

# 黄土高原常用造林树种水分利用特征

杨建伟<sup>1,2</sup>, 梁宗锁<sup>1\*</sup>, 韩蕊莲<sup>1</sup>

(1 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 21 南阳师范学院生物系, 河南 南阳 473061)

**摘要:** 在适宜土壤水分、中度干旱和严重干旱 3 种土壤水分条件下研究了黄土高原干旱、半干旱地区常用的人工造林树种 84k 杨树 (*Populus spp.*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 和油松 (*Pinus tabulaeformis*) 苗木生长及水分利用特征。结果显示, 干旱胁迫使各树种成活率、生长速率、光合速率均显著下降; 84k 杨树和刺槐单叶水分利用率 (WUE) 在适宜水分下最高, 沙棘的在中度干旱下最高; 在中度干旱下, 4 个树种的总水分利用率最高, 而严重干旱下最低。无论干旱与否, 4 个树种中沙棘生长速率最高。在中度干旱条件下, 4 个树种均可良好生长, 而严重干旱下生长均受到显著抑制, 其中 84k 杨树受影响最大; 4 个树种中沙棘和油松的耐旱性较强, 同时油松在各种土壤水分下其生长速度和干物质生产均显著低于其它 3 个树种; 刺槐和 84k 杨树的耗水量、生物量及水分利用率在 3 种土壤水分下均显著高于沙棘和油松, 84k 杨树和刺槐均属于高耗水树种; 研究表明, 84k 杨树和刺槐不适宜大面积栽植在黄土高原缺水地区, 仅适合栽植在阴坡、沟道等适宜水分条件下。沙棘和油松则适宜栽植在土壤水分较低的地区, 如阳坡、塄顶等立地条件上。

**关键词:** 土壤干旱; 树种; 生长; 水分利用

文章编号: 1000-0933(2006)02-0558-08 中图分类号: Q948, S718.55 文献标识码: A

## Water use efficiency characteristics of four tree species under different soil water conditions in the Loess Plateau

YANG JianWei<sup>1,2</sup>, LIANG ZongSuo<sup>1\*</sup>, HAN RuiLian<sup>1</sup> (1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 21 Department of Biology, Nanyang Normal College, Nanyang 473061, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 558-565.

**Abstract:** Poplar (*Populus spp.*), seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides*), locust (*Robinia pseudoacacia*) and Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) are the important tree species in most areas of the Loess Plateau, which is subjected to water stress. To evaluate water use efficiency characteristics of the four tree species, the experiments were designed by monitoring changes of the physiological traits at three soil water conditions, such as favorable soil water condition, medium drought and serious drought, which hold about 70%~80%, 50%~60% and 30%~40% of field water capacity, respectively. The results showed the physiological processes that determine the yield potential, such as survival, growth and photosynthesis rates of the four tree species, were inhibited at drought stress. Among the four cultivars, both the poplar and the locust showed the highest single leaf water use efficiency at favorable soil water condition, while the seabuckthorn displayed this trait at medium drought condition. The highest total water use efficiencies occurred under medium drought, and the lowest under serious drought conditions in the four cultivars. Regardless of soil water conditions, seabuckthorn showed the highest growth rate among the four tree species. Under medium drought conditions, the four tree species grew well, while they were all inhibited under serious drought, especially for poplar. Both seabuckthorn and Chinese pine showed higher drought tolerance than the other two tree species. However, the growth

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90302005); 中国科学院知识创新基金资助项目(KZCX206)

收稿日期: 2004-06-27; 修订日期: 2005-06-09

作者简介: 杨建伟(1965~), 女, 河南西峡人, 硕士, 副教授, 主要从事植物抗旱及水分生理研究。

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liangzs@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90302005) and The CAS Knowledge Innovation Project (No. KZCX206)

Received date: 2004-06-27; Accepted date: 2005-06-09

Biography: YANG JianWei, Master, Associate professor, mainly engaged in plant ecophysiology and water physiology.

rate and the dry biomass accumulation of Chinese pine were remarkably lower than that of the other three tree plants. Since both poplar and locust are more water consumption species, the higher water consumption, biomass accumulation, water use efficiency were displayed in both species in comparison to seabuckthorn and Chinese pine under the three soil water conditions. Taken together, seabuckthorn and Chinese pine are recommended to planting in the water2shorting area of the Loess Plateau, due to the superior adaptation of both species to water deficient. In contrast, both poplar and locust are not suitable for extensively planting.

