

文章编号: 1000-4025(2002) 03-0579-08

## 不同土壤水分状况对杨树、沙棘 水分关系及生长的影响<sup>①</sup>

杨建伟<sup>1,3</sup>, 韩蕊莲<sup>1,2</sup>, 魏宇昆<sup>1,2</sup>, 孙群<sup>2</sup>, 梁宗锁<sup>1,2\*</sup>

(1 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; 2 西北农林科技大学, 陕西杨陵 712100; 3 南阳师范学院生物系, 河南南阳 473061)

**摘 要:** 在盆栽条件下对杨树、沙棘进行了 3 种土壤水分处理, 研究结果表明: 沙棘的叶含水率在同一土壤水分下比杨树高, 而水势低, 说明沙棘叶的抗旱保水能力强于杨树; 沙棘单叶的光合速率能够长时间维持在较高的水平, 蒸腾速率却并非如此。杨树无论在生长初期, 还是生长中期其单叶 WUE 均高于沙棘。以新生枝生物量/耗水总量计算的整体 WUE 在 3 种土壤水分条件下, 杨树的 WUE 分别是沙棘的 2.4 倍、2.3 倍、2 倍, 其差异达极显著水平, 但在 3 种土壤水分条件下 2 个树种都以中度亏缺下的水分利用率最高。整个生长季节处在严重干旱下的杨树和沙棘的生长均受到显著影响, 沙棘生长受干旱影响程度小于杨树, 从整个生长趋势上看杨树适宜于良好水分下的生长, 沙棘在适宜水分和轻度亏缺下均可良好生长。

**关键词:** 沙棘; 杨树; 生长; 水分关系

中图分类号: Q945.17 文献标识码: A

## Water relation and growth of seabuckthorn and poplar under different soil water content

YANG Jian-wei<sup>1,3</sup>, HAN Rui-lian<sup>1,2</sup>, WEI Yu-kun<sup>1,2</sup>, SUN Qun<sup>2</sup>, LIANG Zong-suo<sup>1,2\*</sup>

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Biology Department of Nanyang Normal College, Nanyang, Henan 473061, China)

**Abstract:** It was studied that two species of tree grew under 3 treatments of soil water content, results showed that leaf water content of seabuckthorn is higher and water po-

① 收稿日期: 2001-12-25; 修改稿收到日期: 2002-03-16

基金项目: 中国科学院西部之光人才基金项目、知识创新项目(KZCX01-6)和水利部黄河中上游管理局科研专项基金资助项目(1997001)

作者简介: 杨建伟(1964-), 女(汉族), 硕士。

\* 通讯联系人。Correspondence to: Prof. LIANG Zong-suo. E-mail: Liangzs819@163.net

tential is lower than that of poplar in same soil water content. That results show seabuckthorn has tolerance drought higher than that of poplar. Photosynthesis rate of single leaf seabuckthorn can carry out higher rate in soil drought. Transpiration rate is different of photosynthesis rate. Single leaf water use efficiency of poplar is higher than that of seabuckthorn in growth early days and medium term (May and July). Poplar WUE respectively was 2.4 times, 2.3 times, 2 times than that of seabuckthorn in total WUE of new branch biomass/total of consumed water and difference was significant level, two species of tree WUE was the best in medium water stress under 3 soil water content given conditions. The growth of seabuckthorn and poplar was obvious retained in total growing season, seabuckthorn effect of growth was smaller than that of poplar. Poplar growing was fitted better water conditions and seabuckthorn growing was better in fitted water and medium water stress from total growing. The result was provided basis of chosen trees species in loess plateau.

**Key words:** poplar (*Populus simonii*); seabuckthorn (*H. rhamnoides*); growth; water relation

黄土高原地区干旱缺水,而仅有的降水多集中在7~9月份,降雨集中加之土地资源的不合理利用及植被的严重破坏造成了极为严重的水土流失和春季严重干旱时的沙尘暴,受到了国内外学者瞩目<sup>[1]</sup>。治理水土流失的关键是通过造林种草增加植被覆盖。但是由于黄土高原恶劣的自然环境条件,使造林成活率很低,保存率更低。只有在生态效应和树种选择方面进行系统研究,切实提高造林质量,才能从根本上解决问题<sup>[2]</sup>。而在黄土高原地区特定的土壤水分下,要选择出合理的树种就必须对所选择的树种的水分关系进行深入的研究,了解该树种的生物学特性,特别是栽植后1年内能否成活与良好生长的关键时期,故对此研究显得尤为重要。

