

# 干旱胁迫对不同种源沙柳苗木水势 和水分利用效率的影响

王玉涛 李吉跃 张雪海 刘平

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 北京 100083)

**摘要** 通过人工模拟方式对5个种源沙柳苗木进行干旱胁迫处理,研究干旱处理不同阶段苗木小枝水势日变化、叶片相对含水量、水分饱和亏缺、保水力及水分利用效率。结果表明:干旱胁迫下5个种源的沙柳苗木小枝水势和叶片相对含水量均下降,而水分利用效率在轻度干旱时呈上升趋势,随干旱胁迫的加剧而下降。干旱处理15天后,民勤种源的沙柳日平均小枝水势下降幅度最大为0.77 MPa,然后依次为达拉特旗0.57 MPa、盐池0.36 MPa、榆林0.25 MPa和乌审旗0.12 MPa,其中民勤种源的苗木在充分供水和干旱胁迫下小枝水势差异达到显著。干旱处理18天后叶片相对含水量分别下降:民勤1.68%、盐池7.03%、达拉特旗7.25%、榆林9.35%和乌审旗11.07%,水分饱和亏缺民勤<盐池<达拉特旗<榆林<乌审旗。结果表明,民勤种源的沙柳抗旱的能力较强,而盐池和达拉特旗沙柳苗木在受到水分胁迫时水分利用效率下降幅度较小,即水分胁迫对苗木干物质的积累影响较小,因此具有更高的经济价值。

**关键词** 沙柳 干旱胁迫 水势 水分利用效率 叶片相对含水量

中图分类号: S718.43 文献标识码: A 文章编号: 1006-4427(2008)01-0026-07

## Effect of Drought Stress on Water Potential and Water Use Efficiency of *Salix psammophila* Seedlings of Different Provenances

Wang Yutao Li Jiyue Zhang Xuehai Liu Ping

(The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing, 100083)

**Abstract** Diurnal variation of water potential, leaf relative water content, water saturated deficit, water holding capacity and water use efficiency of *Salix psammophila* seedlings from 5 provenances were studied with water stress in the greenhouse. Water potential and leaves relative content of seedlings of all 5 provenances decreased, however water use efficiency increased in light drought, then decreased in severe drought. The decreased extent of water potential for different provenances was as follows: Minqin 0.77 MPa, Dalate 0.57 MPa, Yanchi 0.36 MPa, Yulin 0.25 MPa and Wushenqi 0.12 MPa when the seedlings were treated with water stress for 15 days; Variance analysis indicated that the difference of Minqin water potential between under normal and water stress condition was significant. When the seedlings were treated with water stress for 18 days, the decreased extent of leaf relative water content was Minqin 1.68%, Yanchi 7.03%, Dalate 7.25%, Yulin 9.35% and Wushenqi 11.07%, leaf water saturated deficit of seedlings from 5 provenances was Minqin > Yanchi > Dalate > Yulin > Wushenqi. The results showed leaf water saturated deficit of seedlings from Minqin was the least under severe water

\* 基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)课题《抗旱节水植物新品种筛选与利用》(2002AA2Z4011)的子课题《抗旱节水林草新品种筛选与利用》。

作者简介:王玉涛(1978-),女(汉族),在读博士研究生,主要研究方向:抗旱造林技术。E-mail: ytw730@sina.com.cn; 电话:010-62391634。

责任作者:李吉跃,男,1959年生,教授,博士生导师。主要研究方向:森林培育及栽培生理生态。电话:010-62338128; E-mail: ljyymy@vip.sina.com; 地址:北京林业大学47号信箱,邮编:100083。

and water use efficiency of seedlings from Yanchi and Dalate was higher under water stress, suggesting that *S. psammophila* seedlings from Minqin were the most drought-tolerant and economic values of Yanchi and Dalate seedlings were higher

