

# 柽柳属 6 种植物侧枝木质部导水率与纹孔数量特征关系

木巴热克·阿尤普<sup>1,2</sup>,荆卫民<sup>1,3</sup>,伊丽米努尔<sup>4</sup>,王希勇<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011;2. 中国科学院 荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;  
3. 中国科学院 新疆吐鲁番沙漠植物园,新疆 吐鲁番 838008;4. 新疆林业科学院 造林治沙研究所,新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 柽柳属(*Tamarix* L.)植物是耐旱耐盐胁迫的良好固沙造林树种,借助木质部导水率及栓塞测量系统和扫描电子显微镜,分别对 6 种柽柳属植物侧枝的导水能力与纹孔特征进行测量观察。结果表明,6 种柽柳属植物侧枝木质部导水效率和纹孔数量特征具有显著的种间差异性( $P < 0.01$ ),其导水率的高低排序为刚毛柽柳(*T. hispida*)>沙生柽柳(*T. taklamakanensis*)>多枝柽柳(*T. ramosissima*)>细穗柽柳(*T. leptostachys*)>中国柽柳(*T. chinensis*)>短穗柽柳(*T. laxa*);刚毛柽柳具有最大的纹孔膜面积和外纹孔口面积,而短穗柽柳的相应指标较小。6 种柽柳属植物侧枝木质部纹孔膜结构没有明显的差异性,纹孔膜上未见微孔;各柽柳植物侧枝导水率与外纹孔口面积具有较好的正相关关系。

**关键词:** 导水效率;纹孔数量特征;纹孔口面积;相关性

中图分类号:S793.5 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2017)02-0106-06

## Relations between Xylem Hydraulic Efficiency and Inter-vessel Pit Features of Six *Tamarix* L. Species

Mubarek Ayup<sup>1,2</sup>, JING Wei-min<sup>1,3</sup>, Yiliminuer<sup>4</sup>, WANG Xi-yong<sup>1,3</sup>

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography,

Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. Turpan Eremophytes Botanical Garden,

Chinese Academy of Sciences, Turpan, Xinjiang 838008, China; 4. Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi, Xinjiang 830017, China)

**Abstract:** *Tamarix* L. species are highly resistant to extremely atmospheric drought and salinized soil conditions. They are good species for the afforestation in sandy area. The lateral branches with diameters of 2.5–4.5 mm were collected from 6 *Tamarix* species, namely, *T. taklamakanensis*, *T. ramosissima*, *T. leptostachys*, *T. hispida*, *T. chinensis*, and *T. laxa*. Xylem hydraulic specific conductivity ( $K_{s(\max)}$ ) was measured by using a XYLEM® xylem embolism meter. All xylem intervessel pit features were observed by SEM technique. The results showed that there were significant inter-specific differences in lateral branch xylem hydraulic efficiency and inter-vessel pit quantitative features among 6 *Tamarix* species ( $P < 0.01$ ). The order of xylem hydraulic efficiency of 6 species was *T. hispida*>*T. taklamakanensis*>*T. ramosissima*>*T. leptostachys*>*T. chinensis*>*T. laxa*. *T. hispida* had the largest pit membrane area and outer pit aperture area, *T. laxa* had the lowest value of Apm and outer Apa. SEM images indicated that there were no obvious qualitative differences in the inter-vessel pit membrane structures of lateral branches among different *Tamarix* species. In all species, the intact pit membrane was observed as a uniform deposition of microfibrils across the surface, with no visible pores. Correlation analysis revealed that there was positive significant correlations between lateral branch xylem  $K_{s(\max)}$  value and outer pit aperture area.

收稿日期:2016-06-17 修回日期:2016-09-01

基金项目:国家自然科学基金 NSFC-新疆联合基金项目(U1303102)。

作者简介:木巴热克·阿尤普,女,在读博士,研究方向:干旱区植物木质部结构与功能。E-mail:mubarek@ms.xjb.ac.cn

**Key words:** hydraulic conductivity; pit quantitative feature; pit aperture area; correlations

柽柳属 (*Tamarix* L.) 植物是干旱和半干旱区大面积沙荒地和盐渍化土地上广泛分布的一类优势灌木或小乔木植物, 具有较好的抗旱及抗盐性能。90 种柽柳属植物在世界范围内广泛分布, 中国有 18 种 1 变种<sup>[1]</sup>, 主要分布于西北干旱区的荒漠和半荒漠区, 对维持干旱区荒漠生态系统的稳定性及保护绿洲生态环境发挥着重要的生态功能<sup>[2]</sup>。

