土壤干旱对黄土高原4个乡土树种生长及干物质分配的影响

王海珍[1,2],梁宗锁[1,①],韩蕊莲[1],韩 路[2]
(1. 中国科学院水利部水土保持研究所,西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨陵 712100;
2. 塔里木大学植物科技学院,新疆 阿拉尔 843300)

摘要: 研究了不同土壤水分条件对黄土高原4个乡土树种幼苗生长及干物质分配的影响。结果表明,中度干旱(50%~55% θ_f)下虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decne.)和白刺花(*Sophora viciifolin* Hance)的生物量比适宜水分下(70%~75% θ_f)增加20.23%和3.93%,而大叶细裂槭(*Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu)和辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)生物量分别降低13.59%和35.25%;重度干旱(40%~45% θ_f)对幼苗生长均有明显抑制作用。白刺花地上部与地下部的生长受水分胁迫影响较小,较其他树种具有更强的耐旱性;干旱对辽东栎地上部生长的影响较地下部大,重度干旱下其生长明显受抑制。随干旱程度加剧幼苗的根冠比增大,在重度干旱下大叶细裂槭根冠比达2以上。虎榛子整体生长速度较慢,对干旱的适应可能更多表现在生理上的耐旱。

关键词: 乡土树种; 土壤干旱; 生长; 干物质; 分配
中图分类号: Q945.17 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-0978(2005)01-0010-06

Effect of soil drought on seedling growth and dry matter allocation of four native tree species on Loess Plateau WANG Hai-zhen[1,2], LIANG Zong-suo[1,①], HAN Rui-lian[1], HAN Lu[2] (1. Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, College of Life Science of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. Institute of Plant Science and Technology of Tarim University, Alar 843300, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2005, **14**(1): 10-15

Abstract: Effects of different soil water contents on growth and dry matter allocation of four native tree species seedling on Loess Plateau were studied. The results showed that seedlings of *Ostryopsis davidiana* Decne. and *Sophora viciifolin* Hance had higher biomass under medium drought (50% -55% θ_f) than that of under normal water (70% -75% θ_f), increasing 20.23% and 3.93% respectively, *Quercus liaotungensis* Koidz. and *Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu were on the contrary and their biomass decreased 13.59% and 35.25% respectively. The growth of four tree species seedlings had been inhibited significantly under severe drought (40% -45% θ_f). The growth of above- and underground parts of *S. viciifolin* was decreased slightly, it had the strongest drought resistance than other tree species. The growth of above-ground part of *Q. liaotungensis* was decreased higher than that of underground part under soil drought and its growth was significantly decreased under severe drought. Root-shoot ratio of seedling had increased with descending soil water content and root-shoot ratio of *A. stenolobum* var. *megalophyllum* added up to 2 under severe drought. The growth speed of *O. davidiana* is slow and it probablely has more physiological drought resistance to adapt stress condition.

Key words: native tree species; soil drought; growth; dry matter; allocation

林业生产上主要是根据立地条件制定相应的技术措施。不同的立地条件主要是由土壤条件及气候条件决定的,它们直接影响树木的分布、生长发育、形态结构等。黄土高原地区地形地貌复杂,造成不同立地的土壤水分条件千差万别,使得各地造林成活率及保存率有明显差异,土壤水分已成为黄土高原造林和植被恢复的主要限制因子。在黄土高原进

收稿日期: 2004-05-08
基金项目: 中国科学院西部之光人才基金项目和知识创新基金资助项目(KZCX01-6)
作者简介: 王海珍(1971-),女,甘肃成县人,硕士,讲师,主要从事植物抗旱及水分生理的研究。
① 通讯联系人 E-mail: Liangzs819@163.net

行的植被重建恢复过程成效不大，主要问题是树种配置不合理而导致造林成效不高，甚至形成大片的“小老树”林和土壤干层[1~3]，提高黄土高原地区造林成活率势在必行。乡土树种是根据树种进化体系和自然演替而产生的树种，对当地的土壤、水分、气候等因子最具适应性，在植被建设中具有不可替代的作用[2~5]。为此对乡土树种的生长特性、干物质生产能力以及它们对干旱的适应性做系统的比较，旨在为根据不同的立地条件选择适宜的乡土树种作为造林树种提供理论依据，充分发挥本地乡土树种的优势特性，真正做到因地制宜、适地适树。