**Key words** *Salix psammophila*, drought stress, water potential, water use efficiency, leaf relative water content

沙柳 (*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang) 是广泛分布在毛乌素沙地流动沙丘和固定沙丘上的固沙树种, 具有耐旱、抗沙埋、易成活、生长迅速等特性。由于沙柳能在裸沙丘生长良好, 形成群落, 起到良好的防沙固沙作用, 同时沙柳加工又成为西部沙区的一种发展产业, 因此近年来以沙柳为对象的研究较多, 如成活率<sup>[1-2]</sup>、生物学特性<sup>[3]</sup>、遗传育种<sup>[4-5]</sup>、生理生态学<sup>[6-13]</sup>、茎叶解剖<sup>[14-15]</sup>、材性<sup>[16]</sup>等方面。但关于不同地理种源沙柳水分特性研究较少。本文通过模拟干旱不同阶段对 5 个种源沙柳苗木水势日变化, 叶片相对含水量, 水分饱和亏缺、保水力及水分利用效率的影响, 探讨不同种源沙柳苗木抗旱性特征, 为干旱半干旱风沙区沙植被恢复, 选择优良的耐旱节水沙柳种源提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

于 2004 年 3 月, 在河西走廊沙地 (甘肃民勤县)、河东沙地 (宁夏盐池县)、库布旗沙漠 (内蒙古达拉特旗)、毛乌素沙地 (内蒙古乌审旗) 和毛乌素沙地南缘 (陕西榆林) 共 5 处, 选取 2~3 a 生的沙柳枝条中上部, 枝条粗细尽量保持一致, 截成 30 cm 长的插条, 浸水 24 h 后进行盆栽扦插培养 (花盆规格为高 35 cm、直径 30 cm), 每盆栽一株, 培育苗木的土壤是沙土 (沙土 : 壤土 = 10 : 1), 土壤容重  $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 田间持水量 14.04%, 充分供水培养 4 个月后进行人工模拟干旱试验。

表 1 5 沙柳种源的地理位置和气候条件

| 种源地  | 纬度 (N)          | 经度 (E)            | 年均降雨量 (mm) | 年均气温 (°C)  |
|------|-----------------|-------------------|------------|------------|
| 民勤   | 38°38'          | 103°05'           | 113        | 7.6        |
| 盐池   | 37°05' ~ 38°10' | 106°30' ~ 107°39' | 300        | 7.7        |
| 达拉特旗 | 40°00' ~ 40°20' | 109°00' ~ 110°30' | 240 ~ 360  | 6.1 ~ 7.1  |
| 乌审旗  | 38°57' ~ 39°10' | 109°2' ~ 109°17'  | 250        | 6.4        |
| 榆林   | 37°22' ~ 39°28' | 107°31' ~ 111°45' | 300 ~ 460  | 7.8 ~ 10.0 |

### 1.2 研究方法

试验在北京林业大学苗圃温室中进行。苗木蒸腾耗水试验从 2004 年 7 月 30 日开始, 在试验开始前先对供试苗木充分浇水, 然后进行干旱胁迫处理, 用塑料袋将盆口和盆底密封, 防止水分的蒸发和渗漏, 在试验过程中停止对苗木进行供水。在干旱的不同时间测定植株的小枝水势和叶片相对含水量。

### 1.3 测定指标

小枝水势 ( $\psi_w$ ): 利用便携式压力室 SKMP1400 (美国) 测定, 选取充分供水的苗木和经干旱胁迫 15 d 的苗木进行小枝水势的日变化测定, 从 6:00 ~ 20:00 时每隔 2 h 进行一次, 重复 3 次。且在干旱过程中连续测定苗木黎明前的小枝水势, 3 次重复。

叶片相对含水量和水分饱和亏缺: 叶片相对含水量的测定时, 先剪下叶片后立刻称鲜重, 然后将它们放在水中, 暗中放置 24 h 后称饱和重, 之后每隔 2 h 称重, 直至恒重, 然后在 80 °C 恒温下烘干 48 h, 称干重。3 次重复, 取平均值为该次取样植物叶片的相对含水量。计算公式:

$$\text{相对含水量 (RWC\%)} = (\text{鲜重} - \text{干重}) / (\text{饱和重} - \text{干重}) \times 100\%$$

$$\text{水分饱和亏缺 (WSD\%)} = 1 - \text{相对含水量}$$

水分利用效率: 用 Licor-6400 便携式光合测定系统 (美国) 测定。根据在充分供水和干旱第 7 和 18 d 分

别测定的 8:00~18:00时  $P_n$ 和  $E$ ,计算白天平均水分利用效率 ( $WUE = P_n/E$ ),每次选择 3株苗木,每株苗木取 3片叶子测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 小枝水势日变化