本研究以黄土高原常见树种的沙棘和杨树为实验材料,模拟这些树种生境的土壤干旱条件,探讨不同土壤水分下各树种的水分关系以及土壤含水量对各树种生物量的累积和成活率的关系,为黄土高原造林树种选择提供一定的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料与处理

本实验采用黄土高原常见的造林树种杨树(*Populus simonii*)、沙棘(*H. rhamnoides*, L. Subsp. *Sinensis* Rousi),由中国科学院安塞生态试验站提供的均为1年生的实生苗。试验用土采用安塞生态站的黄绵土,田间最大持水量为21.5%,盆栽条件下对2个树种分别设置3个供水水平:适宜水分、中度水分亏缺、严重水分亏缺,即分别是土壤最大持水量( $\theta_f$ )的70%、55%、40%,这3种土壤水分处理(以下分别用70%  $\theta$ 、55%  $\theta$ 和40%  $\theta$ 表示),各处理分别设置5~6盆重复,每盆栽植3~4株苗,待成活后选择大小基本一致的苗木保留2株,各苗木于2001年3月6日植入口径20 cm高30 cm的生长钵内。栽培盆放

置于中国科学院水土保持研究所的可移动模拟干旱防雨棚内,雨天用防雨棚遮雨,晴天露地生长。从移栽之日开始,每天定时用电子秤称重控制土壤含水量,并加水补充其蒸腾损失,为排除土壤蒸发用塑料薄膜覆盖盆面裸土。每次用量杯记录加水量,整个实验持续至10月中旬结束,历时210 d。

## 1.2 测定项目及方法

水势:用小液流法,在每月的晴朗天的早上8:00~9:00定时测定,每个处理3个重复;叶片含水量:选取功能叶,用烘干称重法测定。光合速率( $P_n$ )和蒸腾速率( $T_r$ )的测定:每处理选用功能叶5~6片,用Licor-6400型便携式光合仪测定。水分利用率(WUE)的测定:瞬时水分利用率 $WUE = P_n/T_r$ ,整体 $WUE = \text{新生枝生物量}/\text{耗水总量}$ 。新生枝条生长速率:米尺定枝定时测定,生物量的测定,实验结束烘干称重整株植物减去栽前干重。耗水量为加入水量与栽之前后土壤含水量变化之和<sup>[3]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 土壤水分含量对杨树和沙棘水势及叶含水量的影响

由图1~2可以看出,杨树和沙棘的水势在不同土壤水分条件下有明显差异。在适宜水分下,杨树和沙棘的水势下降趋势比较平缓并且二者曲线很相似,均是从5月-0.6 MPa降至9月-1.2 MPa。在中度水分亏缺下,杨树从5月的-0.8 MPa降至9月的-1.7 MPa,而沙棘则降至-1.9 MPa。在严重亏缺下,杨树从5月的-0.8 MPa降至9月的-2.4 MPa,而沙棘则从-1.05 MPa降至-2.8 MPa。

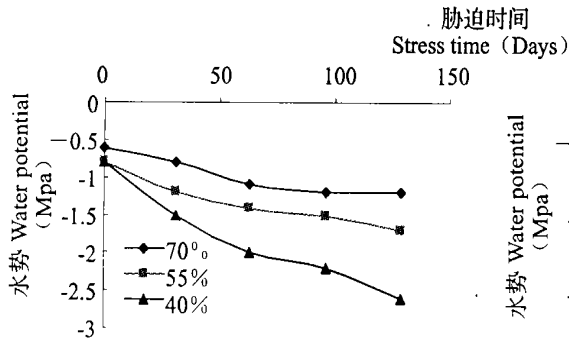


图1 不同土壤水分下杨树叶水势变化

Fig. 1 Changes of water potential of poplar seedlings under different soil water stress