1　材料和方法

1.1　材料

选用黄土高原常见的4个乡土树种：大叶细裂槭（*Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu）、虎榛子（*Ostryopsis davidiana* Decne.）、白刺花（狼牙刺，*Sophora viciifolin* Hance）、辽东栎（*Quercus liaotungensis* Koidz.）的天然实生幼苗。各树种幼苗的平均株高和地径分别为26.2cm，0.74cm；29.4cm，0.52cm；23.6cm，0.57cm；52.4cm，0.82cm。均由陕西省安塞县安塞水土保持试验站提供。

1.2　方法

各树种分别选择大小基本一致的幼苗，于2002年3月27日植入高27 cm，上口径35 cm，下口径22 cm的塑料桶中，桶中均装有14 kg的过筛垆土（含水量10.75%，田间持水量θ_f为26%），桶底装鹅卵石，上铺滤纸与土隔离，通过插到鹅卵石上的硬质塑料管浇水（可避免堵塞及土壤板结）。盆栽桶放置于中国科学院水土保持研究所的可移动防雨棚下，晴天正常光照。栽植幼苗后正常浇水使之正常萌芽，生长约2个月后进行水分处理。试验设置3个水分处理组：适宜水分：70%～75% θ_f；中度干旱：50%～55% θ_f；重度干旱：40%～45% θ_f。各处理重复3次，每桶3株，并设置对照桶（裸土）。不浇水待土壤水分消耗至设定标准后，用称重法控制土壤含水量在设定范围内，每天补充水分消耗量，准确记录加水量，累积加水总量减去对照桶的土壤蒸发量即为幼苗实际蒸腾耗水量。

1.3　测定项目

于当年10月20日，采用收获法测定各项生长指标。各树种按不同处理组分别测定单株苗高、地径、总生物量、叶面积、新梢长度和粗度、叶片数、叶鲜重（W_L）、茎鲜重（Ws）、地上部鲜重（$Wa = W_L + Ws$）、根鲜重（Wr）、粗根（直径≥0.05 cm）和细根（直径<0.05 cm）数、总根长等指标，然后将样品在80℃烘箱内烘干至恒重，分别称各部分相应的干重，再计算下列指标：比叶重＝叶干重/叶面积；根冠比（root/shoot，*R/S*）＝根干重/地上部干重；叶重比（leaf weight ratio，*LWR*）＝叶干重/总生物量；茎重比（stem weight ratio，*SWR*）＝茎干重/总生物量，根重比（root weight ratio，*RWR*）＝根干质量/总生物量[6,7]。

1.4　统计分析

对所获取的实验数据采用SAS软件进行数理统计分析。

2　结果分析

2.1　土壤干旱对不同树种幼苗生长的影响

2.1.1　土壤干旱对幼苗单株生物量和地上部生长的影响　对定植当年的4个供试乡土树种的幼苗生长状况进行统计（见表1），结果表明：各树种幼苗对土壤干旱的响应不同。虎榛子和白刺花的生物量对水分胁迫的响应一致，即中度干旱下的生物量高于适宜水分下的生物量，但两树种间存在差异。与适宜水分处理组相比，中度干旱下虎榛子和白刺花的生物量分别提高了20.23%和3.93%；大叶细裂槭和辽东栎则刚好相反，生物量分别降低了13.59%和35.25%。重度干旱下大叶细裂槭、虎榛子、白刺花和辽东栎幼苗的生物量与适宜水分下相比均分别下降了41.91%、30.50%、70.08%和68.34%，平均下降了52.71%，说明严重干旱对幼苗的生长有明显的抑制作用。

植物叶片特性和新梢生长特征不仅受树种遗传特性影响，受生长环境的影响也较大。同种植物生长在不同环境下，叶片的形状特征也会发生变化[8]。由表1可见，干旱胁迫下，4树种幼苗的单叶面积与比叶重存在较大差异。除辽东栎外，其他树种的比叶重随土壤水分含量的下降而升高；单叶面积变化与土壤水分含量呈正相关。中度干旱下，大叶细裂槭的单叶面积降低最少（13.52%），辽东栎最大（41.74%）；重度干旱下，除白刺花单叶面积差