2.1.1 充分供水苗木水势日变化 小枝水势 ( $\psi_w$ )是反映植物缺水最敏感的指标之一,由图 1可见,充分供水条件下,5个种源沙柳小枝水势日变化曲线趋势相同,从 6:00~20:00时的  $\psi_w$ 绝对值日变化曲线呈单峰型。5个种源苗木水势值在清晨均比较高,民勤 -0.32 MPa、盐池 -0.27 MPa、达拉特旗 -0.42 MPa、乌审旗 -0.40 MPa、榆林 -0.25 MPa,水势均值为 -0.33 MPa。日出后,随着光照增强,气温升高,空气相对湿度小,蒸腾加快,沙柳体内水分出现亏缺,  $\psi_w$ 下降,从而增强沙柳从土壤中吸收水份的能力,至午后 14:00~16:00时  $\psi_w$ 降到最低值,此时苗木  $\psi_w$ 均值为 -1.69 MPa,比清晨平均  $\psi_w$ 降低了 1.36 MPa。而后  $\psi_w$ 开始恢复,到 20:00时  $\psi_w$ 开始接近清晨的水势。一天中  $\psi_w$ 的最大变幅由大到小的种源依次为盐池 1.65 MPa、达拉特旗 1.64 MPa、民勤 1.44 MPa、乌审旗 1.35 MPa和榆林 0.55 MPa。这说明在水分供应充足的条件下,盐池和达拉特旗种源苗木对午间水分亏缺的弹性适应能力最大,榆林种源最弱,民勤和乌审旗种源居中。沙柳水势午间的弹性下降,可以减少蒸腾,增加根系吸收水份的能力,是保持沙柳黎明前高水势的一种措施。

2.1.2 干旱胁迫苗木水势日变化 在干旱胁迫天后,5个种源沙柳  $\psi_w$ 日变化曲线同样呈单峰型。各种源苗木清晨 6:00时小枝  $\psi_w$ 依然为全天高水势,但是明显低于充分供水的苗木清晨  $\psi_w$ ,5个种源  $\psi_w$ 大小依次为民勤 -1.60 MPa、盐池 -1.25 MPa、达拉特旗 -1.28 MPa、乌审旗 -1.08 MPa和榆林 -1.09 MPa,平均为 -1.26 MPa,比充分供水时平均下降了 0.93 MPa;5个种源清晨水势比充分供水条件分别下降了 1.28,0.98,0.86,0.67,0.84 MPa。

在干旱胁迫下,5个种源沙柳  $\psi_w$ 最低值依然出现在 14:00~16:00时  $\psi_w$ 均值 -2.01 MPa,比充分供水时下降了 0.33 MPa;该时段  $\psi_w$ 下降幅度比清晨下降幅度 0.60 MPa。这主要由于苗木无论是在正常的水分条件下还是水分胁迫条件下,在午间空气温度高,相对湿度小的时段都易受到大气水分亏缺的影响,苗木利用自身  $\psi_w$ 下降来适应大气干旱胁迫。然而,在正常水分条件时,  $\psi_w$ 午间下降的幅度大,可调节能力强,而受到干旱胁迫后,清晨的水势降低,午后小枝  $\psi_w$ 下降幅度减小,适应水分亏缺的能力下降。

从 5个种源日平均水势来看,干旱胁迫后,日平均水势都不同程度下降:榆林 -1.24 MPa、乌审旗 -1.25 MPa、盐池 -1.48 MPa、达拉特旗 -1.67 MPa和民勤 -1.91 MPa,5个种源差异达到极显著 ( $F = 5.11 >$