Key words: soil drought; species; growth; water use efficiency

在黄土高原的干旱、半干旱地区,由于干旱缺水,各种植物只能依靠当年的降水和灌溉维持生长,在没有灌溉条件的地方,各树种的生长受到了严重的抑制。在黄土高原现有的人工林中,有相当大面积的林分当初是以绿化为目的营造的,较少顾及生产力问题和不同区域内水分生态条件,导致目前在黄土高原形成的大面积低产、结构脆弱的/小老树0和大片/土壤干层0形成<sup>[1~9]</sup>。加强对该区域植被特征的研究,科学的评价黄土高原的植被与水分问题,从真正意义上做到适地适树显得尤为重要。近年来,关于黄土高原树种的研究有一些报道<sup>[7~12]</sup>,但多为对单个树种在某个生长时期的定性和半定性研究,而对于黄土高原当前常用的造林树种缺乏系统的比较研究。目前,还不能全面的了解黄土高原常用造林树种在不同土壤水分下的生长及水分利用特征和抗旱性,所以在黄土高原不同立地条件下究竟该配置哪些树种才是最合理的,还没有一个明确的定论。

为此,选择了黄土高原已经大面积造林的沙棘、刺槐、油松和 84k 杨树为试验材料,在人工控制土壤水分条件下,模拟这些树种生存的土壤水分条件,探讨在不同土壤水分条件下这些树种的生长以及水分利用特征,以期为黄土高原人工造林树种的选择提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与土壤水分胁迫处理

本试验选择黄土高原常见的 4 个造林树种,分别是刺槐 (*Robinia pseudoacacia* ),沙棘 (*Hippophae rhamnoides*), 84k 杨树 (*Populus spp.* )、和油松 (*Pinus tabulaeformis*),所有苗木均为 1 年生实生苗,由中国科学院安塞生态试验站提供。试验用土采用安塞生态站的黄绵土,田间持水量为 211.5%。设置 3 种土壤含水量水平:适宜土壤水分、中度干旱、严重干旱,即分别是田间持水量(H)的 70%~ 80%、50%~ 60%、30%~ 40%(均为重量含水率,本文图表中分别以 70% H、50% H、30% H 表示),各处理分别设置 15~ 20 盆重复,每盆栽植 3~ 4 株,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 30 cm、高 50 cm 的生长钵内。生长钵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,晴天露天生长。从移栽次日开始,每天定时用电子秤称盆重用以控制土壤含水量,并加水补充其蒸腾损失。为排除土壤蒸发用塑料薄膜覆盖表面裸土。整个试验持续至 10 月中旬结束。

### 1.2 测定项目及方法

(1) 新生枝条生长速率测定 从移栽苗木的次日起,每隔 15d 用毫米刻度尺定枝测量新生枝条长度的变化,计算枝条的生长速率。

(2) 光合速率( $P_n$ )和蒸腾速率( $T_r$ )的测定 从各树种叶片完全展开起,在每月选择晴朗的天气于早上 9:00~ 10:00 用 Licor26400 型便携式光合仪测定,每处理选 5~ 6 片成龄叶片,取其平均值。

(3) 水分利用率(WUE)的测定 单叶水分利用率= 光合速率( $P_n$ )/蒸腾速率( $T_r$ );总水分利用率= 生长季总生物量(g)/生长季总耗水量(kg)。

(4) 生长季总生物量的测定 生长季总生物量为试验期间各树种苗木生物量的增量,在试验结束时(10月中旬)将各苗木连根取出烘干称重后的总干重加上落叶干重之和再减去栽前干重。栽前干重的测定:选取与将要移栽的苗木大小一致的苗木 10 株,烘干称重,计算出各苗木单株栽前干重。

(5) 耗水量及成活率的测定 每天定时称盆重,在排除土壤蒸发和苗重的增量后,以盆重的减少量为树种的当日耗水量,并加水补充至设定土壤含水量;总耗水量为整个试验期内每天加水量之和;成活率的测定:试

验结束时统计各树种在各种土壤水分下的成活数(含试验中拔去的活植株)与总植入植株数的比值。

## 2 结果分析

### 2.1 不同土壤水分条件下4个树种的枝条生长总量比较

从表1可以看出:84k杨树、刺槐、沙棘、油松在适宜水分下其枝条总生长总量分别是中度干旱的1103、1123、1145、1124倍,是严重干旱下3185、1145、2144、1138倍。方差分析显示4个树种在3中土壤水分下的差异性多达极显著水平(表1中纵向比较)。可以看出,各树种在适宜水分下枝条的生长总量最高,在严重干旱下枝条的生长总量显著降低,但在严重干旱下84k杨树枝条生长受影响最大。对4个树种在相同土壤水分下进行比较(表1中横向比较),沙棘在3种土壤水分条件下枝条的生长总量均为最高,油松枝条的生长总量最低。

表1 3种土壤水分条件下4个树种苗木生长季枝条生长总量比较

Table 1 Seasonal branch growth of four species under different soil water conditions

土壤含水量(%H) Soil water conditions	各树种生长季枝条生长总量 Branch total growth length(cm)			
	84k 杨树 <i>Populus</i> spp.	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>
70	211851Aa? 01 234	231 071Aa? 01354	461950Aa? 01 317	71471Aa? 01251
50	211150Ab? 01 126	181 752Bb? 01186	321421Bb? 01 254	61043Bb? 01214
30	51 670Bc? 01 187	151 901Cc? 01 213	191212Cc? 01236	51402Cc? 01123

