $P<0.001$
圆叶乌柏 <i>Triadica rotundifolia</i>	$a=0.043$ $b=0.174$ $R^2=0.634$ $P<0.001$	$a=0.046$ $b=0.072$ $R^2=0.605$ $P<0.001$	$a=0.044$ $b=0.149$ $R^2=0.572$ $P<0.001$

表5 遮雨条件下液流密度 ( $F_d'$ ) 与蒸腾变量 (VT) 的拟合参数检验

Table 5 Fitted coefficients test of sap flow density ( $F_d'$ ) in relation to transpiration (VT) under rainfall exclusion conditions

树种 Species	日期 Date	2016-08-29, 30	2016-09-17, 18
菜豆树 <i>Radermachera sinica</i>	2016-07-16, 18	$P_1>0.05$	$P_1>0.05$
	2016-08-29, 30	$P_2>0.05$	$P_2>0.05$
圆叶乌柏 <i>Triadica rotundifolia</i>	2016-07-16, 18	$P_1<0.05$	$P_1>0.05$
	2016-08-29, 30	$P_2>0.05$	$P_2>0.05$

$P_1$ : 参数  $a$  的比较 Comparison of parameter  $a$ ;  $P_2$ : 参数  $b$  的比较 Comparison of parameter  $b$ .

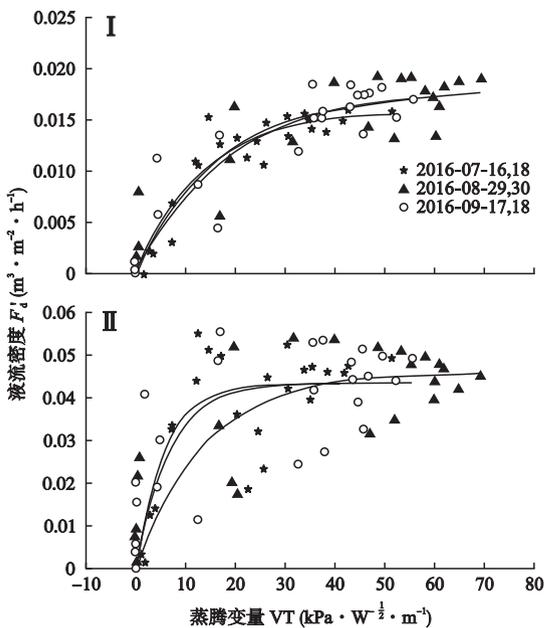


图7 遮雨条件下菜豆树和圆叶乌柏单位胸高断面液流密度 ( $F_d'$ ) 与蒸腾变量 (VT) 的关系

Fig.7 Relationships between sap flow density ( $F_d'$ ) and transpiration (VT) of *Radermachera sinica* and *Triadica rotundifolia* under rainfall exclusion conditions.

节机能。另外, 2 树种曲线在连续干旱条件下曲线偏移程度基本不显著 (表 4 和 5), 说明气象因素变化对 2 树种  $F_d'$  影响较小, 拟合曲线斜率 (即水力导度  $b$ ) 整体亦无显著差异, 说明 2 树种导水能力受短时期的连续干旱影响较小。

### 3 讨论

本研究中指数饱和曲线拟合结果显示: 降水前后及连续干旱条件下, 拟合参数 ( $a$  或  $b$ ) 变化基本不显著。已有研究对土生生境降水前后拟合参数 (同本文) 的变化表明, 降雨前后拟合参数 ( $a$  或  $b$ ) 变化明显, 降水后土壤水分条件的改善能够促进液流速率更快地到达饱和值<sup>[13, 25]</sup>。而本研究中, 气象因素差异对水分环境变化条件下 2 树种液流密度的影响小, 这可能是由于出露基岩特殊的水分蓄持环境, 导致类似于文中 2 树种的乔木类植物更易受水分变化的影响。

降水后 2 树种液流密度均不同程度高于降水前, 在 4—6 和 9—10 月, 降水前后菜豆树液流密度差值约  $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 圆叶乌柏差值约  $0.08 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 吴旭等<sup>[25]</sup>研究的黄土丘陵地区刺槐在降水前后液流密度差值约  $0.25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。说明虽然同为水热不平衡及季节性干旱频发的区域, 刺槐的液流密度受降水的影响远大于出露基岩生境的菜豆树和圆叶乌柏, 这可能与出露基岩生境保水持水能力差等特性有关。在 7—8 月, 2 树种降水后的液流密度增加不显著, 这可能是由于该时段所选降水事件较小 (5.6 mm), 此时又正值 2 树种生长较为旺盛时段, 其蒸腾耗水对水分需求相对较大, 从而导致该生长时段降水前后液流差异性不显著。有研究表明, 生长在土生生境的植物在 7—8 月时其液流密度反而在降水后降低<sup>[25]</sup>, 这也说明生长时段、降水量、植物的生理特性等差异均可能导致降水后液流密度的差异。