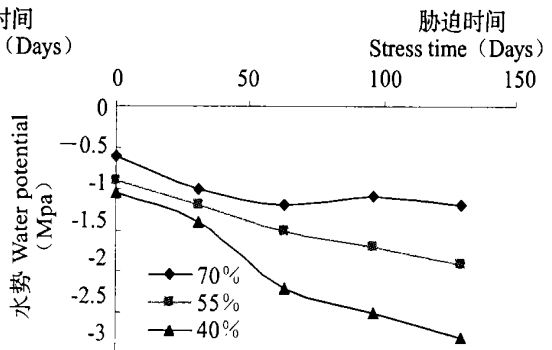


图2 不同土壤水分下沙棘叶水势变化

Fig. 2 Changes of water potential of seabuckthorn seedlings under different soil water stress

从图3,图4可以看出杨树和沙棘的叶含水量变化趋势和二者的水势变化基本一致。但沙棘的叶含水率在同一水分下比杨树高。与同时测定的叶水势相联系可以看出,与杨树相比较,沙棘的含水量高而水势低于杨树,说明沙棘叶保水能力强,与李代琼等人研究结果相似<sup>[4]</sup>。在适宜水分下杨树和沙棘的水势没有大的差别,在中度和严重亏缺下沙棘水势的下降幅度则超过了杨树,但是,在3种土壤含水量下,沙棘的叶含水量却总是高于杨树,说明了沙棘和杨树相比具有低水势的抗旱能力,而含水量却并没有下降,使沙棘能够在干

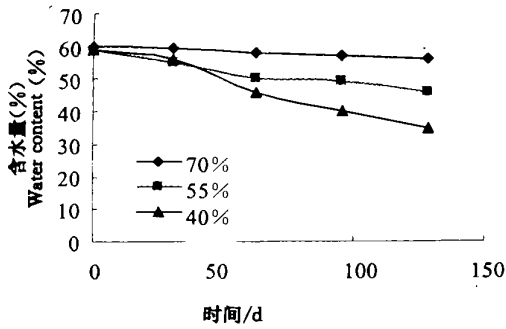


图3 不同土壤水分下杨树叶含水量变化

Fig. 3 Changes of water content of poplar seedlings under different soil water stress

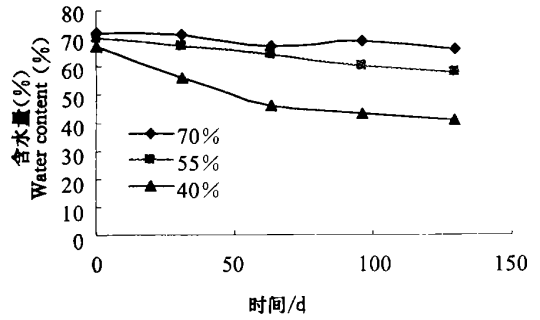


图4 不同土壤水分下沙棘叶含水量变化

Fig. 4 Changes of water content of seabuckthorn seedlings under different soil water stress

旱环境下维持生长。因此在不同树种间应用不同水分生理指标,反映和比较受旱状况时应特别注意。

## 2.2 土壤水分含量对光合速率、蒸腾速率及瞬时 WUE 的影响

从表 1 知,随着土壤含水量的下降,杨树和沙棘的光合速率也随着下降,2 个树种的光合速率顺序均是  $70\% \theta > 55\% \theta > 40\% \theta$  条件下。说明了土壤水分含量的高低决定了光合速率的大小。在生长初期 5 月,杨树的各处理光合速率稍高于沙棘。而在生长中期 7 月,沙棘的各处理光合速率则显著高于杨树。据此可以看出沙棘的光合速率能够长时间维持在较高的水平。但是,蒸腾速率却并不遵循此规律,沙棘的各处理蒸腾速率均比杨树高。因此,沙棘的 WUE 并不因为其光合速率高而大于杨树。杨树无论在生长初期,还是生长中期其 WUE 均比沙棘高。

表 1 生长初期和生长中期(5 月和 7 月)杨树和沙棘光合速率、蒸腾速率及 WUE 变化

Table 1 The change of photosynthesis rate, transpiration rate and water use efficiency in growth early days and medium term (May and July) of poplar seedlings and seabuckthorn seedlings

