

# 酸枣荆条耗水特征及其茎木质部解剖构造

刘春鹏<sup>1,2</sup>, 马长明<sup>3</sup>, 王连春<sup>4</sup>, 李向军<sup>1,2</sup>, 李新利<sup>1,2</sup>

(1. 河北省林业科学研究院, 河北 石家庄 050061; 2. 河北省林木良种工程技术研究中心, 河北 石家庄 050061; 3. 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000; 4. 西南林业大学, 云南 昆明 650224)

**摘要:** [目的] 研究酸枣和荆条耗水特征与其茎木质部解剖构造之间的关系, 为中国北方干旱区造林树种的选择提供技术支持。[方法] 采用热扩散式液流探针(TDP)法对酸枣和荆条的树干液流进行监测, 并于监测完成后, 采用切片法, 观察其茎木质部解剖构造。[结果] (1) 不同季节 2 树种的耗水特征存在差异, 与湿润季节相比, 干旱季节两树种树干液流变化均具有较强的波动性, 其日均液流速度和日均耗水量均较小; 2 树种相比, 干旱季节时酸枣的最大液流速度、日均液流速度以及日均耗水量均显著大于荆条, 而湿润季节与之相反。(2) 就其茎木质部解剖构造而言, 酸枣的导管形状大小比较均一, 而荆条的导管形状大小参差不齐; 酸枣的导管直径、长度、面积平均值及边材相对输导面积均小于荆条, 而其导管密度大于荆条。(3) 酸枣的相对输导率和脆性指数均小于荆条, 说明酸枣的水分输导的有效性小于荆条, 而其安全性和抗旱性大于荆条; 另外, 在湿润季节, 二者的耗水特征主要取决于其水分输导的有效性, 而在干旱季节, 主要取决于其安全性和抗旱性, 进而阐明了二者在不同季节表现出不同耗水差异的原因。[结论] 与荆条相比, 酸枣的茎解剖构造更有利于其在干旱季节维持较高的树干液流, 进而得以正常的生长, 因此更适用于干旱区造林。

**关键词:** 树干液流; 热扩散式探针法(TDP); 木质部解剖结构; 相对输导率; 脆性指数

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)05-0092-06

**中图分类号:** S718.43

**文献参数:** 刘春鹏, 马长明, 王连春, 等. 酸枣荆条耗水特征及其茎木质部解剖构造[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 92-97. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.016; Liu Chunpeng, Ma Changming, Wang Lianchun, et al. Water-consumption characteristics and stem xylem anatomical structure of *Zizyphus jujuba* and *Vitex negundo* var. *Heterophylla*[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 92-97. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.016

## Water-Consumption Characteristics and Stem Xylem Anatomical Structure of *Zizyphus Jujuba* and *Vitex Negundo* var. *Heterophylla*

LIU Chunpeng<sup>1,2</sup>, MA Changming<sup>3</sup>, WANG Lianchun<sup>4</sup>, LI Xiangjun<sup>1,2</sup>, LI Xinli<sup>1,2</sup>

(1. Forest Academy of Sciences of Hebei, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. Hebei Engineering Research Center for Trees Varieties, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 3. Agricultural University of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000, China; 4. Southeast Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

**Abstract:** [Objective] To study the relationships between water-consumption characteristics and stem xylem anatomical structures of *Zizyphus jujuba* and *Vitex negundo* var. *heterophylla*, in order to provide technical support for the selection of afforestation species in arid regions of North China. [Methods] The water consumption characteristics of *Z. jujubavar* and *V. negundo*. var. *heterophylla* were studied with the thermal dissipation probe (TDP), and then the xylem anatomical structures of their stem were observed with slicing method. [Results] (1) The water consumption characteristics were different for the two trees in different seasons. In dry season, there were more fluctuating changes both for the two trees as compared with the

收稿日期: 2017-03-27

修回日期: 2017-03-31

资助项目: 2015 年河北省引进国外智力项目“干旱沙地无灌溉节水造林技术示范与推广”(院 1516523); 2016 年河北省省级财政林业科技推广示范资金推广项目“干旱沙地提高造林成效关键技术示范与推广”(201603192)

第一作者: 刘春鹏(1984—), 男(汉族), 河北省廊坊市人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事植物生理研究工作。E-mail: lcp-1984@163.com。