异明显外，其余树种均与中度干旱胁迫下无明显差异。各树种新梢长度变化趋势与土壤水分含量变化相一致。不同水分处理下，白刺花新梢长度明显大于其他树种，叶片水分含量也明显高于其他树种，表明其叶片保水力强，对干旱环境具有较好的生态适应性，较其他树种具有更强的耐旱性。辽东栎在不同水分处理下新梢长均最短，对低水环境最敏感，适应性较差。随土壤水分含量减少，大叶细裂槭和白刺花的叶重比逐渐下降，主要是由于干旱条件下叶片受水分胁迫不能充分伸展，造成单叶光合面积减少，同时又由于水分不足，降低了叶片的光合同化量所致。总体上茎重比也随水分下降而降低，但白刺花相反，茎重比随水分下降而上升，中度与重度干旱下分别比适宜水分下提高了9.32%和2.79%。各树种叶重比、茎重比变化情况不同，与干旱胁迫下同化物向各器官分配的比例不同有关。

表1 土壤干旱对黄土高原4个乡土树种生长特征的影响[1)]
Table 1 Effect of soil drought on growth characteristics of four native tree species on Loess Plateau in China[1)]

树种 Tree species	土壤含水量 Water content in soil	生物量/g Total biomass	比叶重/mg·cm^{-2} Special leaf weight	单叶面积/cm^2 Single leaf area	平均梢长/cm Average length of shoot	平均梢粗/cm Average diameter of shoot	叶重比 Leaf weight ratio
大叶细裂槭	70%~75% θ_f	9.405a	7.2946a	5.4451a	10.000a	0.264a	0.1452a
	50%~55% θ_f	8.126a	6.9630a	4.7088a	7.924a	0.247a	0.1023a
	40%~45% θ_f	5.463a	7.1620a	3.5043a	5.442a	0.214a	0.0759a
虎榛子	70%~75% θ_f	2.671a	5.6542a	4.2446a	8.015a	0.199C	0.4324a
	50%~55% θ_f	3.211a	6.4841a	3.2862a	6.605a	0.255A	0.3815a
	40%~45% θ_f	1.856a	7.5599a	2.2585a	5.042a	0.215B	0.4812a
白刺花	70%~75% θ_f	33.521a	6.2683a	3.6460a	37.876a	0.339a	0.3383a
	50%~55% θ_f	34.837a	7.2150a	3.0544a	26.566a	0.308a	0.2795a
	40%~45% θ_f	10.028b	7.3339a	1.7548b	12.774b	0.195a	0.2363a
辽东栎	70%~75% θ_f	20.655a	6.1894a	8.0224a	4.490a	0.211a	0.1215a
	50%~55% θ_f	13.375a	5.6172a	4.6735a	4.379a	0.223a	0.1810a
	40%~45% θ_f	6.539a	5.4710a	5.4934a	2.814a	0.178b	0.0928a

树种 Tree species	土壤含水量 Water content in soil	茎重比 Stem weight ratio	根重比 Root weight ratio	一级侧根数/条 First lateral root	二级侧根数/条 Second lateral root	根直径/cm Diameter of root	根长/cm Length of root
大叶细裂槭	70%~75% θ_f	0.3194a	0.5354b	17.3a	25.4a	0.164a	35.789a
	50%~55% θ_f	0.2602a	0.6374a	24.3a	12.7a	0.131a	29.366b
	40%~45% θ_f	0.2496a	0.6745a	16.7a	22.1a	0.119a	25.791c
虎榛子	70%~75% θ_f	0.2663a	0.3013a	11.7a	4.2a	0.115a	17.567a
	50%~55% θ_f	0.2412a	0.3773a	10.0a	6.2a	0.134a	20.419a
	40%~45% θ_f	0.1339a	0.3849a	8.3a	3.8a	0.109a	18.811a
白刺花	70%~75% θ_f	0.1937a	0.4680a	16.3a	39.1a	0.377a	35.878a
	50%~55% θ_f	0.2118a	0.5088a	18.3a	36.8a	0.350a	35.751a
	40%~45% θ_f	0.1991a	0.5646a	21.0a	11.9a	0.201a	20.885b
辽东栎	70%~75% θ_f	0.3481a	0.5304a	22.8a	15.0a	0.209a	31.057a
	50%~55% θ_f	0.2316a	0.5873a	16.0a	27.1a	0.234a	33.262a
	40%~45% θ_f	0.3359a	0.5713a	15.5a	13.8a	0.200a	25.989a

1) 大叶细裂槭 *Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu; 虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decne; 白刺花 *Sophora viciifolin* Hance; 辽东栎 *Quercus liaotungensis* Koidz. 相同的大写和小写字母分别表示在 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ 水平上差异不显著(Duncan检验) The same capital and small letters indicate no significant difference at $\alpha=0.01$ and $\alpha=0.05$ levels respectively (Duncan test).