表中英文字母表示同列方差分析,小写字母  $A=0.05$  水平,大写字母  $A=0.01$  水平(SSR检验);以下表中相同 English alphabets mean the analysis of variances of same row data in table, small alphabets mean  $A=0.05$ , capital alphabet mean  $A=0.01$  (SSR test), the same below

### 2.1.2 生长季4个树种在3种土壤水分条件下的生长动态变化

由图1~图3可以看出,在3种土壤水分下,4个树种在各个月份枝条的生长速率有差异,在适宜水分和中度干旱下(图1、图2),84k杨树、刺槐和油松3个树种枝条的快速生长主要集中在6月份以前(含6月份),3个树种于6月份以前(含6月份)的枝条生长量均达到总生长量的90%以上,7月以后(含7月份)生长下降,甚至几乎停止生长。其中在5月(含5月份)以前,刺槐和沙棘枝条的生长速率相差不大,84k杨树生长较前2者慢,油松枝条的生长速率最慢。7月(含7月份)以后,84k杨树、刺槐和油松的生长基本停止,但4个树种中惟有沙棘枝条仍然保持较高的生长速率,在6月份以前(含6月份)沙棘枝条的生长量占整个60%~70%,30%~40%的枝条生长量是在7~9月份完成的。在适宜水分下(图1)、中度干旱下(图2)和严重干旱下(图3)沙棘枝条的生长高峰期分别持续到9月份、8月份、6月份。严重干旱下,84k杨树的生长速率最低(甚至低于油松),其整个生长季枝条的生长极为缓慢且无生长高峰期。在3种水分条件下,沙棘的生长速率在4个树种中最高。值得注意的是,在4个树种中,虽然沙棘枝条生长速度最快,但可以看出从适宜土壤水分到严重土壤干旱过渡中,随着土壤含水量的下降,沙棘的生长高峰期时间明显缩短。

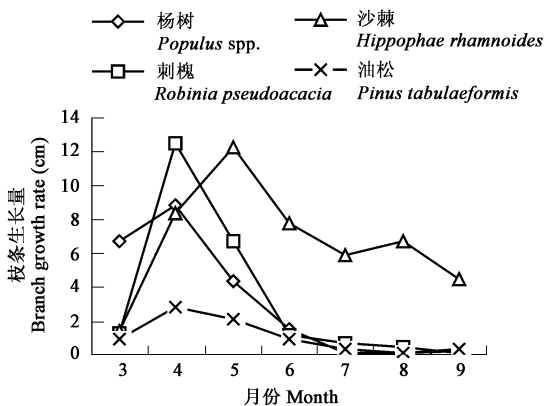


图1 适宜水分下4个树种生长季逐月生长量

Fig. 1 Branch growth rate of 4 species seedlings under favorable soil water condition

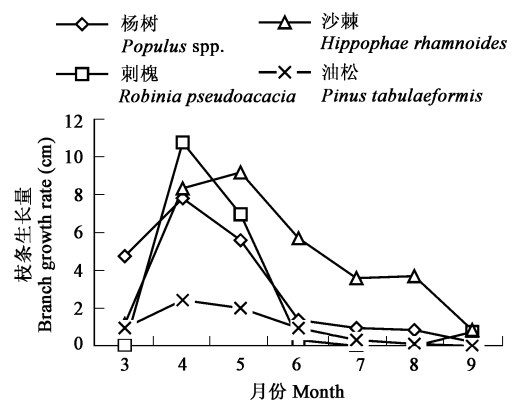


图2 中度干旱下4个树种生长季逐月生长量

Fig. 2 Branch growth rate of 4 species seedlings under medium drought condition

结合表3可以更准确的说明各树种的生产力(总生物量)高低,4个树种在整个生长季中最终的总生物量均表现为适宜水分 > 中度干旱 > 严重干旱。与适宜水分条件下相比,在中度干旱下各树种的总生物量均有所下降。84k 杨树、刺槐、沙棘和油松总生物量分别下降了24%、2614%、2517%和2715%。在严重干旱下,4个树种的总生物量与中度干旱下相比较下降显著,其中84k 杨树总生物量下降最多,达7116%,其次为刺槐和油松,其总生物量分别下降了6618%和6412%,沙棘总生物量下降最少为5616%,上述结果表明,土壤干旱明显影响各树种的生长及生物量的积累,但在中度干旱以上土壤分条件下4个树种均可良好生长,在严重干旱下

4个树种的生长均受到显著抑制,但84k 杨树受影响最大。沙棘在严重干旱下的干物质生产与适宜水分下的差距比其它3个树种要小的多,说明沙棘比其它3个树种更耐干旱环境下生存,84k 杨树则相反。