通讯作者: 马长明(1980—), 男(汉族), 河北省邯郸市人, 博士研究生, 副教授, 主要从事森林培育研究工作。E-mail: machangming@126.com。

ones in wet season, and the averages of daily sap flow velocity and daily water consumption were lower. In dry season, the max of sap flow velocity and the average of daily sap flow velocity, and daily water consumption of *Z. jujuba* were all higher than the ones of *V. negundo* var. *heterophylla*. In wet season, these were vice versa. (2) As for xylem anatomical structure of stem, compared with the ones of *V. negundo* var. *heterophylla*, the shape and size of *Z. jujuba* vessel were more uniform. And the average of vessel diameter, vessel length, vessel area and the sapwood relative cross-sectional area of *Z. jujuba* were all lower than the ones of *V. negundo* var. *heterophylla*. Only the vessel density of *Z. jujuba* var. *spinosa* was higher than that of *V. negundo* var. *heterophylla*. (3) The relative conductivity and the vulnerability indexes of *Z. jujuba* were lower than the ones of *V. negundo* var. *heterophylla*. It showed that the water conduction efficacy of *Z. jujuba* was lower than that of *V. negundo* var. *heterophylla*, and the safety and drought resistance of *Z. jujuba* were all higher than those of *V. negundo* var. *heterophylla*. In wet season, their water-consumption characteristics were mainly determined by the efficacy of water conduction. In dry season, however, their water-consumption characteristics were mainly determined by the safety and drought resistance. These might be the reason that the difference of their water-consumption in different seasons. [Conclusion] Compared with *V. negundo* var. *heterophylla*, stem xylem anatomical structure of *Z. jujubavar* was more capable to transport sap as high as possible, which can made it grow normally. So *Z. jujuba* was more suitable for the afforestation in arid regions.

**Keywords: stem sap flow; thermal dissipation probe method (TDP); xylem anatomical structure; relative conductivity; vulnerability index**

随着生态文明建设首次写入中国十三五规划纲要,国家及社会各界对改善生态环境的关注与投入日益增大,而作为其内容之一的植被修复也越来越受到各界人士的重视与支持。然而,在中国北方,由于水资源的日益匮乏,干旱缺水成为中国北方造林的限制因子,直接影响中国北方植被修复的进程。在这种背景下,灌木树种由于大多具有树体小、耗水量少、根系发达、在干旱地区较易成活的特点,因此,在干旱区造林难度大的地区,采用灌木树种进行造林不失为一种明智的选择<sup>[1]</sup>。

酸枣(*Ziziphus jujuba*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)是中国北方干旱地区常见的灌木树种,均具有适应性强、耐寒、耐瘠薄、根系发达的特性,而且能够起到防风固沙、保持水土的作用,是中国北方困难立地造林的先锋灌木树种。

研究林木的蒸腾耗水特征,有助于了解其调节自身水分损耗及适应干旱环境的能力,而其耗水特性主要受到生物学结构因素、土壤供水因素和气象因素的影响<sup>[2]</sup>,其中生物学结构因素是影响其耗水特性的内在因素。而在其生物学结构因素中,茎木质部解剖构造又直接决定了其体内水分长途运输的效率,很大程度上决定着其蒸腾耗水特征<sup>[3]</sup>。本研究拟以酸枣和荆条这 2 种灌木为研究对象,采用热扩散探针法(thermal dissipation probe method, TDP)对其树干液流进行连续监测,以期揭示其耗水规律,并于监测

后将其茎木质部制作切片,观察其解剖构造特征,最终探讨其耗水特征与茎木质部解剖构造之间的关系,进而弥补中国北方干旱区灌木造林理论上的不足,并为中国北方干旱区造林树种的选择提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验于河北省平山县岗南镇寺家沟村(113°31′—114°15′E, 38°9′—38°47′N)进行。该地区位于河北省西部太行山中段东麓,属于丘陵山地类型。气候为暖温带半干旱半湿润季风型大陆性气候,年平均气温 12.7 ℃,全年太阳辐射量为 131~136 kcal/cm<sup>2</sup>,全年有效辐射为 65.4 kcal/cm<sup>2</sup>,多年平均日照时数 2 600~2 750 h,年平均降水量 609 mm,多集中于 7, 8, 9 这 3 个月,其余时间则多干旱少雨。年平均蒸发量 1 815.4 mm,年平均干燥度为 1.38。年平均风速 2.2 m/s,土壤为石灰性褐土。主要植被有山杏(*Prunus sibirica*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柿树(*Diospyros kaki*)、君迁子(*Diospyros lotus*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、酸枣、荆条、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、黄背草(*Themeda triandra*)、蒺藜(*Tribulus terrestris*)、等。