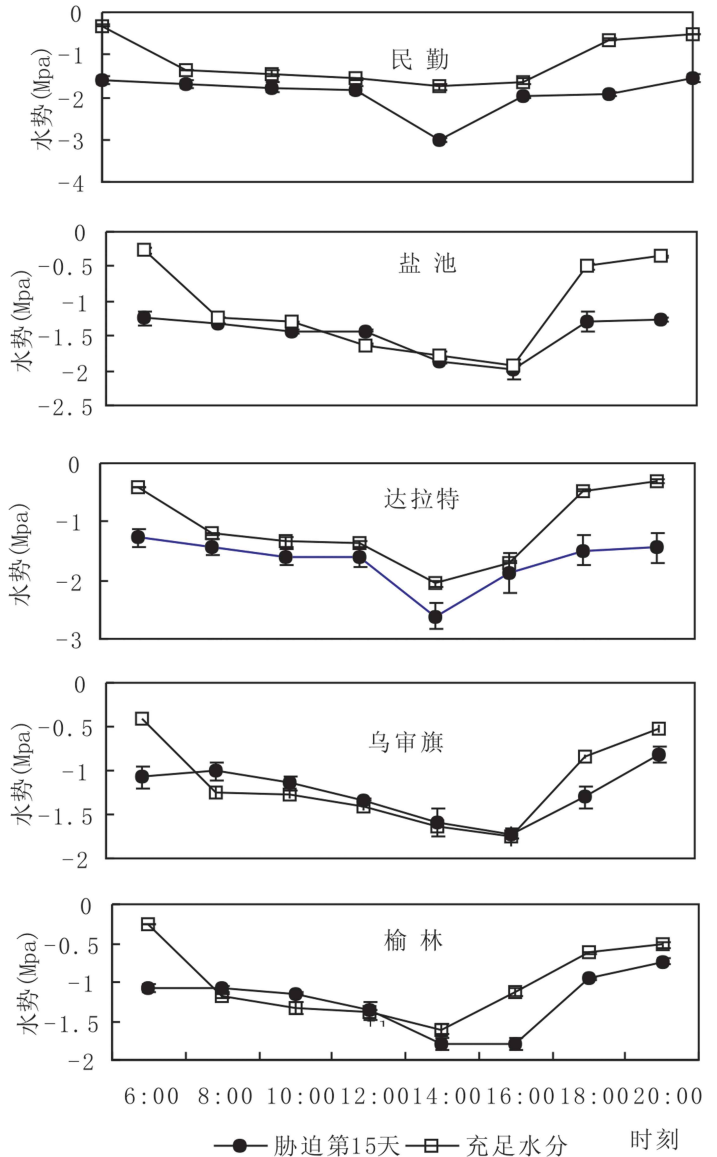


图 1 不同时期 5个沙柳种源水势日变化

$F_{0.01} = 3.91$ ), 下降幅度最大的民勤种源为  $0.77 \text{ MPa}$ , 然后依次为达拉特旗  $0.57 \text{ MPa}$ 、盐池  $0.36 \text{ MPa}$ 、榆林  $0.25 \text{ MPa}$  和乌审旗  $0.12 \text{ MPa}$ , 5 个种源只有民勤种源充分供水的苗木  $\psi_w$  和干旱胁迫的苗木  $\psi_w$  日变化差异达到显著 ( $F = 8.77 > F_{0.05} = 4.60, n = 3$ ), 且充分供水条件下, 民勤种源日平均  $\psi_w$  值最低为  $-1.15 \text{ MPa}$ , 经干旱胁迫后下降的幅度也最大, 清晨的恢复能力较高, 可能与民勤地区水分条件恶劣 (年降水量  $110 \text{ mm}$  左右) 相关, 民勤种源的沙柳长期生长在干旱缺水的环境, 已经形成了以低水势来适应干旱的特性; 而榆林种源与之相反, 榆林地区水分条件 (年降水量  $300 \sim 460 \text{ mm}$ ) 相对较好, 日平均水势值高  $-1.01 \text{ MPa}$ , 经干旱胁迫后下降的幅度也小 ( $0.25 \text{ MPa}$ ), 始终维持高的水势。达拉特旗和盐池种源在两种水分条件下, 小枝水势都维持在中等水平。

## 2.2 干旱对黎明前小枝水势的影响

黎明前水势代表了植物水分恢复状况, 可以用来判断植物水分亏缺程度<sup>[17-18]</sup>。从图 2 可以看出, 沙柳苗木在受到水分胁迫的初期和中期, 水势下降较慢, 以高水势抵御干旱, 在水分胁迫第 20 d 以后, 即水分胁迫的后期, 水势降到  $-2 \text{ MPa}$  以下, 苗木水势在短时间便降到致死状态。除榆林种源外, 在干旱的第 25 d, 其他 4 个种源水势都下降到  $-4 \text{ MPa}$  以下。据试验观察, 沙柳苗木受干旱胁迫后, 叶片下垂, 出现脱落现象, 从干旱第 19 d 叶片大量脱落, 第 25 d 叶子基本落光, 苗木枝条也开始变黄。张建国<sup>[18]</sup>等人认为高水势延迟脱水耐旱的植物通过限制水分的损失或保持水分的吸收来延迟脱水的发生, 保持水分的吸收, 主要是通过增加根系来实现, 而限制水分的损失主要有三条途径, 一是增加气孔和角质层阻力, 二是较少太阳辐射, 降低叶片温度, 三是减少叶面积。另外, 沙柳还可以通过水势在午间的弹性下降, 来减少蒸腾, 增加根系吸收水分的能力, 来保证沙柳黎明前的高水势。黄振英等人的相关研究<sup>[18]</sup>表明沙柳水分胁迫后, 气孔导度下降, 即气孔阻力增加。沙柳根系具有深根性, 1 a 生的苗木根长可达到  $1 \text{ m}$  以上, 因此具有通过根系大量吸收水分的能力, 并且在受到干旱胁迫后, 正是利用张建国等人阐述的限制水分损失的三条途径来抵御干旱。因此, 本研究认为沙柳具有高水势延迟脱水的耐旱性。