		杨树 Poplar seedlings			沙棘 Seabuckthorn seedlings		
		Pn ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Tr ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	WUE	Pn ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Tr ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	WUE
生长初期 Growth in early days	70% $\theta$	11.80	2.91	4.05	9.62	6.12	1.57
	55% $\theta$	10.73	3.11	3.45	8.49	5.13	1.65
	40% $\theta$	9.57	2.93	3.26	6.77	5.02	1.35
生长中期 Growth in medium term	70% $\theta$	10.75	1.89	5.68	29.90	7.65	3.90
	55% $\theta$	10.20	1.94	5.26	24.68	6.07	4.10
	40% $\theta$	8.47	2.31	3.67	11.58	3.22	3.60

对于杨树来说,用光合速率与蒸腾速率计算的 WUE 的大小是  $70\% \theta > 55\% \theta > 40\% \theta$ 。而对于沙棘来说,用光合速率与蒸腾速率计算的 WUE 的大小则是  $55\% \theta > 70\% \theta > 40\% \theta$ 。这是由于沙棘在中度亏缺下生物量比适宜水分和严重干旱下高。而杨树则是在适宜水分下生物量最高。

### 2.3 土壤水分对杨树和沙棘蒸腾速率日变化的影响

由图 5, 6 可以看出: 以晴朗无云的典型天气下(5月10日)杨树和沙棘在不同土壤水分下蒸腾的动态变化曲线测定表明: 杨树(图 5)在 70%  $\theta$  和 55%  $\theta$  的水分下, 从 8:00 蒸腾速率逐渐上升, 14:00 左右达到高峰, 18:00 降至最低, 构成单峰曲线。在 40%  $\theta$  水分下, 8:00 蒸腾开始上升, 10:00 达到第一个高峰, 然后急剧下降, 至下午 16:00 略有回升, 构成双峰曲线。沙棘在 3 种水分条件下(图 6), 从 8:00 开始逐渐上升, 12:00 左右达到高峰, 18:00 左右降至最低, 构成单峰曲线。杨树和沙棘在 3 种水分条件下的蒸腾均为 70%  $\theta$  > 55%  $\theta$  > 40%。在适宜水分和轻度亏缺下, 二者蒸腾耗水量差异不大。但在严重干旱下二者差异较明显, 沙棘的蒸腾日变化比较平缓, 无蒸腾高峰出现, 而杨树则有高峰出现。测定结果表明杨树的日蒸腾耗水量明显高于沙棘。

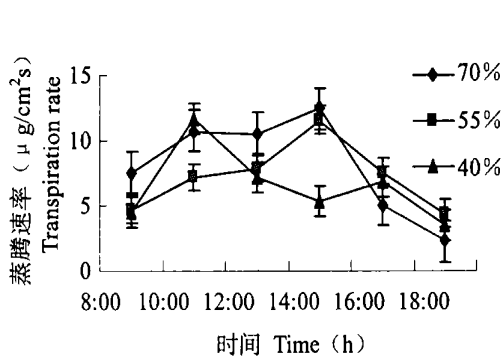


图 5 5月10日杨树蒸腾日进程

Fig. 5 Transpiration rate of poplar seedlings at 10, May

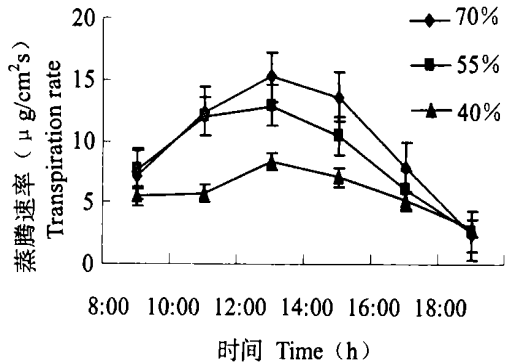


图 6 5月10日沙棘蒸腾日进程

Fig. 6 Transpiration rate of seabuckthorn seedlings at 10, May

### 2.4 土壤水分对枝条生长速率的影响

由图 7 知: 杨树在整个生长季中, 70%  $\theta$  和 55%  $\theta$  的土壤水分条件下其生长速率接近 S 形周期, 3~4 月生长较慢, 而 7 月以后生长极为缓慢, 其生长大周期在 5~6 月。并且在 7 月以前 70% 处理生长高于 55% 处理, 7 月以后 55% 处理高于 70%。而 40% 处理在整个生长季中其生长速率显著低于 70% 和 55%, 不但生长缓慢且其整个曲线比较平缓, 表现出累积性生长曲线。