2.1.2 土壤干旱对地下部根系生长的影响 不同水分条件下各树种幼苗根系生长特征也存在较大的差异(表1)。从根系发育程度来看，除白刺花外，各树种的一级侧根数均随土壤干旱程度加剧而减少。中度与重度干旱下的一级侧根数与适宜水分相比，辽东栎下降幅度均最大(约30%)；随土壤干旱程度加剧，白刺花的一级侧根数逐渐增多，显示其具有较强的适应性；二级侧根数、根系直径、根长变化与一

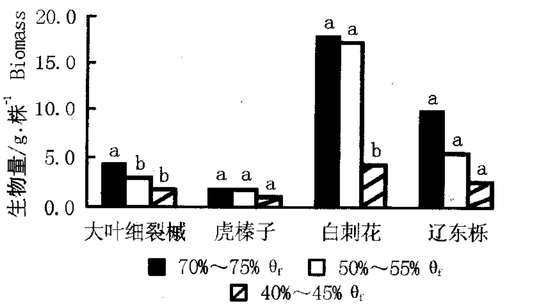
级侧根数相似，中度干旱下白刺花二级侧根数与适宜水分相当，重度干旱下明显减少；根直径与其他树种差异极显著。不同水分条件下，大叶细裂槭和虎榛子的根系长度达到显著差异，而其他树种无显著差异；中度干旱下，虎榛子的根长与其余树种存在显著差异，其余三者间无差异；重度干旱下，大叶细裂槭、辽东栎与虎榛子、白刺花间存在显著差异，两两之间无明显差异。虎榛子的一级侧根数、二级侧根数、根系直径、根长在4个树种中均处于劣势，但对中度干旱有一定程度的适应性，总的说来，在供试树种中其根系对土壤干旱的适应性是最差的。

2.2 土壤干旱对不同树种幼苗干物质分配的影响

2.2.1 地上部生物量的变化　许多植物在受到资源限制时，通常会调节植物地上部和地下部生物量资源以适应环境变化[9~11]。在适宜土壤水分条件下，植物地上部分与地下部分生长比例基本相似[12]，但在土壤干旱条件下，植物地上与地下部分生物量分配发生改变。从图1可见，4个树种除虎榛子外，幼苗地上部分生物量随土壤干旱的加剧而下降。与适宜水分相比，中度干旱下地上部分生物量降低幅度在3.39% ~44.69%之间，中度干旱对幼苗地上部生物量的影响大小依次为辽东栎、大叶细裂槭、白刺花。重度干旱下，幼苗地上部生物量降低幅度增大，达38.59% ~75.06%。重度干旱对各树种地上部生物量的影响从大至小依次为白刺花、辽东栎、大叶细裂槭、虎榛子。

由图2和图3可见，各树种茎的生物量随土壤干旱的加剧而下降（虎榛子例外）。与适宜水分相比，中度干旱下茎生物量平均下降20.77%，重度干旱下平均下降60.97%，中度干旱对各树种茎生物量的影响大小依次为大叶细裂槭、白刺花、辽东栎；重度干旱下依次为白刺花、辽东栎、大叶细裂槭、虎榛子。各树种叶生物量总体表现为随土壤干旱加剧而降低，与适宜水分相比，重度干旱下，叶生物量降幅最大的树种为辽东栎，最小的为大叶细裂槭，平均降幅为65.89%，降低幅度大小依次为辽东栎、白刺花、虎榛子、大叶细裂槭。在中度干旱下，虎榛子和白刺花叶生物量有所增加，特别是白刺花比适宜水分下增加了14.63%，但差异不显著，但与重度干旱下的差异显著，表明中度干旱对白刺花的生长几乎没有影响。