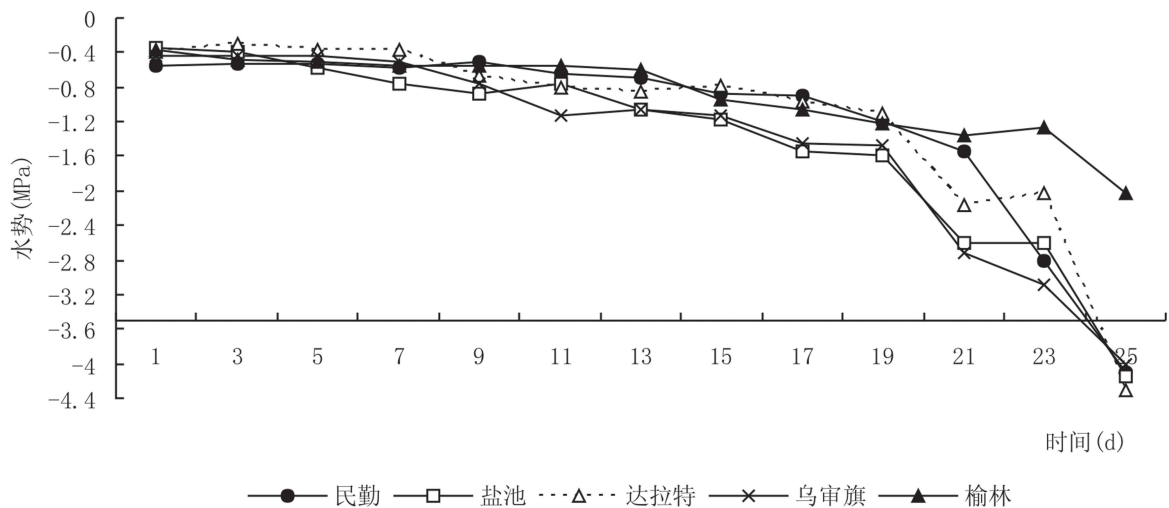


图 2 干旱过程中 5 个种源沙柳苗木黎明前水势连日变化

## 2.3 相对含水量和饱和水分亏缺的变化

由图 3 可见, 含水量由大到小依次为乌审旗  $96.54\%$ 、盐池  $95.82\%$ 、达拉特旗  $95.36\%$ 、榆林  $94.95\%$  和民勤  $92.55\%$ , 经方差分析发现各个种源的相对含水量差异不显著。在干旱第 7 d 时叶片相对含水量与充分供水条件下差异不大, 叶片相对含水量最大的种源和最小的种源依然为乌审旗和民勤, 分别是  $96.82\%$  和  $92.13\%$ , 其他 3 个种源分别为盐池  $95.98\%$ 、达拉特旗  $94.45\%$  和榆林  $94.98\%$ ; 干旱第 18 d, 叶片相对含水量明显下降, 方差分析表明与正常水分条件下叶片相对含水量存在显著差异 ( $p = 0.001 < \alpha = 0.01$ ), 民勤种源下降幅度最小, 叶片相对含水量为  $90.87\%$ 、成为叶片相对含水量最高的种源, 其他 4 个种源分别为盐池  $88.79\%$ 、达拉特旗  $88.11\%$ 、榆林  $85.60\%$  和乌审旗  $85.47\%$ 。从叶片相对含水量下降幅度来看, 民勤种源下降幅度最小为  $1.68\%$ , 乌审旗的下降幅度最大为  $11.07\%$ , 其余 3 个种源下降幅度由小到大为盐池  $7.03\%$ 、