众所周知, 在植物对不同环境的适应过程中, 其体内的水分平衡、水力调节、光合作用、蒸腾作用等多种生理过程均都与木质部有关, 因此对植物木质部的研究已经成为植物生理生态学领域的热点之一。植物木质部水力特性, 即木质部导水率和栓塞, 是影响植物生产能力的重要因素<sup>[3-4]</sup>。有关研究表明, 植物木质部导管(管饱)的数量特征与木质部的导水能力密切相关<sup>[5-7]</sup>。除了导管特征以外, 导管间壁纹孔膜也对植物木质部的导水效率有显著的影响<sup>[8-10]</sup>。纹孔膜是由初生壁形成, 且由亲水性纤维素聚合物构成<sup>[11]</sup>, 不同植物纹孔膜上的最大微孔大小之间具有显著性差异<sup>[12]</sup>。

柽柳属植物普遍具有较好的抗旱性能, 但抗旱性强弱程度不同。研究者从水分生理和形态指标<sup>[13]</sup>、叶片解剖特征<sup>[14]</sup>、营养枝解剖结构<sup>[15]</sup>等方面对柽柳属植物的抗旱性强弱程度进行排序, 共同把沙生柽柳归属为极度耐旱种类, 而多枝、刚毛、细穗、中国柽柳和短穗柽柳等多分布于河谷、冲积平原上或盐渍化较重的盐土生境中, 抗旱性均较弱, 属于中、轻度抗旱种类<sup>[13-15]</sup>。研究发现沙生柽柳在营养枝和抱茎叶形态结构上具有角质层增厚、气孔器深陷、孔下室大、髓部面积少<sup>[15]</sup>, 抱茎叶程度高(90%)、栅栏组织发达及具有储水功能的大型薄壁细胞等解剖特征<sup>[14]</sup>, 而这些旱生解剖特征使它在极端干旱环境中抑制蒸腾, 防止水分过度散发<sup>[16]</sup>, 但目前, 柽柳属植物的侧枝木质部导水效率与纹孔数量特征上种间差异性如何, 抗旱性强弱程度与木质部导水率及纹孔特征之间如何关联, 国内外尚缺乏相关研究报道。因此, 本研究以抗旱性强弱程度不同的 6 种柽柳属植物(沙生柽柳 *T. taklamakanensis*、多枝柽柳 *T. ramosissima*、细穗柽柳 *T. leptostachys*、刚毛柽柳 *T. hispida*、中国柽柳 *T. chinensis*、短穗柽柳 *T. laxa*)的侧枝(外径在 2.5~4.5 mm)为研究对象, 对其木质部导水效率和导管间壁纹孔数量特征的种间差异性进行比较观察, 旨在讨论这些差异对生态环境的适应意义, 为柽柳属植物抗旱性能的综合评价提供理论依据。

## 1 材料与方法

于 2014 年 8 月中旬在新疆吐鲁番沙漠植物园柽柳植物专类园里选择 6 种柽柳种类: *T. chinensis*、*T. ramosissima*、*T. hispida*、*T. leptostachys*、*T. taklamakanensis* 和 *T. laxa* 等, 每一种柽柳选择 3 株长势良好, 株高约一致的柽柳植株并标记。测定日清晨, 对每株柽柳的阳方向选取 3~5 条(2~3 年生), 直径为 2.5~4.5 mm 之间的枝条(表 1), 在水中从枝条切端再剪去 3 cm 部分, 然后包在黑塑料袋, 带回试验站立即进行测定。采集的侧枝样品总数为 12~23 条, 导水率测量时间为 4 d(2014 年 8 月 16—20 日)。