### 1.2 试验材料

选择树干通直、生长良好、地径大小相差不大、彼此临近(保证生长环境的一致性)的荆条和酸枣各 3

株作为研究对象。经实地勘察,于阳坡坡中位置确定样树,相距最远的 2 株样树距离为 20 m。所选样树地径分别为:酸枣:2.65,2.60,2.62 cm;荆条:2.96,2.87,2.76 cm。

### 1.3 试验方法

1.3.1 树干液流的测定 采用国内北京雨根科技有限公司设计生产的 RR-8210 茎流仪(TDP)对所选样树的树干液流进行同步监测,监测时间为 2008 年 5—10 月。首先对已选荆条用罗盘标定出正南方向,然后于树干的 0.3 m 处,上下垂直,在 2 点间(约 10~15 cm)削去一小片树皮,大小便于探针插入即可(注意不伤到木质部,也不要留有韧皮部,留有韧皮部或伤到木质部都会影响到数据的准确度)。然后用直径为 2.5 mm 的钻头依靠打孔板进行打孔,分别插入 10 mm 长的探针,为避免自然环境的影响,每组探针外用大小合适的泡沫盒子罩上,然后与数据采集器和电源连接,并设置每 2 s 测读 1 次,每 10 min 进行平均并储存数据。

1.3.2 边材面积的测定 边材面积是计算液流及蒸腾的关键参数。本研究边材面积的测定于试验结束(2008 年 10 月底)后进行,分别于所选树木探针安装处,用锯子直接锯断获取树干横切面,观察量取去皮直径以及边材厚度,进而计算边材面积。经计算,酸枣和荆条的边材面积分别为:4.7,4.6,4.6,5.6,5.0,4.8 cm<sup>2</sup>。

1.3.3 树干边材解剖构造观察。

(1) 取样。于 2008 年 10 月底,各树种已经进入休眠期,对所选的酸枣、荆条直接用锯锯断,取 1~2 cm 的木段,然后将所取材料经过简单修整,放入注满酒精的小瓶中保存,带回实验室进行测定。

(2) 切片的制备与观察。将准备好的样品放到甘油—酒精(1:1)溶液中浸泡,直到能软化至适于切片的程度。利用徕卡滑动式木材切片机将材料切成 10 μm 的薄片,用 1% 的蕃红溶液染色 2 h,再用不同体积分数的乙醇逐级脱水(30%→50%→70%→85%→95%→100%,各级浸泡时间为 20~50 s),然后用无水乙醇与二甲苯 1:1 混合液对材料进行透明,再换用纯二甲苯进行透明 2 h。将透明好的材料放于载玻片上铺平,滴上适量中性树胶,盖紧盖玻片后,用重物压好,尽量将气泡赶尽。在 Nikon eclipse 80 i 显微镜下用 SMI ple PCI 软件照相。

### 1.4 数据处理

对于 2 树种树干液流的监测,虽然进行了整个生长季的监测(5—10 月),但若将其全部绘出,图形会非常密集,很难直观的对其进行具体分析与比较,因

此,为了更加直观、具体的分析和比较 2 树种的树干液流变化规律,分别于干旱季节(5 月)和湿润季节(7 月)选择连续 3 个典型晴天进行分析,干旱季节选择 5 月的 4—6 日,湿润季节选择 7 月的 20—22 日。另外,采用分析测图软件 Imagepro-Plus 对所取得的茎木质部解剖构造切片照片进行分析,获得导管直径、长度、面积、密度以及边材相对输导面积等数据。

另外,相对输导率(relative conductivity, RC)和脆性指数(vulnerability index, VI)是导管大小和导管频率(数目)的综合反映,被认为是评价植物水分输导的有效性和安全性(抗旱性)的重要指标<sup>[4-5]</sup>,即植物相对输导率越大,其水分输导的有效性越大;植物的脆性指数越大,其抗旱性越小<sup>[6]</sup>。因此,植物的相对输导率和脆性指数是反映植物耗水特性与其解剖构造之间关系的纽带。根据导管直径和导管频率分别计算相对输导率(relative conductivity, RC)和脆性指数(vulnerability index, VI),计算公式分别为<sup>[5]</sup>:

$$RC=r^4 \text{FRE}^{[4]}; VI=VAT/\text{FRE}.$$

式中:  $r$ ——导管半径; FRE——导管频率; VAT——导管直径。

将所取得的相关数据利用 Excel 和 SPSS 13.0 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同季节 2 树种的耗水特征