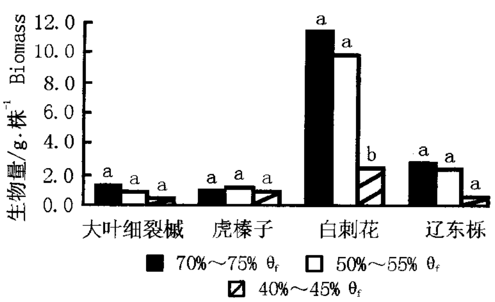
2.2.2 地下部生物量的变化　根系是树木生长最重要的地下营养器官，根系对土壤水分亏缺的反应有利于树木尽可能吸收较多的水和营养物质，以供本身和植物其余部分的需要[13]。从图4可见，相同水分条件下各树种地下部分生物量存在显著差异，适宜水分和重度干旱下树种间地下部生物量差异达显著水平，中度干旱下差异达极显著水平。大叶细裂槭和辽东栎地下部分生物量变化与土壤水分含量呈正相关，而白刺花和虎榛子在中度干旱下根量增加，其中白刺花增加幅度较大。在中度干旱与适宜水分处理下，白刺花地下部生物量差异不显著，但与重度干旱相比差异显著，与其他树种无明显差异。



大叶细裂槭 *Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu；虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decne.；白刺花 *Sophora viciifolin* Hance；辽东栎 *Quercus liaotungensis* Koidz.　相同的小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上差异不显著（Duncan 检验） The same small letters indicate no significant difference at $\alpha=0.05$ level (Duncan test).

图1　土壤干旱对4树种地上部生物量的影响

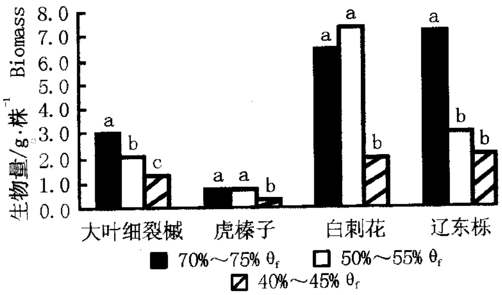
Fig. 1　Effect of soil drought on above-ground part biomass of four tree species



大叶细裂槭 *Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu；虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decne.；白刺花 *Sophora viciifolin* Hance；辽东栎 *Quercus liaotungensis* Koidz.　相同的小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上差异不显著（Duncan 检验） The same small letters indicate no significant difference at $\alpha=0.05$ level (Duncan test).

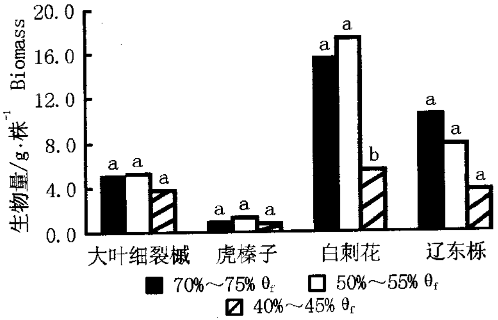
图2　土壤干旱对4树种茎生物量的影响

Fig. 2　Effect of soil drought on stem biomass of four tree species



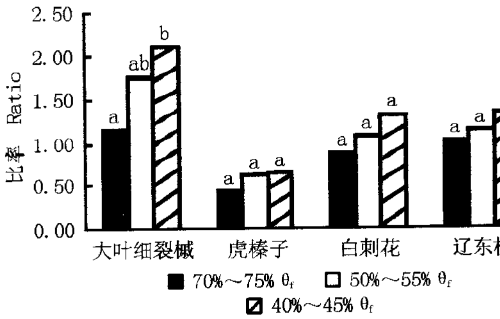
大叶细裂槭 *Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu；虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decne.；白刺花 *Sophora viciifolin* Hance；辽东栎 *Quercus liaotungensis* Koidz. 相同的小写字母表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异不显著(Duncan 检验) The same samll letters indicate no significant difference at $\alpha = 0.05$ level (Duncan test).