达拉特旗 7.25%和榆林 9.35%。在干旱的第 18 d即干旱的中后期,民勤沙柳苗木的水分饱和和亏缺最小为 9.13%,其次是盐池和达拉特旗种源苗木水分饱和和亏缺分别为 11.21%, 11.89%,榆林和乌审旗种源苗木水分饱和和亏缺较大为 14.40%和 14.53%。植物发生水分胁迫时,叶片的水分饱和和亏缺较小,说明叶片的保水能力强,较小的影响植物体生理生化的正常运转<sup>[19,20]</sup>。根据 5个种源干旱胁迫处理后植物叶片的水分饱和和亏缺,来判别叶片减少失水、保持水分、保持膨压等的综合保水能力,发现民勤沙柳种源保水能力强于其他 4个种源。

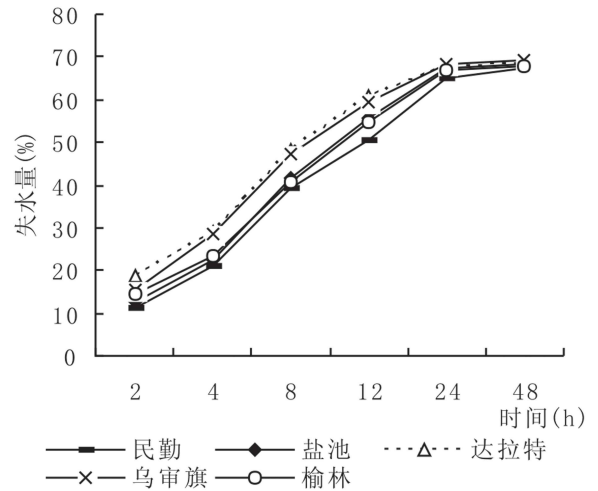
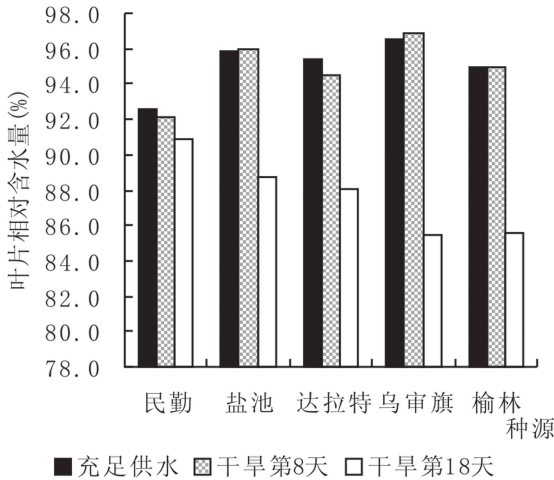


图 3 不同时期 5 个种源沙柳苗木叶片的相对含水量

图 4 5 个源沙柳苗木叶保水力的比较

持水力反映了植物在干旱情况下对水分的保持能力,可以依据其大小判断植物的抗旱性。从图 4 可以看出,5个种源沙柳叶片在自然风干的前 24 h内,失水量比较大,24~48 h这个时间段只有少量失水,基本达到恒重。在 48 h后,5个种源均达到恒重,民勤、盐池、达拉特旗、乌审旗和榆林失水量分别为 67.47%, 68.29%, 68.31%, 69.07%和 67.76%,平均失水量 68.18%。从数值上可以看出,5个种源沙柳到达恒重时叶片的失水量非常近似,但是从失水的曲线来看,5个种源在前 24 h前失水的速率是明显不同的,且民勤种源失水曲线的斜率最小,说明该种源在饱和和亏缺小,保水能力最强,这与民勤种源的沙柳长期在干旱条件下生长有关,是适应干旱的一种方式。叶片的水分特性,一定程度上反映它所在地区的土壤的水分关系,对于长期生活在干旱地区的沙柳来说,叶片可能通过改变其结构,来维持水分平衡。

2.4 不同种源沙柳的水分利用效率

表 2 不同时期 5 个种源沙柳水分利用效率 单位:  $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$

| 种源地  | 正常水分  | 干旱 7 d | 干旱 18 d |
|------|-------|--------|---------|
| 民勤   | 2 952 | 3 605  | 1 220   |
| 盐池   | 2 931 | 2 901  | 2 135   |
| 达拉特旗 | 2 970 | 3 421  | 1 847   |
| 乌审旗  | 2 923 | 2 991  | 1 070   |
| 榆林   | 3 259 | 3 605  | 1 699   |