### 1.1 木质部导水率的测定

用木质部导水率及栓塞测量系统(XYLEM<sup>®</sup> xylem embolism meter, Bronkhorst, Montigny-les-cormeilles, France)对不同柽柳植物侧枝(直径 2.5~4.5 mm, 长度 12~15 cm)木质部最大导水率(或木质部导水效率)( $K_{s(\max)}$ , kg/m/s/MPa)进行测量。XYLEM 测量系统是采用参比“水压法”<sup>[17]</sup>, 先用冲洗液在一定压力下连续灌注样品使之水分饱和, 这种灌注排泄或溶解包含在栓塞木质部导管中的空气, 然后测量其样品的导水率, 这时将得到样品的最大导水率。为避免样品的过度栓塞化, 所有试验样品首先直接从植株上切下来, 然后放在提前准备好的自来水桶内, 从切段再剪去 3~5 cm。枝条样品的另一端被包在黑塑料袋中, 样品的切端泡在水中及时送到试验站进行测量。准备好的样段立即安装在木质部导水率仪器的样品管上开始进行测量。首先, 在 150~200 kPa 压力下, 通过滤孔径为 0.1 μm 过滤器, 以较接近与植物木质部体内原有的汁液离子成分(natural xylem sap)<sup>[18]</sup>的天然矿泉水( $(1.35 \pm 0.56)$  mg/L K<sup>+</sup>,  $(5.7 \pm 0.79)$  mg/L Na<sup>+</sup>,  $(7.24 \pm 0.48)$  mg/L Ca<sup>2+</sup> 和  $(1.15 \pm 0.22)$  mg/L Mg<sup>2+</sup> (mean ± SD), 作为木质部模拟水(冲洗液)冲洗排除栓塞导管的气泡(至少进行 2 次)。冲洗时间长短根据出气泡停止时间长短来确定。然后, 在 3~4 kPa 水压下, 用同样的冲洗液测量其样品木质部导水率( $K_{\max}$ : kg · s<sup>-1</sup> · MPa<sup>-1</sup>)。测完每个样段的最大导水率之后, 用游标卡尺分别测定样品外径和长度。外径取样段上相互垂直的 2 个方向数值的平均值。样段的心材比例很小, 可以把样段横载面积认为功能木质部面  $SA = r^2 \cdot \pi$ 。

样品比导率  $K_s$  (Specific conductivity) 通过以

下公式计算,即  $K_s = K(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}) \times \text{样品长度}(\text{m}) / \text{样品木质部横截面积}(\text{m}^2)$ 。本文柽柳侧枝最大导水效率指的是样品最大比导率( $K_{s(\max)}$ ,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ )。

**表 1 6 种柽柳属植物实际测量的侧枝导水率样品数量、平均长度及外径**

Table 1 Sample numbers for hydraulic conductivity measurement, lengths and outer diameter of lateral branches of 6 different *Tamarix* L. species

柽柳种类	样品数量 /个	样品长度 /cm	样品外径 /mm
刚毛柽柳( <i>T. hispida</i> )	19	12.53±0.19	3.67±0.10
多枝柽柳( <i>T. ramosissima</i> )	16	13.03±0.36	3.99±0.08
短穗柽柳( <i>T. laxa</i> )	16	13.13±0.37	4.10±0.09
中国柽柳( <i>T. chinensis</i> )	12	11.81±0.26	4.06±0.17
沙生柽柳( <i>T. taklamakanensis</i> )	23	12.43±0.40	3.69±0.09
细穗柽柳( <i>T. leptostachys</i> )	13	13.52±0.11	3.56±0.17

注:数据为平均值和标准误。

## 1.2 木质部纹孔数量特征

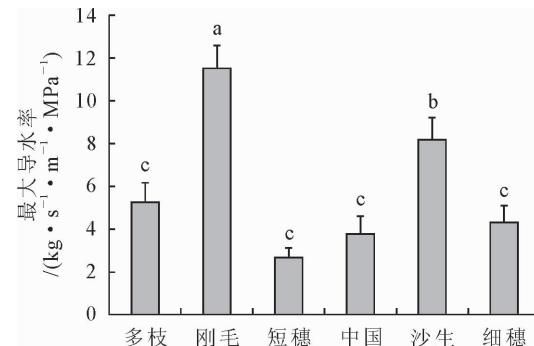
所有样品以参考 S. Jansen<sup>[19]</sup>等的扫描电子显微镜(SEM)样品处理方法来准备。每一种柽柳植物选取 3 个不同侧枝样。SEM 样品预处理方法如下:首先把样品切成 5~10 mm 长度的样段;用不同浓度梯度(50%, 70%, 90%, 100%)的乙醇脱水 2 h;在室内温度下自然风干 12 h,用刀片从中间纵切成 2 段;然后把样品固定在样品架上,用 EMITECH K550 喷涂刻蚀仪(Emitech Ltd., Ashford, UK)喷白金 3 min。在 Zeiss Supar-55VP 扫描电子显微镜(Carl Zeiss SMT, AG Company, Germany)下观察拍照。所有样品在 2 kV 电压(accelerating voltage)下观察纹孔膜结构及纹孔口的形态并拍照。纹孔数量特征指标中,Ap<sub>m</sub>、D<sub>p</sub>、外 Ap<sub>a</sub> 等指标是依据 A. Scholz<sup>[20]</sup>等的计算方法,外 Ap<sub>a w/s</sub> 指标是依据 F. Lens<sup>[3]</sup>等的计算方法。各项纹孔特征指标中、英文名称及英文缩写如下:导管间壁纹孔膜面积(inter-vessel pit membrane area, Ap<sub>m</sub>)(Fig2,c);导管间壁纹孔膜水平直径(Horizontal pit membrane diameter, D<sub>p</sub>)(Fig2,C);外纹孔口面积(surface area of outer pit aperture, outer Ap<sub>a</sub>)(Fig2,b);外纹孔口长轴与短轴的比例(Ratio of the diameter of the outer pit aperture as measured the widest and shortest axis, 外 Ap<sub>a w/s</sub>)(Fig2,b)。所有 SEM 图像通过 Image-J 软件来处理的。每种柽柳植物实际测量的纹孔膜及纹孔口数量是 86~324 个。