图3 土壤干旱对4树种叶生物量的影响
Fig. 3 Effect of soil drought on leaf biomass of four tree species



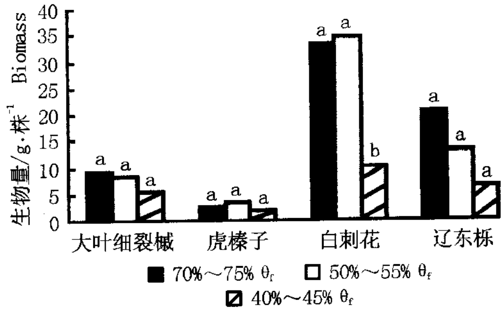
大叶细裂槭 *Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu；虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decne.；白刺花 *Sophora viciifolin* Hance；辽东栎 *Quercus liaotungensis* Koidz. 相同的小写字母表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异不显著(Duncan 检验) The same samll letters indicate no significant difference at $\alpha = 0.05$ level (Duncan test).

图4 土壤干旱对4树种地下部生物量的影响
Fig. 4 Effect of soil drought on under-ground part biomass of four tree species



大叶细裂槭 *Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu；虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decne.；白刺花 *Sophora viciifolin* Hance；辽东栎 *Quercus liaotungensis* Koidz. 相同的小写字母表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异不显著(Duncan 检验) The same small letters indicate no significant difference at $\alpha = 0.05$ level (Duncan test).

图5 土壤干旱对4树种地下部/地上部生物量比率的影响
Fig. 5 Effect of soil drought on shoot-root ratio of four tree species



大叶细裂槭 *Acer stenolobum* Rehd. var. *megalophyllum* Fang et Wu；虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decne.；白刺花 *Sophora viciifolin* Hance；辽东栎 *Quercus liaotungensis* Koidz. 相同的小写字母表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异不显著(Duncan 检验) The same small letters indicate no significant difference at $\alpha = 0.05$ level (Duncan test).

图6 土壤干旱对4树种总生物量的影响
Fig. 6 Effect of soil drought on total biomass of four tree species

2.2.3 地下部与地上部生物量比率的变化 Huston 和 Tilman 等学者认为，植物地下部与地上部生物量比率大小反映了植物对环境因子的需求和竞争能力[14,15]。对树木来说，地下部与地上部生物量之比，即根冠比(R/S) >1，表明对养分的需求和竞争能力强。从图5可见，土壤干旱对不同树种地下部与地上部生物量比率影响不同，但 R/S 值均随土壤干旱程度加剧而增大。除虎榛子外，其他3个树种的 R/S 值均大于1。适宜水分下4个树种间 R/S 值差异不显著，变幅在 0.4347 ~ 1.1626 之间；但在中度干旱下，大叶细裂槭、虎榛子、白刺花和辽东栎的 R/S 值分别比适宜水分下提高 51.69%、45.85%、19.69%和11.98%，平均提高了 32.31%；重度干旱下，大叶细裂槭与白刺花的 R/S 值分别比适宜水分下提高 80.04%和 50.43%，大叶细裂槭的 R/S 值甚至达到2以上，与适宜水分下的 R/S 值差异达显著水平，其余树种不同水分处理间差异不显著。

3 结论和讨论

随土壤干旱程度加剧，4个供试树种幼苗的各项生长指标，如单叶面积、新梢生长速率、增粗速率、叶比重、根粗、根长、侧根数、总生物量均呈下降趋势。在土壤干旱条件下，各树种幼苗叶生物量积累下降，同时茎重比也随之降低，但不同树种反应不同。白刺花幼苗叶生物量和地上部生物量受水分胁迫影响较小，根系能获得较多的光合产物，得以继续生长；即使在重度干旱下，其地下部与地上部生物量比率也较适宜水分下提高 50.43%，说明其地下部仍在继续生长。地上部与地下部的协调生长，使光合产物

向营养器官的投入相对减少，增加根系物质的输入，满足能量和物质的平衡供给，是树木提高逆境中竞争效率的方式，反映出该树种具有较强的抗旱性。在土壤干旱下，虎榛子的叶生物量和地上部生物量明显低于其他树种，根系生长与地上部生长缓慢相一致，整体生长缓慢。辽宁栎和大叶细裂槭的生长介于上述二者之间。