从图 8 可看出: 沙棘的生长与杨树相比有明显的不同。其 3 种处理整个生长季均表现出 S 形大周期现象。从大体上看, 沙棘在 3 种处理下的生长速率是 70%  $\theta$  > 55%  $\theta$  > 40%  $\theta$ 。3~4 月上旬生长较慢, 4 月中旬以后 3 种处理的生长急剧增加。其中, 70%  $\theta$  和 55%  $\theta$  的生长大周期是在 5~7 月, 8 月以后生长减慢。而 40%  $\theta$  处理的生长大周期是在 5~6 月, 6 月以后生长极为缓慢。由此说明在适宜水分和轻度亏缺下沙棘的生长一直持续到 8 月以后, 其生长大周期时间较长。40%  $\theta$  的处理只持续到 6 月份, 其生长大周期时间较短。

以上结果说明, 在严重干旱下杨树和沙棘的生长均显著受到影响, 但二者受影响的程

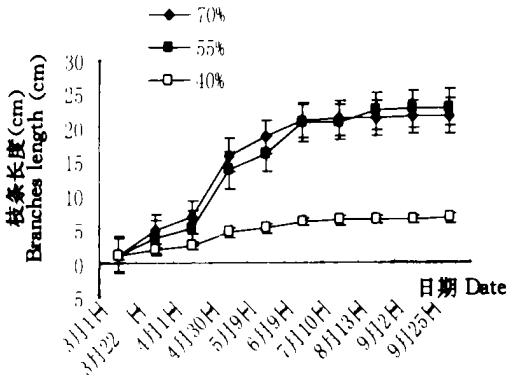


图7 3~10月杨树枝条生长速率  
Fig. 7 Growth rate of poplar seedlings branches in all season

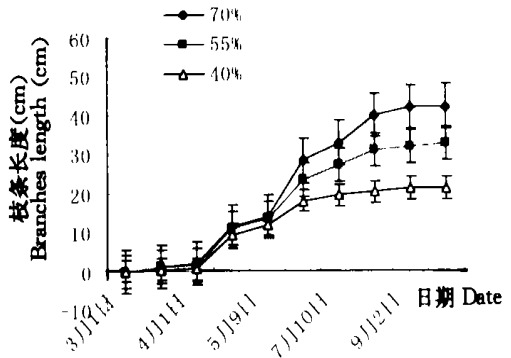


图8 3~10月沙棘枝条生长速率  
Fig. 8 Growth rate of seabuckthorn seedlings branches in all season

度不同,沙棘生长受干旱影响小于杨树。在中度水分亏缺以前,杨树和沙棘的生长则不受干旱的显著影响。但是,从整个生长趋势上看杨树适宜于良好水分的下生长。沙棘在适宜水分和轻度亏缺下均可良好生长。

2.5 土壤水分对杨树和沙棘单株总耗水量、新生枝生物量及整体 WUE 的影响

2.5.1 不同土壤水分对杨树和沙棘单株总耗水量、新生枝生物量及整体 WUE 的影响

从表 2 可以看出:杨树和沙棘在 3 种土壤水分下,总耗水量差异性均达到了极显著水平。对于杨树,在 70%  $\theta_f$  下的总耗水量是 55%  $\theta_f$  下的 1.6 倍,是 40%  $\theta_f$  下的 2.7 倍。对于沙棘,在 70%  $\theta_f$  下的总耗水量是 55%  $\theta_f$  下的 1.5 倍,是 40%  $\theta_f$  下地 2.1 倍。因此可以证明,土壤水分含量的高低决定了树种耗水量的大小,适宜水分下总耗水量明显高于严重亏缺下的总耗水量。

表 2 土壤水分对杨树和沙棘单株总耗水量、新生枝生物量及整体 WUE 的影响

Table 2 Water consumption, biomass and water use efficiency of poplar and seabuckthorn

树种 Species	耗水量 (kg) Water consumption			生物量 (g) Biomass			水分利用率 (g/kg) Water use efficiency		
	70% $\theta_f$	55% $\theta_f$	40% $\theta_f$	70% $\theta_f$	55% $\theta_f$	40% $\theta_f$	70% $\theta_f$	55% $\theta_f$	40% $\theta_f$
杨树 Poplar	26.34A	16.46B	9.88C	155.0A	100.2B	46.78C	5.88B	6.01A	4.73C
沙棘 Seabuck-thorn	6.68A	4.30B	3.11C	16.51A	11.55B	7.42C	2.47B	2.69A	2.39B

大写字母表示种内不同水分条件下差异显著性  $\alpha=0.01$  水平,相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异极显著。

The capital letters indicate significant difference for  $\alpha=0.01$  under different water soil stress in intraspecies.