## 2 结果与分析

### 2.1 柽柳属植物侧枝木质部导水功能种间差异性

由图 1 可知,测试的 6 种柽柳侧枝平均导水率

大小顺序为刚毛柽柳(11.54±1.06, 均值±SD)>沙生柽柳(8.18±1.02)>多枝柽柳(5.26±0.88)>细穗柽柳(4.30±0.81)>中国柽柳(3.78±0.83)>短穗柽柳(2.68±0.42) $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 。



注:数据为平均值和标准误,不同字母表示种间差异性在 0.05 水平显著。

**图 1 6 种柽柳属植物侧枝( $2.5 < d < 4.5$  mm)木质部平均最大导水效率的种间差异性**

Fig. 1 Inter-species difference in lateral branches( $2.5 < d < 4.5$  mm) xylem hydraulic efficiency of 6 different *Tamarix* species

不同柽柳植物侧枝木质部最大导水率之间有显著性差异( $F=12.42, P<0.01$ )。ANOVA 多重比较(LSD)结果显示,刚毛和沙生柽柳侧枝最大导水效率与其他柽柳种类之间均有显著性差异( $P<0.05$ ),但中国、多枝、短穗和细穗柽柳最大导水效率之间的差异不显著( $P>0.05$ )。

### 2.2 柽柳属植物侧枝木质部纹孔数量特征的种间差异性

方差分析结果表明,多枝、刚毛、沙生、细穗、短穗和中国柽柳等 6 种柽柳属植物侧枝在同一直径范围内( $2.5 \text{ mm} < d < 4.5 \text{ mm}$ ),其木质部纹孔数量特征参数(Ap<sub>m</sub>、外 Ap<sub>a</sub>、D<sub>p</sub>、外 Ap<sub>a w/s</sub>)之间具有显著性差异( $P<0.01$ )。由表 2 可知,刚毛柽柳具有最大的纹孔膜(Ap<sub>m</sub>)和外纹孔口面积(Ap<sub>a</sub>)(分别为  $6.12 \mu\text{m}^2$  和  $0.57 \mu\text{m}^2$ )(表 2, 图 2a, 图 2b)及最高的外纹孔口长轴与短轴比例(外 Ap<sub>a w/s</sub>, 4.01)而短穗柽柳具有较小的 Ap<sub>m</sub>、Ap<sub>a</sub> 和外 Ap<sub>a w/s</sub> 值(分别为  $4.53 \mu\text{m}^2$ 、 $0.35 \mu\text{m}^2$ , 3.23)(表 2, 图 2k, 图 2l)。

通过扫描电镜(SEM)拍照观察,这 6 种柽柳属植物侧枝木质部纹孔膜结构没有显示明显的差异,纹孔膜上没有观察到可见的微孔(图 2a、图 2c、图 2e、图 2j、图 2i、图 2k)。