### 2.1.3 土壤干旱对84k 杨树、刺槐和沙棘的光合速率和单叶水分利用率的影响

树种的生长及干物质积累的差异与光合速率密切相关,在生长季各月(上、中、下旬)的晴朗天气,利用Licor26400型便携式光合仪测定各树种的光合速率和蒸腾速率,(油松用Licor26400便携式光合仪因为缺少专用叶室无法准确测定),并依此计算单叶水分利用率(WUE)。以下以5月份(生长初期)、7月份(生长中期)和9月份(生长末期)为例,将各月内3个测定日(上、中、下旬)的平均测定值列表见表2。从测定结果可以看出,随着土壤含水量的降低,84k 杨树、刺槐和沙棘的光合速率均明显下降。在生长初期,3个树种的光合速率差异不大,而在生长中期和末期,沙棘的光合速率则显著高于刺槐和84k 杨树的光合速率。另外,对各月份测定结果上来看,沙棘的光合速率能够长时间(从4~8月份共5个月)维持在较高的水平,而84k 杨树和刺槐的光合速率仅在4~6月份3个月维持在较高的水平。结果可以说明,沙棘的生长速率不但高于其他树种,而且能够长时间维持较高生长速率的原因。84k 杨树、刺槐和沙棘3个树种的单叶水分利用率在生长中期均为最高,生长末期均为最低。

试验中同时测定的蒸腾速率与光合速率变化规律不同。在整个生长季中,不同月份以及在同一月份的3种处理之间所测定的蒸腾速率变化规律不明显。在3种土壤水分下,沙棘的蒸腾速率均比84k 杨树和刺槐高,因此沙棘单叶水分利用率均低于84k 杨树和刺槐。在生长初期和末期,84k 杨树单

叶水分利用率均为最高,其顺序是84k 杨树> 刺槐> 沙棘。在生长中期刺槐单叶水分利用率最高,沙棘单叶水分利用率的在各个月份均为最低。3个树种在生长中期的单叶水分利用率略高于生长初期和末期的单叶水分利用率。84k 杨树和刺槐这2个树种在3种土壤水分下各月份的单叶水分利用率随着土壤水分含量的下降而下降,二者均表现为适宜水分 > 中度干旱 > 严重干旱。沙棘各月份的单叶水分利用率与84k 杨树和刺槐不同,均表现为中度干旱 > 适宜水分 > 严重干旱。表明不同的植物在单叶水平瞬间所测定的水分利用率,在不同的干旱胁迫下其结果也可能不同。

### 2.1.4 土壤干旱对各树种成活、根系生长、总生物量累积及总水分利用效率的影响

4个树种在不同的土壤水分条件下其成活率不同(表3)。适宜水分下,4个树种的成活率均达到了80%以上。中度干旱下达到了60%以上的成活率。严重干旱下,除了油松的成活率达到58%外,其余的3个树种的成活率显著下降至4219%以下。可以看出各树种的成活率随着土壤含水量的下降而降低。整个试验中看出,尽管沙棘和油松的幼苗成活率在某些情况下略低于84k 杨树和刺槐(可能与1年生的沙棘和油松的幼苗过小有关,2者单株鲜重均不足2g),但沙棘和油松一旦成活后,二者的生长情况均表现出比84k 杨树和刺槐更适宜于干旱环境。

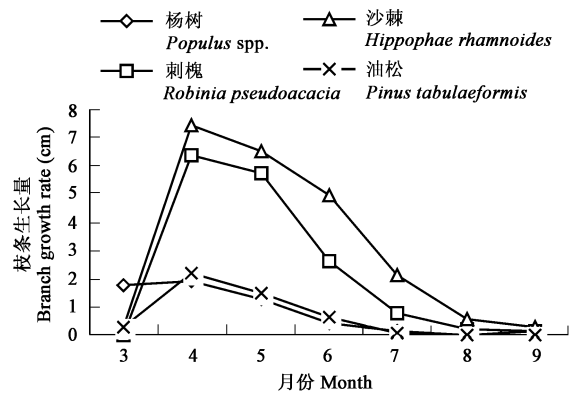


图3 严重干旱下4个树种生长季逐月生长量

Fig.3 Branch growth rate of 4 species seedlings under serious drought

表 2 不同土壤水分条件下 84k 杨树、刺槐和沙棘的光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $Tr$ ) 及单叶 WUE 的比较  
Table 2 Photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency of poplar, locust and seabuckthorn's leaf under different soil water contents in May, July and September