从表 2 还可以看出:杨树和沙棘在 3 种土壤水分下,生物量的差异性均达到了极显著水平。对于杨树来说,在 70%  $\theta_f$  下的生物量是 55%  $\theta_f$  下的 1.5 倍,是 40%  $\theta_f$  下的 3.3 倍。对于沙棘来说,在 70%  $\theta_f$  下的生物量是 55%  $\theta_f$  下的 1.4 倍,是 40%  $\theta_f$  下的 2.2 倍。因此说明,土壤水分含量的高低决定了树种生物量的高低,在适宜水分下杨树和沙棘的干物质生产显著高于严重亏缺下的干物质生产。但是沙棘的干物质生产差距比杨树小。说

明沙棘比杨树更耐干旱。杨树和沙棘 WUE 的大小依次为 55%  $\theta_r$  > 70%  $\theta_r$  > 40%  $\theta_r$ 。在 3 种土壤水分下其 WUE 差异性除了沙棘的 70% 和 40% 差异不显著外均达到极显著水平。结果证明,在 3 种土壤水分下,中度亏缺时杨树和沙棘的水分利用率分别达到最高。

2.5.2 相同土壤水分下杨树和沙棘整体 WUE 的比较 从表 3 看出:相同土壤水分下杨树的 WUE 均比沙棘高。在 3 种土壤水分条件下,杨树的 WUE 分别是沙棘的 2.4 倍、2.3 倍、2 倍。其差异显著性达到极显著水平,这种差异可能是由于树种生物学特性决定,受总耗水量和新生枝生物量综合的影响。

表 3 相同土壤水分下杨树和沙棘整个生长季 WUE 差异显著表

Table 3 The change of water use efficiency of poplar seedlings and seabuckthorn seedlings under same soil water stress

	杨树 Poplar seedlings	沙棘 Seabuckthorn seedlings
70% $\theta_r$	5.88A	2.45B
55% $\theta_r$	6.11A	2.69B
40% $\theta_r$	4.76A	2.39B

大写字母表示种内不同水分条件下差异显著性  $\alpha=0.01$  水平,相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异极显著。

The capital letters indicate significant difference for  $\alpha=0.01$  under different water soil stress in intraspecies.

### 3 讨 论

土壤含水量与植物水势和含水率有较大的相关性<sup>[5,6]</sup>。本研究证明,在适宜水分下杨树和沙棘的水势没有大的差别,在中度和严重亏缺下沙棘水势的下降幅度则超过了杨树,沙棘的叶含水量在 3 种水分下均高于杨树,说明了沙棘和杨树相比具有低水势的抗旱能力,而含水量却并没有下降,使沙棘能够在干旱环境下维持生长。不同土壤水分对杨树和沙棘光合速率、蒸腾速率及瞬时 WUE 有不同的影响,土壤水分含量的高低对植物光合速率影响较大<sup>[7]</sup>。本实验表明,杨树和沙棘的光合速率均呈现为:70% 土壤持水量时的光合速率 > 55% 土壤持水量时的光合速率 > 40% 土壤持水量时的光合速率。沙棘和杨树相比,其光合速率能够长时间维持在较高的水平。但是,由于沙棘在 3 种土壤水分下蒸腾速率均比杨树高,所以,沙棘的 WUE 比杨树低。杨树无论在生长初期,还是生长中期其 WUE 均比沙棘高。在应用单叶水平光合速率与蒸腾速率计算 WUE 来评价不同树种水分利用率时要慎重。因不同土壤水分对杨树和沙棘的蒸腾速率日变化有不同的影响。不同土壤水分对植物的蒸腾有较大的影响<sup>[8,9]</sup>,在适宜水分和中度亏缺下,杨树和沙棘的蒸腾耗水量差异不大。但在严重干旱下,二者差异较明显,杨树的日蒸腾耗水量明显比沙棘高。不同土壤水分对杨树和沙棘的成活率有不同的影响,杨树和沙棘在 3 种土壤水分条件下,成活率高低不同。在适宜水分下,成活率均达到了 80% 以上。在中度亏缺下达到了 70% 以上。在严重干旱状况下,2 个树种的成活率降至 40% 以下。因此,用杨树和沙棘作黄土高原造林树种时,如果要想达到 50% 以上的成活率,就必须保证土壤含水量在 55%