### 2.3 柽柳属植物木质部导水率与纹孔特征之间的关系

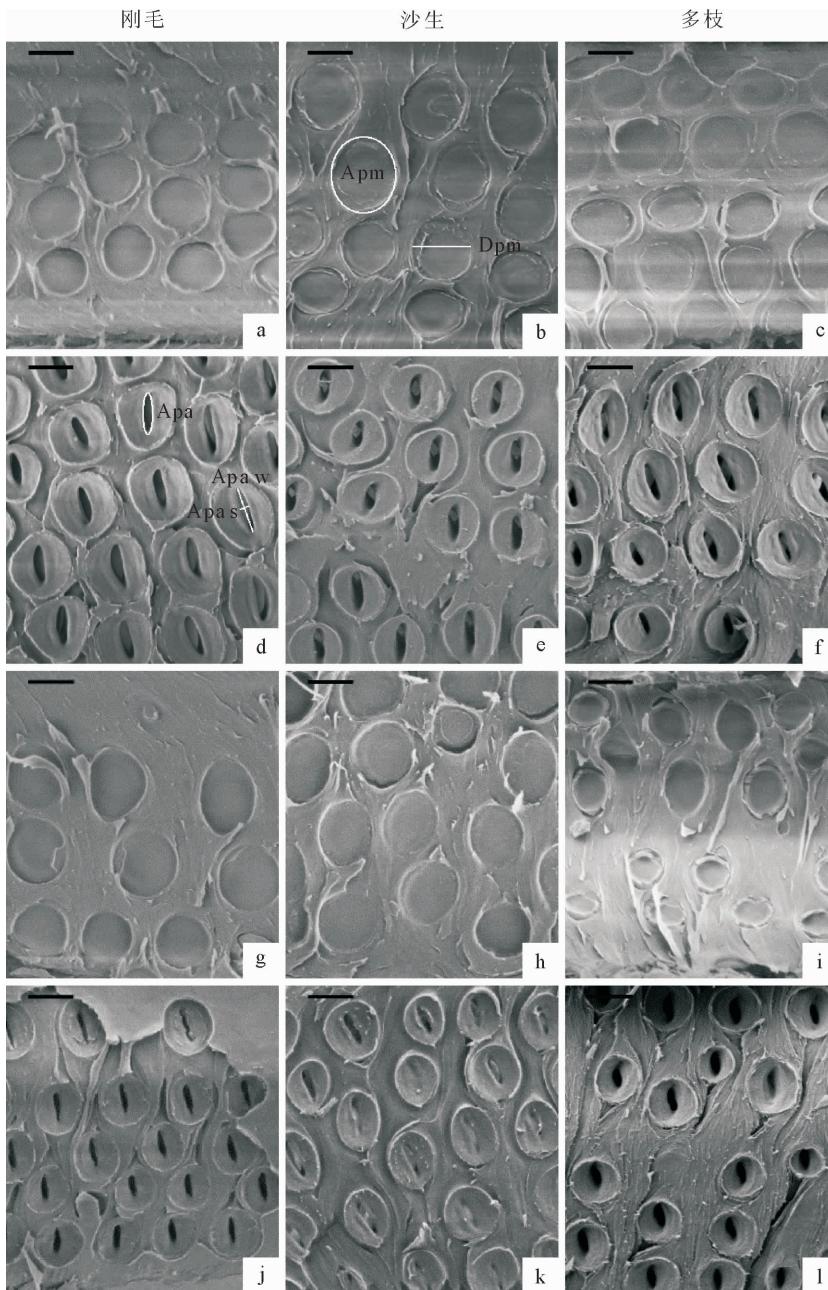
由表 3 可知,柽柳植物木质部  $K_{s(\max)}$  值与外纹孔口面积之间有较好的正相关关系( $r=0.878, P=0.021$ )(表 3, 图 3)。

表2 柽柳属植物侧枝木质部纹孔数量特征

Table 2 Quantitative intervessel pit features of lateral woody shoots of 6 *Tamarix* species

柽柳种类	Apm/ $\mu\text{m}^2$	Dpm/ $\mu\text{m}$	外Apa/ $\mu\text{m}^2$	外Apa w/s
刚毛柽柳 ( <i>T. hispida</i> )	6.12±0.15 <sup>a</sup>	2.80±0.05 <sup>a</sup>	0.57±0.04 <sup>a</sup>	4.01±0.18 <sup>a</sup>
多枝柽柳 ( <i>T. ramosissima</i> )	5.23±0.16 <sup>cd</sup>	2.60±0.04 <sup>bcd</sup>	0.37±0.03 <sup>def</sup>	3.72±0.14 <sup>abcd</sup>
短穗柽柳 ( <i>T. laxa</i> )	4.53±0.23 <sup>e</sup>	2.41±0.06 <sup>e</sup>	0.35±0.03 <sup>f</sup>	3.23±0.12 <sup>cd</sup>
细穗柽柳 ( <i>T. leptostachys</i> )	5.27±0.19 <sup>bcd</sup>	2.59±0.05 <sup>cde</sup>	0.37±0.04 <sup>ef</sup>	3.16±0.24 <sup>d</sup>
中国柽柳 ( <i>T. chinensis</i> )	5.41±0.1 <sup>abcde</sup>	2.65±0.08 <sup>abed</sup>	0.41±0.02 <sup>bcdef</sup>	3.88±0.12 <sup>ab</sup>
沙生柽柳 ( <i>T. taklamakanensis</i> )	4.91±0.32 <sup>de</sup>	2.51±0.08 <sup>de</sup>	0.40±0.02 <sup>cdef</sup>	3.41±0.17 <sup>bcd</sup>