树种 Species	土壤处理 Soil treat (% $\theta_r$ )	生长初期(5月份) At early stage (May)			生长中期(7月份) Middle stage (July)			生长末期(9月份) Later stage (September)		
		$P_n$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$Tr$ ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	WUE ( $P_n/Tr$ )	$P_n$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$Tr$ ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	WUE ( $P_n/Tr$ )	$P_n$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$Tr$ ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	WUE ( $P_n/Tr$ )
84k 杨树 <i>Populus</i> spp.	70	10.781Aa ± 0.246	2.550Ab ± 0.420	4.231Aa ± 0.401	12.750Aa ± 0.476	2.520Aa ± 0.178	5.050Aa ± 0.311	5.130Aa ± 0.374	1.852Aa ± 0.186	2.710Aa ± 0.317
	50	10.130Ab ± 0.127	2.860Aa ± 0.186	3.540Ab ± 0.112	11.210Ab ± 0.299	2.340Bb ± 0.264	4.780Ab ± 0.183	3.870Bb ± 0.287	1.482Ab ± 0.127	2.610Ab ± 0.337
	30	9.510Bc ± 0.663	2.911Aa ± 0.317	3.261Bb ± 0.212	8.471Bc ± 0.183	2.310Bb ± 0.186	3.670Bc ± 0.259	2.550Cc ± 0.309	1.350Ab ± 0.311	1.890Bc ± 0.163
刺槐 <i>Robinia</i> <i>pseudacacia</i>	70	8.580Aa ± 0.435	2.962Aa ± 0.442	2.901Aa ± 0.377	17.750Aa ± 0.132	2.390Ab ± 0.164	7.421Aa ± 0.339	5.210Aa ± 0.294	2.250Aa ± 0.229	2.311Aa ± 0.294
	50	7.370Ab ± 0.231	2.660Aa ± 0.198	2.772Bb ± 0.108	14.220Bb ± 0.221	2.420Aa ± 0.431	5.860Bb ± 0.380	4.720Bb ± 0.320	2.141Aa ± 0.294	2.20Aa ± 0.325
	30	5.680Bc ± 0.187	2.120Ab ± 0.189	2.670Bc ± 0.260	12.030Bc ± 0.099	2.520Aa ± 0.294	4.810Cc ± 0.407	3.751Cc ± 0.331	2.020Aa ± 0.294	1.850Bb ± 0.187
沙棘 <i>Hippophae</i> <i>rhamnoides</i>	70	9.820 Aa ± 0.488	6.126Aa ± 0.566	1.610Aa ± 0.248	25.921Aa ± 0.351	4.580Ab ± 0.229	3.91Bb ± 0.258	7.640Aa ± 0.330	5.662Aa ± 0.250	1.350Aa ± 0.253
	50	8.490Ab ± 0.453	5.132Bb ± 0.206	1.650Aa ± 0.278	22.680Bb ± 0.418	4.850Aa ± 0.250	4.670Aa ± 0.437	6.420Bb ± 0.104	4.410Bb ± 0.588	1.460Aa ± 0.125
	30	6.870Bc ± 0.377	4.921Bc ± 0.132	1.390Ab ± 0.082	11.580Cc ± 0.368	3.220Bc ± 0.408	3.590Bc ± 0.216	3.150Cc ± 0.437	2.740Cc ± 0.125	1.150Ab ± 0.184

表 3 不同土壤水分条件下 4 个树种的成活率、根系生长、总生物量、总耗水量及总水分利用率的比较  
Table 3 Comparison of survival rate, root dry weight, water consumption, biomass and water use efficiency of 4 species seedlings under different soil water conditions in growth season

树种 Species	土壤处理 Soil treat (% $\theta_r$ )	成活率 Survival rate(%)	根干重 Root dry weight (g)			地上干重 Branch dryweight(g)			总生物量 Total biomass (g)			总耗水量 Total water consumption (kg)			总水分利用效率 Total water use efficiency (g/kg)		
			70	50	30	70	50	30	70	50	30	70	50	30	70	50	30
84k 杨树 <i>Populus</i> spp.	70	100.00	62.250Aa ± 0.350	42.741Bb ± 0.366	103.601Aa ± 0.506	69.050Bb ± 0.156	100.220Bb ± 0.394	155.01Aa ± 0.450	26.340Aa ± 0.401	16.460Bb ± 0.339	100.220Bb ± 0.394	155.01Aa ± 0.450	26.340Aa ± 0.401	5.882Bb ± 0.270	6.110Aa ± 0.193	4.760Cc ± 0.221	
	50	91.7	42.741Bb ± 0.366	24.750Cc ± 0.418	32.720Cc ± 0.553	46.781Cc ± 0.512	9.880Cc ± 0.491	46.781Cc ± 0.512	9.880Cc ± 0.491	9.880Cc ± 0.491	153.110Aa ± 0.3594	24.531Aa ± 0.386	24.531Aa ± 0.386	6.240Bb ± 0.403	6.780Aa ± 0.494	5.660Cc ± 0.314	
	30	42.9	24.750Cc ± 0.418	71.210Aa ± 0.198	55.680Bb ± 0.468	64.720Bb ± 0.365	27.730Cc ± 0.285	47.230Cc ± 0.340	8.360Cc ± 0.257	8.360Cc ± 0.257	16.510Aa ± 0.359	6.680Aa ± 0.343	16.510Aa ± 0.359	6.680Aa ± 0.343	2.450Bb ± 0.198	2.690Aa ± 0.411	2.390Bb ± 0.074
刺槐 <i>Robinia</i> <i>pseudacacia</i>	70	100	71.210Aa ± 0.198	7.920Bb ± 0.358	8.912Bb ± 0.429	5.020Cc ± 0.442	1.061Aa ± 0.139	11.550Bb ± 0.486	4.301Bb ± 0.294	4.301Bb ± 0.294	7.420Cc ± 0.417	3.110Cc ± 0.090	3.110Cc ± 0.090	2.372Bb ± 0.261	2.620Aa ± 0.4311	1.901Cc ± 0.091	
	50	76	7.920Bb ± 0.358	7.431Cc ± 0.546	1.150Aa ± 0.294	0.951Bb ± 0.129	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069	0.796Bb ± 0.069
	30	30.80	7.431Cc ± 0.546	0.670 Aa ± 0.083	0.701Cc ± 0.182	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029
沙棘 <i>Hippophae</i> <i>rhamnoides</i>	70	80	0.670 Aa ± 0.083	0.630Bb ± 0.018	0.701Cc ± 0.182	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029
	50	60.800	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018
	30	58.000	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029
油松 <i>Pinus</i> <i>tabulaeformis</i>	70	80	0.670 Aa ± 0.083	0.630Bb ± 0.018	0.701Cc ± 0.182	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029
	50	60.800	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018	0.630Bb ± 0.018
	30	58.000	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.182	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029	0.451Cc ± 0.029