植物对环境特别是水分因子变化的响应主要是通过根系进行，根系与土壤间的相互作用是一系列复杂的生理生态过程，在这一过程中植物为适应环境，根系表现出明显的可塑性[16,17]，从而导致植物在根系生长、分布结构和地上部生物量分配上产生差异。根系生长于土壤中，对土壤水分含量的变化最为敏感，土壤水分含量直接影响到根系的生长、发育、结构、布局、吸水和吸肥能力，进而影响到植物地上部分的生长、代谢及物质分配等。随土壤水分含量减少，树木的根冠比加大，大叶细裂槭表现最突出，在重度干旱下根冠比甚至达到2以上，可见它的根具有很强的可塑性。在重度干旱下大叶细裂槭生长严重受抑，但根冠比增大近80%以维持存活，使其成活率仍较高。随土壤水分的减少，白刺花和辽东栎根系变化不明显，在中度干旱下根数、根长、根粗变化不大，根重还有所增加，但重度干旱下根系发育不良，生长明显受抑制；虎榛子是4个树种中根系生长最慢的，与地上部生长缓慢相一致，根冠比也最小。

由此可见，植物对土壤干旱的适应性在很大程度上取决于干物质分配的方向和比率。不同植物种类适应干旱的方式和策略可能不同，有的种类以牺牲地上部生物量为代价发展地下部的生长；有的种类以增加渗透性保护物质来提高对逆境的耐受性；有的种类以增加形态结构上的变异来适应逆境等等。这也说明了乡土树种在长期适应环境的过程中已获得了较强的适应性，对生长地的地理分布、土壤、水分和气候等因子最具适应性，在植被恢复中不可忽视其价值，尤其是在生态比较脆弱的地区[5]。

参考文献：

[1] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京：中国水利水电出版社，1997.

[2] 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.

[3] 侯庆春，韩蕊莲，李宏平. 关于黄土丘陵典型地区植被建设中有关问题的研究Ⅲ. 乡土树种在造林中的意义[J]. 水土保持研究，2000，7(2)：119－123.

[4] 王仁卿，藤原一绘，尤海梅. 森林植被恢复的理论和实践：用乡土树种重建当地森林—宫胁森林重建法介绍[J]. 植物生态学报，2002，26(增刊)：133－139.

[5] 吴　彤，常　江，张银虎. 发展乡土灌木树种，夯实林业建设基础[J]. 内蒙古林业科技，2003(增刊)：93－94.

[6] Norby R J. Forest canopy productivity index[J]. Nature, 1996, 381: 561－564.

[7] 肖春旺，周广胜，赵景柱. 不同水分条件对毛乌素沙地油蒿幼苗生长和形态的影响[J]. 生态学报，2001，21(12)：2136－2140.

[8] 王　淼，代力民，姬兰柱，等. 长白山阔叶红松林主要树种对干旱胁迫的生态反应及生物量分配的初步研究[J]. 应用生态学报，2001，12(4)：496－500.

[9] 肖春旺，刘玉成. 不同光环境的四川大头茶幼苗的生态适应[J]. 生态学报，1999，19(3)：422－426.

[10] 董　鸣，阿拉腾宝，邢雪荣，等. 根茎禾草沙鞭的克隆基株及分株种群特征[J]. 植物生态学报，1999，23(4)：302－310.

[11] 肖春旺，董　鸣，周广胜，等. 鄂尔多斯高原沙柳幼苗对模拟降水量变化的响应[J]. 生态学报，2001，21(1)：171－176.

[12] Wilson J B. Shoot competition and root competition[J]. Appl Ecol, 1988, 25(2): 279－296.

[13] 孙书存，陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶的生长及其光合作用[J]. 生态学报，2000，20(2)：212－217.

[14] Huston M A, Smith T M. Plant succession: Life history and competition[J]. American Naturalist, 1987, 130(2): 168－198.

[15] Tilman D. Plant Strategies and the Structure and Dynamics of Plant Communities [M]. Princeton: Princeton University Press, 1988. 52－97.

[16] Fitter A H. Functional significance of root morphology and root system architecture [A]. Fitter A H, Atkinson D. Ecological Interactions in Soil: Plants, Microbea and Animals [M]. Oxford: Blackwell Scientific Press, 1985. 87－106.

[17] Grime J P, Campbell B D, Mackey J M L, *et al.* Root plasticity, nitrogen capture and competitive ability[A]. Atkinson A. Plant Root Growth: An Ecological Perspective[M]. Oxford: Blackwell Scientific Press, 1991. 381－397.

（责任编辑：惠　红）