如图 1 及表 1 所示,无论在干旱季节还是湿润季节,2 树种的树干液流变化均呈现“几”字型,表现出明显的昼高夜低相互交替的变化规律,夜间液流虽然较小但依然存在。然而,不同季节两树种的树干液流变化又存在差异,与湿润季节相比,干旱季节 2 树种树干液流变化均具有较强的波动性,其日均液流速度和日均耗水量均较小。2 树种相比,干旱季节时,酸枣的最大液流速度、日均液流速度以及日均耗水量均极显著大于荆条,二者最大液流速度平均值分别为:酸枣:0.004 03 cm/s,荆条:0.002 66 cm/s;日均液流速度平均值为:酸枣:0.001 22 cm/s,荆条:0.000 83 cm/s;日均耗水量平均值为:酸枣:0.493 84 L,荆条:0.358 86 L。而湿润季节时,酸枣的日均液流速度及日均耗水量均极显著小于荆条,最大液流速度二者差异不显著,二者最大液流速度平均值分别为:酸枣:0.003 67 cm/s,荆条:0.003 72 cm/s;日均液流速度平均值为:酸枣:0.001 32 cm/s,荆条:0.001 41 cm/s;日均耗水量平均值为:酸枣:0.537 58 L,荆条:0.610 32 L。

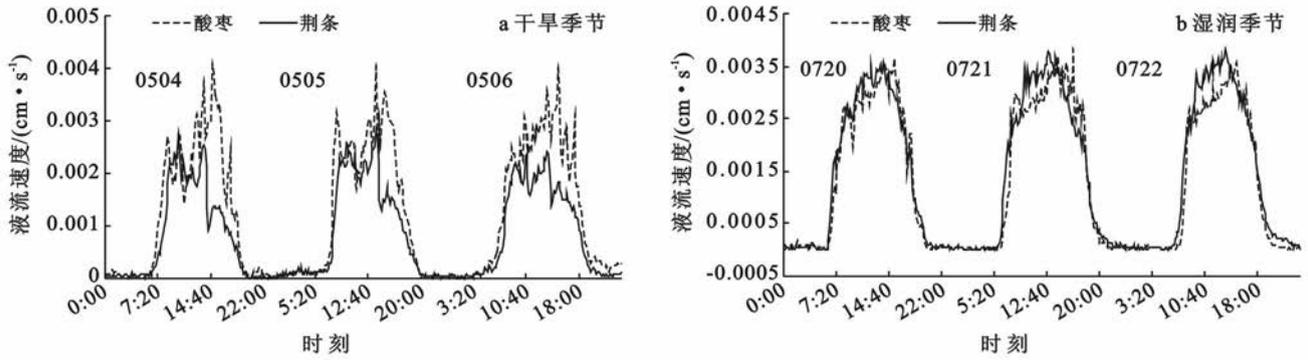


图 1 不同季节 2 个树种树干液流日变化

表 1 2 个树种树干液流的日变化动态

季节	日期	最大液流速度/(m·s <sup>-1</sup> )		日均液流速度/(m·s <sup>-1</sup> )		日均耗水量/L	
		酸枣	荆条	酸枣	荆条	酸枣	荆条
干旱 季节	0504	0.004 08**	0.002 73**	0.001 15**	0.000 76**	0.465 34**	0.327 57**
	0505	0.004 03**	0.002 82**	0.001 19**	0.000 87**	0.482 52**	0.377 25**
	0506	0.003 99**	0.002 42**	0.001 31**	0.000 86**	0.533 67**	0.371 75**
	平均值	0.004 03**	0.002 66**	0.001 22**	0.000 83**	0.493 84**	0.358 86**
湿润 季节	0720	0.003 65	0.003 58	0.001 31**	0.001 36**	0.533 02**	0.588 77**
	0721	0.003 81	0.003 79	0.001 41**	0.001 46**	0.572 35**	0.632 38**
	0722	0.003 55	0.003 80	0.001 25**	0.001 41**	0.507 38**	0.609 81**
	平均值	0.003 67	0.003 72	0.001 32**	0.001 41**	0.537 58**	0.610 32**