本试验通过测定 5个种源沙柳苗木在干旱胁迫不同阶段的净光合速率  $P_n$ 和蒸腾速率  $E$ ,计算出叶片的瞬间水分利用效率。结果表明(表 2),在充分供水条件下,5个沙柳种源的水分利用效率非常接近,分别是民勤  $2 952 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ 、盐池  $2 931 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ 、达拉特旗  $2 970 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ 、乌审旗  $2 923 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ 和榆林  $3 259 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ ;轻度水分胁迫后(干旱第 7 d)苗木的水分利用效率除盐池种源外都呈增加的趋势,其中增幅最大的为民勤种源,增加 0.65

$\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ ,其次为达拉特旗种源增加了  $0.45 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ ,然后依次为,榆林种源增加了  $0.35 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ 、乌审旗种源水分利用效率略有增加,而盐池种源的苗木水分利用效率有所下降。严重干旱时(干旱 18 d 后),苗木的水分利用效率都呈现下降的趋势,分别下降了 58.7%,27.2%,37.8%,63.%和 47.9%。5 个种源沙柳正常水分与轻度干旱时的水分利用效率差异不显著,与严重干旱时差异达到了极显著。

### 3 结论与讨论

水势是反映植物缺水最敏感的指标之一<sup>[19]</sup>。叶片含水量则可以直接反映植物体内的水分状况。韩蕊莲<sup>[20]</sup>和 Guo Weihua<sup>[21]</sup>研究表明沙棘叶水势和叶片相对含水量随土壤含水量下降而明显下降,并证明沙棘具有低水势耐旱的特性。杨建伟等<sup>[22]</sup>证明杨树叶水势和叶片相对含水量受干旱的影响较大,在中度水分亏缺和严重干旱下杨树叶水势和叶片含水量均下降,在轻度和中度水胁迫时下降速度较缓慢,重度水分胁迫时下降最为显著。研究表明,沙柳具有高水势耐旱的特征;在受到干旱胁迫时,苗木小枝水势和叶片的相对含水量变化随干旱程度的加剧呈下降趋势。从 5 个种源的变化趋势来看,民勤种源相对含水量下降幅度最小,水分饱和亏缺最小,持水能力比较强,其次是达拉特旗和盐池种源,下降幅度较大的是乌审旗和榆林种源。结果表明 5 个种源沙柳苗木抗旱能力存在差异,并且民勤种源由于长期生活在相对干旱的环境下,形成了比其他 4 个种源更适应干旱的机制。

水分利用效率的变化是植物抗旱策略的重要组成部分。当苗木遭受水分胁迫时,其水分利用效率必定会发生相应的变化,以保持苗木生长与水分消耗的平衡。在干旱情况下,苗木的水分利用效率通常会上升,这是因为水分亏缺会导致气孔导度大大降低,从而使苗木蒸腾强度的降低大于光合强度的降低,使单叶水平的水分利用效率升高<sup>[23-25]</sup>。从本试验的研究结果来看,沙柳在不同土壤干旱条件下,单叶水平上的 WUE 并不符合此规律,而是 5 个种源沙柳苗木除盐池种源外,水分利用效率为轻度干旱 > 适宜水分 > 严重干旱,这表明在土壤水分从充足水分状态到轻度干旱的变化过程,沙柳消耗单位水量积累的干物质量增加,而土壤严重干旱时,沙柳单位水量积累的干物质量明显减少。从 5 个种源变化来看,民勤种源虽然在干旱的不同阶段皆保持着较高的含水量,并且能以较大幅度降低水势来适应干旱,但是水分严重亏缺时,水分利用效率的下降幅度也较大,即民勤种源积累干物质的效率明显下降。而盐池和达拉特旗种源在适应干旱的能力方面表现居中,但在严重干旱时,水分利用效率下降幅度也较小,积累干物质的效率相对比较高。

依据上述的研究结果表明,对于在干旱半干旱的沙地和沙漠区进行沙柳造林时,可以根据造林的目的,选择不同的种源。在以保证成活,防风固沙为目的的造林中应该更多推广民勤种源,而在一些以沙柳为产业的造林地区,尤其是土壤水分很难达到沙柳生长要求的地区,应该推广水分利用效率相对较高,又比较耐旱的盐池和达拉特旗种源,以取得更高的经济价值。