注:不同小写字母表示纹孔特征指标的种间差异性在0.05水平显著,数据为平均值和标准误。Apm:纹孔膜面积;Dpm:纹孔膜水平直径;Outer Apa:外纹孔口面积;Outer Apa w/s:外纹孔口长轴与短轴的比例。



注:a,c,e,j,l显示没有微孔的纹孔膜;b,d,f,h,g,v,l显示不同大小的外纹孔口面积(Apa);所有SEM图像放大倍数为3.00 KX 比例尺:a,b,c,d,e,f,j,h,I,g,k,l=2  $\mu\text{m}$ 。

图2 柽柳属植物侧枝( $2.5 \text{ mm} < d < 4.5 \text{ mm}$ )木质部纹孔SEM图像Fig. 2 SEM micrographs of lateral branches( $2.5 \text{ mm} < d < 4.5 \text{ mm}$ )for different *Tamarix* species

表 3 桤柳属植物木质部  $K_{s(\max)}$  值与木质部纹孔参数之间的 Pearson 相关性分析结果

Table 3 Pearson correlations between xylem  $K_{s(\max)}$  value and xylem intervessel pit anatomical features

纹孔参数	导水率 $K_{s(\max)}$	
	r	P value
$Apm/\mu\text{m}^2$	0.688	0.130
$Dpm/\mu\text{m}$	0.665	0.150
Outer Apa/ $\mu\text{m}^2$	0.878*	0.021
Outer Apa w/s	0.534	0.275

注:“\*”号值表示在  $P=0.05$  水平上显著。

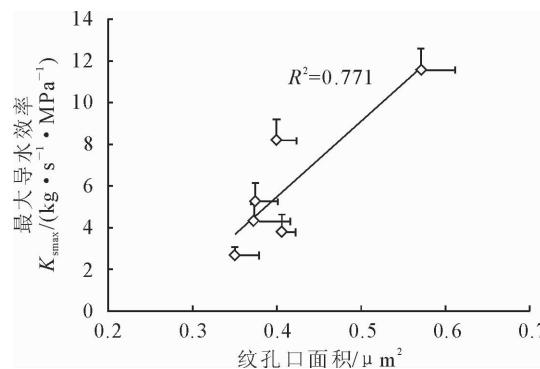


图 3 桤柳属植物木质部  $K_{s(\max)}$  值与外纹孔口面积之间的关系

Fig. 3 Relations between xylem  $K_{s(\max)}$  value and outer pit aperture area

### 3 结论与讨论

植物木质部的导水能力与木质部的导管(管胞)和导管间壁纹孔特征有关<sup>[5-9]</sup>。在本研究中, 桤柳属植物木质部输水效率与外纹孔口面积之间有较好的正相关关系, 虽然木质部输水效率与纹孔膜面积之间的关系没有直接被体现出来, 但外纹孔口面积与纹孔膜面积之间的相关性关系( $r=0.869, P=0.025$ )说明纹孔膜对木质部导水效率的重要性。以上 6 种梆柳属植物中, 刚毛梆柳侧枝具有最大的纹孔膜及外纹孔口面积和最大导水率, 而短穗梆柳的纹孔膜及外纹孔口面积最小, 导水率也最低。

纹孔膜上微孔对植物木质部导水率及抗栓塞能力有显著的影响<sup>[19]</sup>。S. Jansen<sup>[21]</sup>等对 26 种被子植物纹孔膜结构特征方面的研究显示, 纹孔膜上的最大微孔大小(10~225 nm)之间具有显著性差异。在本研究, 通过 SEM 观察发现, 这 6 种梆柳植物侧枝木质部纹孔膜在结构上没有明显差异, 没有观察到微孔。Jansen<sup>[18]</sup>等研究表明, SEM 样品预处理方法对纹孔膜产生非常明显的影响。是否样品处理方法影响到待测植物的纹孔膜结构, 我们分别准备了新鲜样、干样(自然脱水)和脱水时间分别为 30、60、120 min 和 240 min 的酒精脱水样, 但仍然没有观察到清晰的纹孔膜结构。