注: \*\* 差异极显著。下同。

### 2.2 茎木质部解剖构造特征

根据切片观察显示,酸枣、荆条均呈现出明显的早材和晚材现象,荆条的早材晚材导管大小差别明显,表现为早材导管直径及导管密度远大于晚材,而酸枣仅表现为早材导管密度远大于晚材,而导管直径早晚材相差不大。如表 2 所示,酸枣导管直径为 9.50~41.21 μm,荆条为 10.10~98.04 μm;酸枣导管长度为 13.59~270.79 μm,荆条为 12.41~512.93 μm;酸枣导管面积为 70.86~1 333.92 μm<sup>2</sup>,荆条为 80.10~7 549.15 μm<sup>2</sup>。由此可知,酸枣的导管直径、长度、面积变化的范围小于荆条,说明酸枣的导管形状大小比较均一,而荆条的导管形状大小比较参差不齐。由表 3 可知,酸枣导管直径平均为 25.24±0.39 μm;荆条为 33.88±0.56 μm;酸枣导管长度平均为 59.10±

0.82 μm;荆条为 79.42±0.97 μm;酸枣导管面积平均为 537.27±0.12 μm<sup>2</sup>,荆条为 1 163.65±0.25 μm<sup>2</sup>;酸枣的边材相对输导面积为 5.47±1.22%,荆条为 8.13±1.75%,均表现为酸枣<荆条。而酸枣的导管密度平均为 101.79±0.85 个/mm<sup>2</sup>,荆条为 69.84±0.81 个/mm<sup>2</sup>,表现为酸枣>荆条。经过方差分析,二者的导管平均直径、平均长度、平均面积、导管密度、边材相对输导面积均差异极显著。

表 2 2 个树种树干边材解剖构造特征

树种	导管直径/μm		导管长度/μm		导管面积/μm <sup>2</sup>	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
酸枣	41.21	9.50	270.79	13.59	1 333.92	70.86
荆条	98.04	10.10	512.93	12.41	7 549.15	80.10

表 3 2 个对种树干边材解剖构造特征统计分析

树种	平均直径/μm	平均长度/μm	平均面积/μm <sup>2</sup>	导管密度/(个·mm <sup>-2</sup> )	边材相对输导面积/%
酸枣	25.24±0.39**	59.10±0.82**	537.27±0.12**	101.79±0.85**	5.47±1.20**
荆条	33.88±0.56**	79.42±0.97**	1 163.65±0.25**	69.84±0.81**	8.13±1.75**

### 2.3 树干液流与树干边材解剖构造的关系

如表 4 所示,2 树种相对输导率大小分别为:酸枣 2.58×10<sup>6</sup> μm<sup>2</sup>,荆条 5.75×10<sup>6</sup> μm<sup>2</sup>,表现出酸枣

小于荆条,说明酸枣的水分输导的有效性小于荆条,而在湿润季节时酸枣液流速度恰恰小于荆条,说明在湿润季节,植物的耗水特征主要取决于其水分输导的

有效性。另外,二者的脆性指数大小分别为:酸枣 0.25,荆条 0.49,表现出酸枣小于荆条,说明酸枣的安全性和抗旱性大于荆条,而在干旱季节时酸枣的液流速度恰恰大于荆条,说明在干旱季节,植物耗水特征主要取决于其安全性和抗旱性。

表 4 2 个树种树干液流与树干边材解剖构造的关系

树种	相对 输导率/ $10^6 \mu\text{m}^2$	脆性 指数	干旱季节日均 液流速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	湿润季节日均 液流速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
酸枣	2.58	0.25	0.001 22	0.001 33
荆条	5.75	0.49	0.000 83	0.001 40