本研究中, 连续两个月遮雨条件下, 2 树种液流密度均没有显著降低趋势, 说明 2 树种均不依赖受近期降水主导的水源, 而是利用深层相对稳定的储存水。Alarcón 等<sup>[20]</sup>对柠檬树进行 20 d 左右的覆膜遮雨, 发现遮雨 1 周后柠檬树液流密度维持着均匀变化。Brinkmann 等<sup>[34]</sup>研究的温带植物在夏季土壤干燥缺水的情况下, 挪威云杉 (*Picea abies*)、欧洲山毛榉 (*Fagus sylvatica*)、欧亚槭 (*Acer pseudoplatanus*) 3 种植物的液流密度均会随着土壤缺水而显著降低, 其中, 挪威云杉对干旱的敏感性尤为严重, 而欧

洲山毛榉的液流密度并没有随着土壤缺水而显著变化,这与植物根系分布差异等生理生态特性以及不同根深分布的植物所利用的水分动态库有关。高琛等<sup>[35]</sup>、罗超等<sup>[36]</sup>的研究也有相似的结果,他们的研究发现,杨树可以利用深层的土壤水和地下水,当出现水分亏缺时,其树干液流虽然在初期有一定下降,但后期趋于稳定,后期地下水补充对杨树耗水发挥了很大作用。另外,本研究发现,在短暂的遮雨干旱时间段,圆叶乌桕的液流密度将近菜豆树的 2.5 倍,这可能是由于水分利用策略的差异,圆叶乌桕更偏向于消耗集中型的耗水特征,菜豆树的水分利用策略则较保守,从而导致圆叶乌桕的水分利用效率较菜豆树低。

#### 4 结 论

2 树种液流密度不因降水前后或连续干旱不同时段主要气象因素的差异而发生显著变化。生长季不同时期,自然降水后 2 树种液流密度均不同程度高于降水前。降水前后 2 树种之间的液流密度差异显著性没有改变,圆叶乌桕液流密度始终高于菜豆树。2 树种液流密度不因短期的连续干旱而明显降低,说明在短期干旱胁迫时 2 树种会利用相对稳定的深层水源保持一定的耗水速率。

#### 参考文献

- [1] Yuan D-X (袁道先). Global view on Karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China. *Pratacultural Science* (草业科学), 2008, **25** (9): 19–25 (in Chinese)
- [2] Liu C-Q (刘丛强), Lang Y-C (郎赞超), Li S-L (李思亮), et al. Researches on biogeochemical processes and nutrient cycling in karstic ecological systems, southwest China: A review. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 2009, **16**(6): 1–12 (in Chinese)
- [3] Wang K-L (王克林), Chen H-S (陈洪松), Yue Y-M (岳跃民). Experiment and demonstration on degraded mechanism and its adaptive restoration of karst ecosystems in northwest Guangxi. *Science & Technology for Development* (科技促进发展), 2015, **11**(2): 179–183 (in Chinese)
- [4] Wang S-J (王世杰), Li Y-B (李阳兵). Problems and development trends about researches on karst rocky desertification. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2007, **22**(6): 573–582 (in Chinese)
- [5] Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林). Soil water research in karst mountain areas of southwest China. *Research of Agricultural Modernization* (农业现代化研究), 2008, **29**(6): 734–738 (in Chinese)
- [6] Guo K (郭柯), Liu C-C (刘长成), Dong M (董鸣). Ecological adaptation of plants and control of rocky-