根系的生长是反映植物忍耐干旱胁迫的一个很重要的指标之一,表3显示,随着土壤含水量的下降,4个树种在整个生长季中根干重、茎叶干重下降显著。4个树种的根干重和茎叶干重均表现为适宜土壤水分最高,严重干旱下最低,但各树种的根冠比却随土壤干旱的加剧呈上升趋势,即在严重干旱下各树种的根冠比均为最高,适宜水分下最低。方差分析显示,4个树种每3种处理之间的差异性均达到极显著水平。上述结果表明,在干旱胁迫下根的生长和茎叶生长均受到明显抑制,但茎叶生长受到的影响比根大,其中在严重干旱下各树种茎叶生长受影响最显著。4个树种中,沙棘的根系较其它树种根系发达而且生有大量的根瘤菌。沙棘的根冠比在严重干旱下明显高于其它3个树种,表明沙棘在贫瘠和缺水条件下有比其它树种更易生存的生物学优势。

对于同一树种在不同土壤水分条件下比较可以看出,与适宜土壤水分下相比,84k杨树的总耗水量分别是中度干旱和严重土壤干旱下的116倍和2167倍,刺槐的总耗水量是中度干旱和严重土壤干旱下的1148倍和2193倍,沙棘的总耗水量是中度干旱和严重土壤干旱下的1155倍和2115倍,油松的总耗水量是中度干旱和严重土壤干旱下的1158倍和2146倍,很显然在适宜水分下的各个树种的总耗水量明显高于中度干旱和严重干旱下的总耗水量;从生物量生产角度上看,4个树种在适宜水分下苗木的生物量最大,而土壤干旱使各树种干物质累积明显减少。用生长季总生物量与总耗水量计算总WUE,4个树种均表现为在中度干旱下总WUE最高,严重干旱下总WUE最低。方差分析表明在3种土壤水分下4个树种的总耗水量、总生长量以及总水分利用效率差异性均达到了极显著水平(表3中从上边的70% H至下边的40% H)。

在同一土壤水分下对4个不同树种进行比较,84k杨树和刺槐2个树种的总耗水量在适宜土壤水分、中度干旱、严重干旱下分别是沙棘和油松的316倍和55倍、318倍和30倍、317倍和46倍。84k杨树和刺槐的总生物量在上述3种土壤水分下分别是沙棘和油松的914和146倍、817倍和126倍、617倍和134倍以上;84k杨树和刺槐的总水分利用率同样显著高于沙棘和油松,在3种土壤水分下其总水分利用率分别是沙棘和油松的214倍和215倍、213和2131倍、210倍和211倍。表明84k杨树和刺槐属于高耗水、高生物量树种,沙棘和油松属于低耗水、低生物量树种。

### 3 结论与讨论

水分是植物生存的最基本因子,在黄土高原地区更具有特殊的意义,由于缺水使黄土高原普遍存在造林成活率低、保存率低、林木生长量低的“三低”现象<sup>[2]</sup>。本试验结果显示,土壤干旱使4个树种成活率显著降低,尤其在严重干旱下各树种的成活率降至42.1%以下。由此表明在黄土高原缺水地区造林时如果要想提高成活率达到一半以上,必须保证土壤含水量在55%田间持水量以上。