### 参考文献

- [1] 白凤忠,连桂梅,张俊生,等.毛乌素沙地沙柳不同季节造林试验研究初报[J].内蒙古林业调查设计,2005,28(12):55-56
- [2] 王玉涛,李吉跃.固体水、叶面肥在防沙治沙抗旱造林中对苗木成活及生长的影响[J].北京林业大学学报,2006(3):76-80
- [3] 丁志刚,任安海,苏亮明.浅谈沙柳的生物学特性、自然分布与平茬复壮技术[J].内蒙古林业科技,2005,28 sup:37-39
- [4] 宁明世,李奇,侯春艳.以无性系育种与等位酶技术对沙柳优良无性系的选择研究[J].内蒙古农业大学学报,2004,25(3):18-23
- [5] 乌云塔娜,张胜利,秦月明,等.沙柳等位酶分析[J].内蒙古农业大学学报,2001,22(3):74-79
- [6] 常金宝.沙柳幼苗光合、蒸腾强度日动态变化及影响因素[J].内蒙古师范大学学报:自然科学(汉文)版,2003,32(4):17-22
- [7] 董学军,杨宝珍,郭柯,等.几种沙生植物的水分生理生态特征研究[J].植物生态学报,1994,18(1):86-94
- [8] 黄振英,董学军,蒋高明,等.沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究[J].西北植物学报,2002,22(4):817-823

- [9] 肖春旺. 模拟降水量对毛乌素沙柳幼苗蒸发蒸腾的潜在影响 [J]. 草地学报, 2001, 9(2): 121-127.
- [10] 张国盛, 王林和, 董智, 等. 毛乌素沙地主要固沙灌(乔)木林地水分平衡研究 [J]. 内蒙农业大学学报, 2002, 23(3): 1-9.
- [11] 郭建平, 高素华. CO<sub>2</sub> 浓度和辐射强度变化对沙柳光合作用速率影响的模拟研究. 生态学报, 2004, 24(2): 181-185.
- [12] 肖春旺, 周广胜. 不同浇水量对毛乌素沙地沙柳幼苗气体交换过程及其光化学效率的影响 [J]. 植物生态学报 2001, 25(4): 444-450.
- [13] 杨劫, 高清竹, 李国强, 等. 皇甫川流域主要人工灌木水分生态的研究 [J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 87-93.
- [14] 何丽君, 慈忠玲, 李健军. 沙柳茎叶结构的比较解剖学观察 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2000, 21(1): 128-132.
- [15] 许凤, Jones Gwynn L L, 孙润仓. 速生灌木沙柳的纤维形态及解剖结构研究 [J]. 林产化学与工业, 2006, 26(1): 91-94.
- [16] 李奇, 高志悦. 沙柳材的又一新利用——沙柳木束/刨花复合板 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2004, 25(4): 122-124.
- [17] 曾凡江, 李向义, 张希明, 等. 策勒绿洲多枝桧柳灌溉前后水分生理指标变化的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 849-853.
- [18] 张建国, 李吉跃, 沈国舫. 树木耐旱特性及其机理研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 6.
- [19] Mrema A M, Granhall U. Senneby Forest plant growth, leaf water potential, nitrogenase activity and nodule anatomy in *Leucaena leucocephala* as affected by water stress and nitrogen availability [J]. Trees Structure and Function, 1997, 12(1): 42-48.
- [20] 韩蕊莲, 梁宗锁, 邹厚远, 等. 沙棘在不同土壤干旱下的耗水特性 [J]. 沙棘, 1991(4): 33-35, 38.
- [21] Guo Weihua, Li Bo, Huang Yongmei, et al. Effects of different water stresses on eco-physiological characteristics of *Hippophae rhamnoides* seedlings [J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(10): 1238-1244.
- [22] 杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲, 等. 不同干旱土壤条件下杨树的耗水规律及水分利用效率研究 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 630-636.
- [23] 喻方圆, 徐锡增, Robert D. Guy. 水分和热胁迫处理对4种针叶树苗气体交换和水分利用效率的影响 [J]. 林业科学, 2004, 40(2): 38-44.
- [24] 接玉玲, 杨洪强, 催明刚, 等. 苹果叶片的水分含量和水分利用效率的关系 [J]. 应用生态学报, 2001, 12: 387-390.
- [25] Thomas, H. Characteristics of *Dactylis glomerata* L., *Lolium perenne* L. and *L. multiflorum* Lam [J]. Plant Annals of Botany, 1986, 57: 211-223.