沙生梆柳是一个沙生抗旱喜温的阳性树种<sup>[22]</sup>, 在中国梆柳属植物中生长在沙漠内部流动沙丘上的一个最抗旱的种类<sup>[13-15]</sup>, 而其他梆柳种类, 即多枝梆柳、细穗梆柳、刚毛梆柳、中国梆柳及短穗梆柳的抗旱性排序上存在一些差异。如翟诗虹<sup>[14]</sup>等从抱茎叶解剖结构角度把刚毛、多枝、细穗、短穗梆柳归为中度耐旱种类, 而中国梆柳归为轻度耐旱种; 蒋进<sup>[13]</sup>等从水分生理角度对梆柳植物进行抗旱性排序, 结果为多枝>细穗>中国>刚毛>短穗梆柳。张道远<sup>[15]</sup>等对梆柳属植物营养枝解剖结构进行比较研究, 并把梆柳属聚类 3 大类, 其中刚毛、细穗和短穗梆柳归为第 3 类种, 即强度耐盐性种类。从本研究结果看, 刚毛梆柳侧枝的导水率最高, 其次为沙生梆柳, 多枝和细穗梆柳的导水率处于中间, 而中国和短穗梆柳的导水率较低; 除了刚毛梆柳以外, 其他 5 种梆柳侧枝导水效率的大小排序与蒋进<sup>[14]</sup>等的抗旱性强弱程度的排序是一致。

刚毛梆柳是典型的泌盐性盐生植物, 大量的盐分随水分运输排除体外, 发达的表皮毛有利于水分的丧失, 增大排盐效率<sup>[23]</sup>。王霞<sup>[24]</sup>等对刚毛梆柳进行土壤水分胁迫处理时发现刚毛梆柳的持水力强, 干旱处理后仍然保持 71.66% 的相对含水率。笔者认为, 刚毛梆柳木质部的高效输水能力有助于促进其体内盐分随水分运输快速排除体外, 保证了其在重盐碱环境中维持正常的生理功能。沙生梆柳是其他 5 种梆柳之中, 导水率最高的种类, 它的小枝和抱茎叶的“旱生”解剖特征和木质部的高效导水能力共同有利于沙生梆柳在极端干旱环境中保持体内水分平衡。

综上所述, 椴柳属(*Tamarix L.*)不同植物侧枝木质部在导水能力及纹孔数量特征上有明显的差异性, 但纹孔膜上均没有观察到可见的微孔。梆柳属植物的抗旱性强弱程度与侧枝木质部的导水率之间有着一定的关联, 即抗旱能力强梆柳种类的侧枝木质部导水能力也高(除刚毛梆柳外), 抗旱性较弱种类的木质部导水率也较低。干旱区植物在长期适应干旱环境的过程中, 在形态和结构等多方面进行内部调节, 从而达到水分运输过程中有效性与安全性的协调统一<sup>[25]</sup>。因此, 为更深入解读梆柳属植物的生态适应机制或进行抗旱性能综合评价, 还需要从木质部的导管特征, 尤其是导管的空间分布特征、纹孔膜厚度及纹孔内含物的性质、木质部密度和抗栓塞能力等多种因素综合考虑分析。