田间持水量以上。土壤水分对植物生长有较大的影响<sup>[10~13]</sup>。本实验表明,不同土壤水分对枝条生长速率有不同的影响,在严重干旱下杨树和沙棘的生长均显著受到影响,但二者受影响的程度不同,沙棘受影响较杨树小。在中度亏缺下杨树和沙棘的生长则不受影响。但是,从整个生长趋势上看杨树仍适宜于适宜水分下生长。沙棘在适宜水分和中度亏缺下均可正常生长。种间比较发现,不同土壤水分条件下不仅新生枝生长速率受抑程度不同,而且改变了生长曲线动态过程。从这里我们可以认识到,黄土高原地区选择树种的依据应该使生长曲线的快速增长期处于7月份以后,以利用集中降雨期的土壤水分,才能保证良好的生长和生物量的积累。本研究证明,沙棘适宜于长年根系分布区土壤含水量平均处于中度亏缺 55%  $\theta$  以上的立地条件,而杨树适宜于大多数时间为适宜水分的立地条件。

本实验结果表明,土壤水分含量的高低决定了树种耗水量的大小和植物生物量的高低。适宜水分下总耗水量明显高于严重亏缺下的总耗水量。在适宜水分下杨树和沙棘的干物质生产显著高于严重亏缺下的干物质生产。但是沙棘的干物质生产量降低幅度比杨树小,说明沙棘比杨树更耐土壤干旱。土壤水分含量对杨树和沙棘 WUE 有不同的影响,大小依次为中度亏缺> 适宜水分> 严重亏缺。即在中度亏缺下,2个树种水分利用率最高。同时证明不同土壤水分对杨树和沙棘单株总耗水量、新生枝生物量及整体 WUE 有不同的影响。

## 参考文献:

- [1] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与可持续发展[M].北京:科学出版社,1998,37-70.
- [2] 侯庆春,韩蕊莲.黄土高原植被建设中的有关问题[J].水土保持通报,2000,20(2):53-56.
- [3] 高俊凤.植物生理学实验技术[M].西安:世界图书出版公司出版,2000:1-22.
- [4] 李代琼,丛心海,梁一民.黄土高原半干旱区沙棘林净初级生产量与耗水量研究[J].水土保持通报,1990,10(6):91-98.
- [5] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土区4个树种水势特征的研究[J].植物研究,2001,21(1):100-105.
- [6] 王孟本,李洪建,柴宝峰.柠条的水分生理生态学特性[J].植物生态学报,1996,20(6):494-501.
- [7] 吴林,李亚东,刘洪章.水分逆境对沙棘生长和叶片光合作用的影响[J].吉林农业大学学报,1996,18(4):45-49.
- [8] 葛滢,常杰,刘珂,等.杭州石茅苕蒸腾的生理生态学研究[J].植物生态学报,1999,23(4):320-326.
- [9] 王仁忠,高琼,李建东.松嫩草原两种碱茅群落水分生态的比较研究[J].生态学报,1998,18(1):107-112.
- [10] 王俊峰,梁宗锁编著.沙棘生物学特性与利用[M].西安:陕西科学技术出版社,1999:1-15.
- [11] 梁宗锁,李敏,王俊峰.沙棘抗旱造林现状与改进意见[J].沙棘,1998,11(3):8-13.
- [12] LIANG J,ZHANG J,WONG M H. Can stomatal closure caused by xylem ABA explain the inhibition of leaf photosynthesis under soil drying[J]. *Photosyn. Res.*, 1997, 51: 149-159.
- [13] ZHANG J, DAVIES W J. Changes in concentration of in xylem sap as a function of changing soil water status can account for changes in leaf conductance and growth[J]. *Plant Cell and Environ.*, 1990, 13: 277-285.