- desertification on karst region of Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(10): 991–999 (in Chinese)
- [7] Nie Y-P (聂云鹏). Study on Water Source Utilization by Species and Their Adaptation in Typical Habitats of the Karst Peak-Cluster. PhD Thesis. Changsha: Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, 2011 (in Chinese)
- [8] Wang K-L (王克林), Yue Y-M (岳跃民), Ma Z-L (马祖陆), et al. Research and demonstration on technologies for rocky desertification treatment and ecosystem services enhancement in karst peak-cluster depression regions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, **36**(22): 7098–7102 (in Chinese)
- [9] Nie Y-P (聂云鹏), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), et al. Challenges and probable solutions for using stable isotope techniques to identify plant water sources in karst regions: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(7): 2361–2368 (in Chinese)
- [10] Chen H-S (陈洪松), Nie Y-P (聂云鹏), Wang K-L (王克林). Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions: A review. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(2): 317–326 (in Chinese)
- [11] Lu P (陆平), Urban L, Zhao P (赵平). Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and practice. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2011, **46**(6): 631–646 (in Chinese)
- [12] Wu X (吴旭). Water Consumption Characteristics and Physiological Response of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* in the Loess Hilly Region. Master Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2016 (in Chinese)
- [13] Chen B-Q (陈宝强), Zhang J-J (张建军), Zhang Y-T (张艳婷), et al. Whole-tree sap flow of *Quercus liaotungensis* and *Populus davidiana* in response to environmental factors in the Loess Plateau area of western Shanxi Province, Northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(3): 746–754 (in Chinese)
- [14] Ma JX, Chen YN, Li WH, et al. Sap flow characteristics of four typical species in desert shelter forest and their responses to environmental factors. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **67**: 151–160
- [15] Ortuño M, 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*, 2010, **97**: 1–11
- [16] Reynolds JF, Kemp PR, Ogle K, et al. Modifying the 'pulse-reserve' paradigm for deserts of North America: Precipitation pulses, soil water, and plant responses. *Oecologia*, 2004, **141**: 194–210
- [17] Engel V, Jobbágy EG, Stieglitz M, et al. Hydrological consequences of Eucalyptus afforestation in the Argen-

- tine Pampas. *Water Resources Research*, 2005, **41**: 3053–3057
- [18] Burgess SSO. Measuring transpiration responses to summer precipitation in a Mediterranean climate: A simple screening tool for identifying plant water-use strategies. *Physiologia Plantarum*, 2006, **127**: 404–412
- [19] Zeppel M, Macinnis-Ng CMO, Ford CR, *et al.* The response of sap flow to pulses of rain in a temperate Australian woodland. *Plant and Soil*, 2008, **305**: 121–130
- [20] Alarcón JJ, Ortuño MF, Nicolás E, *et al.* Improving water-use efficiency of young lemon trees by shading with aluminised-plastic nets. *Agricultural Water Management*, 2006, **82**: 387–398
- [21] Ježík M, Blaženc M, Letts MG, *et al.* Assessing seasonal drought stress response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) by monitoring stem circumference and sap flow. *Ecohydrology*, 2015, **8**: 378–386
- [22] Chaves M. Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of Experimental Botany*, 1991, **42**: 1–16
- [23] Campbell GS, Norman JM. An introduction to environmental biophysics. *Biologia Plantarum*, 1998, **21**: 104
- [24] Du S, Wang YL, Kume T, *et al.* Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2011, **151**: 1–10
- [25] Wu X (吴旭), Chen Y-M (陈云明), Tang Y-K (唐亚坤). Sap flow characteristics and its responses to precipitation in *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2015, **39**(12): 1176–1187 (in Chinese)
- [26] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems. *Annales Des Sciences Forestieres*, 1985, **42**: 193–200
- [27] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, **3**: 309
- [28] Cai X-A (蔡锡安), Zhao P (赵平), Zeng X-P (曾小平), *et al.* Dynamics of xylem sap flow of two Magnoliaceae tree species in relation to environmental factors. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **31**(9): 2163–2169 (in Chinese)
- [29] Zhang H-L (张慧玲), Ding Y-L (丁亚丽), Cheng H-S (陈洪松), *et al.* Dynamics of sap flow of two typical trees in exposed bedrock habitat of Karst region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(8): 2431–2437 (in Chinese)
- [30] Shin'ichi I, Nakatani S, Tanaka T. Evaluation of transpiration from a natural deciduous broad-leaved forest located at a headwater catchment based on measurement of sap flux density. *Journal of the Japan Society of Hydrology & Water Resources*, 2006, **19**: 7–16
- [31] 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*, 2008, **74**: 263–272
- [32] Kumagai TO, Tateishi M, Shimizu T, *et al.* Transpiration and canopy conductance at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 1444–1455
- [33] Chow GC. Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions: An expository note. *Econometrica*, 1970, **38**: 361–366
- [34] Brinkmann N, Eugster W, Zweifel R, *et al.* Temperate tree species show identical response in tree water deficit but different sensitivities in sap flow to summer soil drying. *Tree Physiology*, 2016, **36**: 1508–1519
- [35] Gao C (高琛), Yang X-B (杨新兵), Lu S-W (鲁绍伟), *et al.* Strategies on water utilization of poplar plantation ecosystem in Beijing Sandy Area. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2014, **42**(1): 80–85 (in Chinese)
- [36] Luo C (罗超), Zha T-G (查同刚), Zhu M-X (朱梦润), *et al.* Influences of shallow groundwater on sap flow of riparian poplar plantations in northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(5): 1401–1407 (in Chinese)

---

作者简介 张慧玲,女,1991年生,硕士研究生.主要从事生态水文学和稳定同位素生态学研究. E-mail: huiling2017@163.com

责任编辑 张凤丽

---