阮成江等研究表明,土壤缺水明显影响植物的生长及生物量积累<sup>[7,13]</sup>。本研究也表明,84k杨树、刺槐和油松3个树种的枝条快速生长期均集中在3~6月份(含6月份),7月份(含7月份)以后枝条生长十分缓慢,干物质积累逐渐减少。同一土壤水分下比较,沙棘在4个树种中的生长速率均为最高,其生长高峰和干物质快速积累持续时间均比其它树组长。在严重干旱下,尽管4个树种的生长及干物质积累均受到显著抑制,但受抑制的程度不同,84k杨树受影响程度最大,沙棘受影响程度较小。油松是4个树种中生长速度最慢、干物质积累最少的树种,即使处于适宜土壤水分下,其干物质生产仍比84k杨树和刺槐低146倍以上,比沙棘低15倍以上。表明油松尽管比较耐旱,但其生长极其缓慢,郁闭成林速度缓慢,故而认为油松不可作为黄土高原造林的先锋树种。

接玉玲等研究证明,土壤干旱会导致植物光合速率、蒸腾速率均下降,由于蒸腾速率下降幅度大,光合速率下降速率小,因此使单叶水平上的水分利用率升高<sup>[14,15]</sup>。试验结果显示,土壤中度干旱使沙棘的单叶水分利用率升高,但对84k杨树和刺槐与上述结果不同。84k杨树和刺槐单叶水分利用率随着土壤干旱的加剧而下降。说明在单叶水平瞬间所测定水分利用率,对于不同的植物其结果可能有差异。这种瞬间测定的单叶水分利用率与最终利用总生物量/总耗水量计算的水分利用率并不一致(而后的计算更为准确可靠)。因此建议对于瞬间在单叶水平所测定的结果,作为水分利用率指标还须慎重。4个树种最终总水分利用效率均是在

中度干旱下最高, 严重干旱下各树种生长严重受抑, 干物质累积少因此水分利用效率最低。从本试验结果获得启示, 在我国其它缺水地区可通过控制土壤含水量在中度干旱范围内, 能将当地有限的水资源做最优化配置。

4个树种的根冠比均随土壤干旱的加剧而上升, 其中沙棘的根冠比在3种土壤水分下均显著高于其他3个树种, 试验中发现, 尽管1年生沙棘苗木在3种土壤水分下成活率均比其它3个树种低, 但沙棘幼苗一旦成活后, 由于其发达的根系和很强的固氮能力使其长势远高于其它树种, 郁闭成林速度迅速。表明沙棘可作为黄土高原缺水地区人工造林的先锋树种。

韩蕊莲等曾证明6个树种(柠条 *Caragana microphylla*, 沙棘, 刺槐, 杨树, 油松, 侧柏 *Biota orientalis*)的耗水量在适宜土壤水分下(70%土壤持水量)各不相同, 并且提出刺槐和杨树属于高耗水树种, 与低耗水树种(沙棘、侧柏、油松)之间差异达4~5倍<sup>[16]</sup>。本试验结果证明, 刺槐和84k杨树均属于高生物量和高耗水量树种, 二者的高耗水性决定这2个树种对环境水分吸收快, 能导致土壤有效水分被迅速消耗, 使根际水快速下降, 造成黄土高原大面积刺槐林、杨树林下/土壤干层0的形成。再加上杨树和刺槐的快速生长和干物质快速积累主要集中在6月份以前(含6月份), 在黄土高原有相当多的人工林土壤含水量处于田间持水量的30%以下, 而大部分的降雨又主要集中在7~9月份, 3~6月份正是黄土高原雨季来临前土壤水分最为亏缺的时期, 因此土壤中的含水量不能满足杨树和刺槐这些高耗水性树种快速生长和干物质快速积累所需要的水分条件, 这也许是造成黄土高原目前杨树林、刺槐林生长发育不良, 而形成大面积/小老树0的主要成因。

因此建议, 在黄土高原缺水地区人工造林时, 要特别注意当地土壤水分是否能达到不同树种的生长对水分的要求, 尽可能使有限的水资源得到充分合理的利用, 提高水分利用效率。尤其是对于杨树和刺槐等一些高耗水量树种在黄土高原缺水地区不适宜大面积造林, 应尽可能建立在阴坡、沟道等土壤水分含量较高的条件下。对于耗水量较少、抗旱性较强的沙棘和油松既可营造在土壤水分含量较高地区, 如阴坡、半阳坡地带, 也可营造在土壤水分含量较低的立地条件下, 如阳坡、峁顶等地带, 但在幼苗期应注意通过截杆埋苗等措施提高其成活率。