### 3 讨论

(1) 气象因素、土壤供水水平以及树木自身生物学特性是影响树干液流变化的 3 大类因子<sup>[2]</sup>。在干旱季节典型的晴天,酸枣和荆条 2 个树种树干液流变化均表现出较强的波动性,这与于红博等<sup>[7]</sup>及夏桂敏等<sup>[8]</sup>对沙棘和荆条研究发现一致,其认为造成这种“波动”现象主要的原因是干旱,笔者基本认同此观点。在干旱季节,由于土壤供水水平低下,使得植物无法得到持续的水分供应,进而造成其树干液流的波动。另外,2 个树种相比,在干旱季节酸枣的蒸腾耗水强于荆条,而湿润季节恰恰相反,笔者认为这与二者的生物学特性间有关。2 个树种的树干液流为同步监测,且距离较近,其所处生长环境基本一致,进而影响其树干液流变化的气象因素及土壤供水水平因素基本一致,因此,造成二者在不同季节具有不同耗水特征的原因只能是其自身的生物学特性。

(2) 生物学特性因素是影响其耗水特性的内在因素。而在其生物学特性因素中,茎木质部解剖构造又直接决定了其体内水分长途运输的效率,很大程度上决定着其蒸腾耗水特征<sup>[3]</sup>。导管是维管植物木质部的主要组成成分,也是维管植物最主要的输水结构,在很大程度上决定着植物体内的水分运输,是决定植物耗水特性的重要解剖学特征<sup>[9]</sup>。一般认为导管直径越大,导管长度越大,导管密度越多,植物输水性能越强<sup>[10-11]</sup>。然而,当植物遇到干旱胁迫时,其木质部会产生空穴化和栓塞,进而限制植物自身体内水分的散失<sup>[12-13]</sup>。众多研究表明,植物的空穴与栓塞的与导管直径、导管长度以及导管密度有着密切的关系,而其中的导管直径起到主要决定性作用<sup>[13]</sup>,表现出导管越宽,越容易发生空穴和栓塞<sup>[3,6,9,11-12]</sup>。综上所述,导管直径越大,植物输水性能越强,然而却越容易发生空穴和栓塞,表面上是一种矛盾关系,实则不

然。笔者认为,植物的输水性与空穴和栓塞的形成是受环境所影响的。当植物不受水分胁迫时,植物木质部不会产生空穴和栓塞,此时植物的耗水特征能主要取决于其输水性能的强弱;而当植物受到水分胁迫时,植物木质部产生空穴和栓塞,此时植物的耗水特征主要取决于其形成空穴和栓塞的程度。二者之间根据所处环境的不同存在着一个权衡<sup>[9,12]</sup>。

(3) 相对输导率(relative conductivity, RC)和脆性指数(vulnerability index, VI)是反映植物耗水特性与其解剖构造之间关系的纽带,是评价植物水分输导的有效性和安全性(抗旱性)的重要指标<sup>[4-5]</sup>。根据对酸枣和荆条相对输导率和脆性指数的分析,结合二者在干旱和湿润季节所表现出的不同的耗水特征,说明在湿润季节,植物的耗水特征主要取决于其水分输导的有效性;而在干旱季节,其耗水特征主要取决于其安全性(抗旱性)。这与王林等<sup>[9]</sup>及艾绍水等<sup>[11]</sup>的观点一致。笔者认为,植物的耗水特性与土壤水分有关,当土壤水分充足时,植物木质部不会因为受到干旱胁迫而产生空穴和栓塞,植物的液流速度、耗水量等主要受到植物木质部水分相对输导率的影响,相对输导率大,其植物液流速度、耗水量就大。而当土壤水分亏缺,植物受到干旱胁迫时,植物木质部很容易产生空穴和栓塞,此时植物的液流速度、耗水量等主要受到植物木质部脆性指数的影响,植物木质部脆性指数小,其抗旱性能大,其在干旱胁迫条件下更体现其抗旱优势,保证自身水分供应,维持较高的液流速度和耗水量。

### 4 结论

(1) 不同季节 2 个树种的耗水特征存在差异,与湿润季节相比,干旱季节 2 个树种树干液流变化均具有较强的波动性,其日均液流速度和日均耗水量均较小;两者相比,干旱季节时酸枣的最大液流速度、日均液流速度以及日均耗水量均显著大于荆条,而湿润季节与之相反。

(2) 就其茎木质部解剖构造而言,酸枣的导管形状大小比较均一,而荆条的导管形状大小参差不齐;酸枣的导管直径、长度、面积平均值及边材相对输导面积均小于荆条,而其导管密度大于荆条。

(3) 酸枣的相对输导率和脆性指数均小于荆条,说明酸枣的水分输导的有效性小于荆条,而其安全性和抗旱性大于荆条;另外,在湿润季节,二者的耗水特征主要取决于其水分输导的有效性,而在干旱季节,主要取决于其安全性和抗旱性,进而阐明了二者在不同季节表现出不同耗水差异的原因。