### 参考文献:

- [1] 尹林克. 椴柳属植物的生态适应性与引种[J]. 干旱区研究,

- 2002,19(3):12-16.
- YIN L K. The ex-situ protection and ecological adaptability of *Tamarix* L. in China[J]. Arid Zone Research, 2002,19(3):12-16. (in Chinese)
- [2] 刘铭庭. 新疆柽柳属植物研究及推广应用[J]. 中国沙漠, 1996, 16(4):428-429.
- LIU M T. *Tamarix* L. and its extending in the desert region of Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 1996,16(4):428-429. (in Chinese)
- [3] LENSF, SPERRY J S, CHRISTMAN M A, et al. Testing hypotheses that link wood anatomy to cavitation resistant and hydraulic conductivity in the genus acer[J]. New Phytolosist, 2011,190:709-723.
- [4] 安锋, 张硕新, 赵平娟. 木本植物木质部栓塞脆弱性研究进展[J]. 西北林学院学报, 2002,17(3):30-34.
- AN F, ZHANG S X, ZHAO P J. Progress on study of vulnerability of xylem embolism in woodg plants[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002,17(3):30-34. (in Chinese)
- [5] KAVANAUGH K L, BOND B J, AITKEN S N, et al. Shoot and root vulnerability to xylem cavitation in four populations of douglas-fir seedlings[J]. Tree Physiology, 1999,19:31-37.
- [6] MCELRONE A J, POCKMAN W T, MARTINEZ-VILALTA J, et al. Variation in xylem structure and function in stems and roots of trees to 20 m depth [J]. New Phytologist, 2004,163: 507-517.
- [7] PRATT R B, JACOBSEN A, EWERS F W, et al. Relationships among xylem transport, biomechanics and storage in stems and roots of nine Rhamnaceae species of the California chaparral [J]. New Phytologist, 2007,174:787-798.
- [8] CHOAT B, BRODIE T W, COBB A R, et al. Direct measurements of intervessel pit membrane hydraulic resistance in two angiosperm tree species[J]. American Journal of Botany, 2006, 93:993-1000.
- [9] HACKE U G , SPERRY J S , WHEELER J K , et al . Scaling of angiosperm xylem structure with safety and efficiency[J]. Tree Physiology, 2006,26:619-701.
- [10] ZHANG S X, HANNO R. Seasonal variation of hydraulic conductivity in twigs of woody plants[J]. Journal of Northwest Forestry College, 1996,11(3):1-9.
- [11] 李荣, 姜在民, 张硕新, 等. 木本植物木质部栓塞脆弱性研究新进展[J]. 植物生态学报, 2015(8):838-848.
- LI R, JIANG Z M, ZHANG S X, et al. A review of new research progress on the vulnerability of xylem embolism of woody plants [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015(8): 838-848. (in Chinese)
- [12] JANSEN S, CHOAT B, PLETTERS A. Morphological variation of intervessel pit membranes and implications to xylem function in angiosperms[J]. American Journal of Botany, 2009,196:409-419.
- [13] 蒋进, 高海峰. 柽柳属植物抗旱性排序研究[J]. 干旱区研究, 1992(4):41-45.
- JIANG J, GAO H F. A study on drought resistant ordination of *Tamarix* L. [J]. Arid Zone Research, 1992(4):41-45. (in Chinese)
- [14] 翟诗虹, 王常贵, 高信曾. 柽柳属植物抱茎叶形态结构的比较观察[J]. 植物学报, 1983,25(6):519-525.
- ZHAI S H, WANG C G, GAO X Z. Morphological and anatomical observations of clasping leaves of *Tamarix* L. [J]. Acta Botanica Sinica, 1983,25(6):519-525. (in Chinese)
- [15] 张道远, 谭敦炎, 张娟, 等. 国产柽柳属植物 16 种植物当年生小枝比较解剖及其生态意义[J]. 云南植物研究, 2003,25(6): 653-662.
- ZHANG D Y, TAN D Y, ZHANG J, et al. Comparative anatomy of yang branches of 16 species of *Tamarix* from China with reference to their ecological significance[J]. Acta Botanica Yunnanica, 2003,25(6):653-662. (in Chinese)
- [16] 刘家琼, 蒲锦春, 刘新民. 我国沙漠中部地区主要不同生态类型植物的水分关系和旱生结构比较研究[J]. 植物学报, 1987 (6):93-98.
- [17] SPERRY J S, DONNELLY J R, TYREE M T. A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem [J]. Plant, Cell and Environment, 1988,11:35-40.
- [18] NARDINI A, GASCO A, TRIFILO P, et al. Ion-mediated enhancement of xylem hydraulic conductivity is not always suppressed by the presence of  $\text{Ca}^{2+}$  in the sap[J]. Journal of Experimental Botany, 2007,58:2609-2615.
- [19] JANSEN S, CHOAT B, PLETTERS A. Morphological variation of intervessel pit membranes and implications to xylem function in angiosperms [J]. American Journal of Botany, 2009,196:409-419.
- [20] SCHOLZ A, KLEPSCH M, KARIMI Z, et al. How to quantify conduits in wood? [J]. Frontiers in Plant Science, 2013,56 (4):1-11.
- [21] JANSEN S, PLETTERS A, SANO Y. The effect of preparation techniques on SEM-imaging of pit membranes [J]. IAWA Journal, 2008, 29:161-178.
- [22] 刘名廷. 柽柳属研究鉴定成果文集[C]// 刘名廷. 塔克拉玛干柽柳的研究. 乌鲁木齐: 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所, 1987.
- [23] 张道远, 杨维康, 潘伯荣, 尹林克. 刚毛柽柳群落特征及其生态、生理适应性[J]. 中国沙漠, 2003,23(4):446-451.
- ZHANG D Y, YANG W K, PAN B R, et al. Characters of *Tamarix hispida* willd communities and its ecological & physiological adaptation [J]. Journal of Desert Research, 2003,23(4):446-451. (in Chinese)
- [24] 王霞, 侯平, 尹林克, 等. 水分胁迫对柽柳组织含水量和膜透性的影响[J]. 干旱区研究, 1999(2):12-15.
- WANG X, HOU P, YIN L K, et al. Effect of tissue relative water content and membrane permeation of *Tamarix* under soil-water stress slowly [J]. Arid Zone Research, 1999(2): 12-15. (in Chinese)
- [25] 李荣, 党维, 蔡婧, 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.
- LI R, DANG W, CAI J, et al. Relationships between xylem structure and embolism vulnerability in six species of drought tolerance trees[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016,40 (3):255-263. (in Chinese)