#### References:

- [ 1 ] Wu Q X, Yang W Z. Plantation construction and sustainable development about Loess Plateau. Beijing: Scientific Publishers Limited, 1998. 37~ 70.
- [ 2 ] Hou Q C, Han R L. Problems on vegetation construction in loess plateau region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(2): 53~ 56.
- [ 3 ] Wei T X, Zhu J Z, Zhang X P, et al. The regularity of water consumption of black locust and chinese pine on loess slope in southwestem of Shanxi Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20 (4): 36~ 40.
- [ 4 ] Wei T X, Yu X X, Zhu J Z, Wu B. Relationship between water supply and consumption of main planting tree species of protection forests in loess area of western Shanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 36~ 40.
- [ 5 ] Sun C Z, Huang B L, Liu S M, Chen H B. Soil moisture dynamics in forest land and wasteland of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 523~ 526.
- [ 6 ] Sun C Z, Shen G F. On the productivity of China's plantation. *World Forestry Research*, 2001, 14 (1): 76~ 80.
- [ 7 ] Ruan C J, Li D Q. Study on the transpiration of artificial *Hippophae rhamnoides* L. forest in the loess hilly region. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2142~ 2146.
- [ 8 ] Zeng F J, Song X. A review on the ecophysiological study of poplars in oasis and its prospect. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(5): 780~ 784.
- [ 9 ] Tian J H, Wang B T. Study on relationship between water and growth of locust forest in loess semidrought area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5): 61~ 63, 121.
- [ 10 ] Hu X S, Liu J W, Wang S J. Comparison of the net photosynthesis rate of four poplar clones at different temperature and humidity regimes. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33(2): 107~ 115.
- [ 11 ] Liu Z W, Li Y S. Nutrient cycling and balance analysis of blacklocust forest ecosystem in gullied Loess Plateau area. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 630~ 634.
- [ 12 ] Li H J, Chai B F, Wang M B. Study on the water physicoecological characteristics of *Populus bijingensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 417~

422.

- [ 13 ] Gao Y B, Liu F, Ren A Z, et al. Herbage production and water use of perennial ryegrass population under different types and levels of drought stress. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(6): 510~ 520.
- [ 14 ] Jie Y L, Yang H G, Cui M G, et al. Relationship between soil water content and water use efficiency of apple leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(3): 387~ 390.
- [ 15 ] Heitholt J J. Water use efficiency and dry matter distribution in nitrogen and water stressed winter wheat. *Agronomy Journal*, 1989, 81: 464~ 469.
- [ 16 ] Han R L, Liang Z S, Hou Q C, et al. Water consumption properties of adaptable nursery stocks on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, 5(2): 210~ 213.

#### 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. 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. *水土保持通报*, 2000, 20(2): 53~ 56.
- [ 3 ] 魏天兴, 朱金兆, 张学培, 等. 晋西南黄土区刺槐油松林耗水规律的研究. *北京林业大学学报*, 1998, 20(4): 36~ 40.
- [ 4 ] 魏天兴, 余新晓, 朱金兆, 等. 黄土区防护林主要造林树种水分供需关系研究. *应用生态学报*, 2001, 12(2): 185~ 189.
- [ 5 ] 孙长忠, 黄宝龙, 刘淑明, 等. 黄土高原荒坡与林地土壤水分变化规律研究. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 523~ 526.
- [ 6 ] 孙长忠, 沈国舫. 对我国人工林生产力评价与提高问题的几点认识. *世界林业研究*, 2001, 14(1): 76~ 80.
- [ 7 ] 阮成江, 李代琼. 黄土丘陵区人工沙棘蒸腾作用研究. *生态学报*, 2001, 21(12): 2142~ 2146.
- [ 8 ] 曾凡江, 宋轩. 新疆绿洲杨树的生理生态学研究展望. *应用生态学报*, 2000, 11(5): 780~ 784.
- [ 9 ] 田晶会, 王百田. 黄土半干旱区刺槐林水分与生长关系研究. *水土保持学报*, 2002, 16(5): 61~ 63, 121.
- [ 10 ] 胡新生, 刘建伟, 王世绩. 四个杨树无性系在不同温度和相对湿度条件下净光合速率的比较研究. *林业科学*, 1997, 33(2): 107~ 115.
- [ 11 ] 刘增文, 李雅素. 黄土残塬沟壑区刺槐人工林生态系统的养分循环通量与平衡分析. *生态学报*, 1999, 19(5): 630~ 634.
- [ 12 ] 李洪建, 柴宝峰, 王孟本. 北京杨水分生理生态特性研究. *生态学报*, 2000, 20(3): 417~ 422.
- [ 13 ] 高玉葆, 刘峰, 任安芝, 等. 不同类型和强度的干旱胁迫对黑麦草实验种群物质生产与水分利用的影响. *植物生态学报*, 1999, 23(6): 510~ 520.
- [ 14 ] 接玉玲, 杨洪强, 催明刚, 等. 土壤含水量与苹果叶片水分利用率的关系. *应用生态学报*, 2001, 12(3): 387~ 390.
- [ 16 ] 韩蕊莲, 梁宗锁, 侯庆春, 等. 黄土高原适生树种苗木的耗水特性. *应用生态学报*, 1994, 5(2): 210~ 213.