综上所述,与荆条相比,酸枣的茎解剖构造更有利于其在干旱季节维持较高的树干液流,进而得以维持正常的生长,因此更适合于干旱区造林。

### [参 考 文 献]

- [1] 王连春. 酸枣荆条液流特征及其耗水尺度扩展研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [2] 陈宝强,张建军,张艳婷,等. 晋西黄土区辽东栎和山杨树干液流对环境因子的响应[J]. 应用生态学报,2016,27(3):746-754.
- [3] 孙琳旒,汤斌,高瑞馨. 植物茎解剖结构对于干旱缺水环境的响应及适应性[J]. 林业勘察设计,2016(2):43-46.
- [4] Carlquist S, Comparative Wood Anatomy[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988:41-81.
- [5] Gamage H K, Ashton M S, Singhakumara B M P. Leaf structure of *Syzygium* spp. (Myrtaceae) in relation to site affinity within a tropical rain forest[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2003,141(3):365-377.
- [6] 史刚荣,刘蕾. 淮北相山三种群落中优势树种次生木质部的解剖学特征[J]. 云南植物研究,2006,28(4):363-370.
- [7] 于红博,杨劼,臧春鑫,等. 皇甫川流域中国沙棘树干液流日变化及其相关因子[J]. 生态学杂志,2008,27(7):1071-1076.
- [8] 夏桂敏,康绍忠,李王成,等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化[J]. 生态学报,2006,26(4):1186-1193.
- [9] 王林,王延书,高勇富,等. 刺槐根、茎木质部水力结构特征[J]. 山西农业科学,2015,43(6):689-692.
- [10] 王秀伟,毛子军. 输导组织结构对液流速度和树干 CO<sub>2</sub> 释放通量的影响[J]. 北京林业大学学报,2013,35(4):9-15.
- [11] 艾绍水,李秧秧,陈佳村,等. 陕北沙地 3 种典型灌木根木质部解剖结构及水力特性[J]. 应用生态学报,2015,26(11):3277-3284.
- [12] 李荣,党维,蔡靖,等. 6 个耐旱树种木质部结构与栓塞脆弱性的关系[J]. 植物生态学报,2016,40(3):255-263.
- [13] 张海昕,李姗,张硕新,等. 4 个杨树无性系木质部导管结构与栓塞脆弱性的关系[J]. 林业科学,2013,49(5):54-61.
- [14] 任玉民,陈家驹. 暗沟排水对洗盐效果的初步观察[J]. 土壤通报,1960(5):21-31.
- [15] 杨延春,潘德峰,邹志国. 江苏滨海盐渍土区水稻秸秆暗沟排水降渍试验[J]. 江苏农业科学,2015,43(3):373-375.
- [16] Richardson A D, Berlyn G P. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mt. Mansfield, Vermont, USA[J]. American Journal of Botany, 2002,89(1):88-94.
- [17] Gamon J A, Surfus J S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer[J]. New Phytologist, 1999,143(1):105-117.
- [18] Peñuelas J, Filella I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status[J]. Trends in Plant Science, 1998,3(3):151-156.
- [19] Demmig-Adams B, Walliam W A. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis [J]. Trends in Plant Science, 1996,1(1):21-26.
- [20] Gitelson A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation [J]. Journal of Plant Physiology, 1994,143(3):286-292.
- [21] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. Plant Cell & Environment, 2002,25(2):239-250.
- [22] Falster D S, Westoby M. Plant height and evolutionary games[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2003,18(7):337-343.
- [23] Grotkopp E, Rejmánek M, Rost T L. Toward a causal explanation of plant invasiveness: Seedling growth and life-history strategies of 29 pine (*Pinus*) species[J]. The American Naturalist, 2002,159(4):396-419.
- [24] 于贵瑞. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [25] 曹生奎,冯起,司建华,等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报,2009,29(7):3882-3892.
- [26] Richardson A D, Berlyn G P, Gregoire T G. Spectral reflectance of *Picea rubens* (Pinaceae) and *Abies balsamea* (Pinaceae) needles along an elevational gradient, Mt. Moosilauke, New Hampshire, USA[J]. American Journal of Botany, 2001,88(4):667-676.

(上接第 91 页)