

干旱胁迫对不同种源马尾松 苗木生长及生物量的影响

胡晓健¹, 欧阳献², 喻方圆^{3*}

(1. 江西省林木种苗和林场管理局, 江西 南昌 330038; 2. 江西环境工程职业学院, 江西 赣州 341000; 3. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 研究不同程度的周期性干旱胁迫对广东乐昌、湖北远安、湖南汝城、浙江江山、安徽霍山 5 个种源马尾松苗木生长及生物量的影响。结果表明: (1) 干旱胁迫下, 各种源马尾松苗木随土壤水势的下降, 其外部形态受到的伤害不断加重, 但同一胁迫水平上各种源间外部形态无明显差异。 (2) 干旱胁迫下, 各种源马尾松苗木生长都受到抑制。其中干旱胁迫对苗木高增长量影响最小的是浙江江山种源, 重度干旱胁迫下其苗木高增长量为 1.86 cm, 增长率为 15.79%; 其次为湖北远安、安徽霍山、湖南汝城种源; 干旱胁迫对苗木高增长量影响最大的为广东乐昌种源, 在重度胁迫下苗木高增长量只有 0.35 cm, 苗木高增长率仅为 2.33%。 (3) 马尾松各种源生物量对干旱胁迫的反应趋势基本一致, 随着水分胁迫程度的加重, 生物量积累受抑制作用增强。5 个种源中受影响较小的为湖北远安、广东乐昌种源; 其次为安徽霍山、湖南汝城、浙江江山种源。

关键词: 马尾松苗木; 干旱胁迫; 生长; 生物量

中图分类号: S718.55⁺6; S791.248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2010)03-0510-07

Effects of Drought Stress on the Growth and Biomass of *Pinus massoniana* Seedlings in Different Provenances

HU Xiao-jian¹, OUYANG Xian², YU Fang-yuan^{3*}

(1. Administration for Forest Farm and Tree Seed and Seedling of Jiangxi Province, Nanchang 330006, China; 2. Jiangxi Environmental Engineering Vocational College, Ganzhou 341000, China; 3. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The effects of periodic drought stress on the growth and biomass of *Pinus massoniana* seedlings in different provenances including Lechang, Guangdong Province, Yuan'an, Hubei Province, Rucheng, Hunan Province, Jiangshan, Zhejiang Province and Huoshan, Anhui Province were studied. The results were as follows: (1) The morphological injuries of seedlings from all 5 provenances were aggravated along with the decrease of soil water potential. There were no significant differences in appearance among different provenances under the same level of drought stress. (2) The seedling height growth of all 5 provenances was inhibited under drought stress. Seedlings from Jiangshan, Zhejiang Province had the amount of height growth with minimal impact among all 5 provenances. Its height increment was 1.86 cm, and height increment rate was 15.79% under severe drought stress. And the seedlings from Lechang, Guangdong Province had the amount of height growth with maximum impact among all 5 provenances. Its height increment was only 0.35 cm, and height increment rate was only 2.33% under severe drought stress. (3) The response of seedling biomass in different

收稿日期: 2010-02-31 修回日期: 2010-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30571485)

作者简介: 胡晓健 (1981-), 男, 工程师, 硕士, E-mail: hxjry@126.com; * 通讯作者: 喻方圆, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: fyyu@njfu.com.cn

provenances to drought stress was basically of the same trend. Along with the increase of the severity of water stress, the inhibition of seedling biomass accumulation was aggravated. The less affected provenance was Yuan 'an, Hubei Province, followed by Huoshan, Anhui Province, Rucheng, Hunan Province and Jiangshan, Zhejiang Province.

Key words: *Pinus massoniana* seedlings; drought stress; growth; biomass

干旱胁迫下,植物体会发生一系列相应的形态和生理生化变化^[1-3]。其中干旱胁迫对植物生长的影响是最直观的。研究表明,轻度的水分亏缺就足以使植物叶片生长显著减弱。如张英普等^[4]开展不同程度的干旱胁迫对玉米株高影响的研究后发现,当叶水势降到 -0.62 MPa时,株高只有对照的81%,当水势降到 -1.00 MPa时,株高只有对照的59%。王森等^[5]研究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,结果表明干旱胁迫显著降低红松、水曲柳、椴树和蒙古柞等树种的叶面积、侧根数和根长。唐罗忠等^[6]研究表明,干旱胁迫条件下杨树无性系生物量累积受到明显抑制,根冠比明显降低。水分胁迫下,树木高、茎、根系生长、叶片数、叶面积及生物量、树冠结构等均受到抑制^[7]。韦莉莉等^[8]研究了2年生杉木苗对水分胁迫的响应,结果发现水分胁迫对苗木地上部分生物量影响较大,而对地下部分生物量的影响不明显。但McMillin et al^[9]对西黄松的研究却发现,水分胁迫对苗木的根冠比影响很大,随着水分胁迫的加重,根冠比增大。尽管干旱胁迫对植物生长影响的报道很多,但干旱胁迫对不同种源马尾松苗木生长的影响还未见报道。本文的目的是通过分析不同种源马尾松苗木对干旱胁迫的反应,探讨生长和生物量指标与马尾松苗木抗旱能力的关系,以期为提高马尾松苗木的抗旱能力和选择马尾松耐旱种源提供一定的理论与实践依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

选择广东乐昌、湖南汝城、湖北远安、浙江江山、安徽霍山5个种源种子,2006年3月16日在南京市牛首山林场苗圃进行沙床播种,4月9日至4月11日将芽苗移植到容器中定植培育。容器为 $13\text{ cm} \times 11\text{ cm}$ (口径×高)的黑色塑料营养钵,基质为黄棕壤和松林土按1:1混合,pH值6.86,有机质 15.3 g/kg ,全氮 0.6 g/kg ,全磷 0.6 g/kg ,全钾 9.1 g/kg ,水解氮 99.96 mg/kg ,有效磷 6.54 mg/kg ,速效钾 5.32 mg/kg ,容重为 1.144 g/cm^3 ,饱和含水量49.81%。苗木培育4个月后,于2006年8月下旬开始进行干旱胁迫处理。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,各种源选取生长一致苗木720株,设3个处理,分别为每2 d浇水1次;每4 d浇水1次;每6 d浇水1次,浇水时将苗木浇透。以12 d为1个处理周期,共进行3个处理周期,总处理时间为36 d。每处理3次重复,每重复80株苗木。2006年8月23日开始处理,分别于处理12 d(9月4日)、24 d(9月16日)和36 d(9月28日)后随机取各处理苗木30株,测定生长及生物量指标。另外,取不同处理的营养土样品测定土壤水势。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤水势测定 在不同处理周期结束后,取部分营养土样品,用美国WESCOR公司P_{syp10}型号露点水势测定仪测定土壤水势。每次测定3次重复。

1.3.2 外部形态特征观察 于不同干旱胁迫周期观察记录苗木表观生长状况(针叶及茎干颜色、形态)。

1.3.3 苗高和生物量测定 用钢尺测定植株苗高,精确到0.01 cm。采取收获法测定生物量。试验结束时,用自来水冲洗苗木根部,并保持完整。清洗完毕,用吸水纸吸干苗木表面水分,分别测定苗木茎、根鲜重后,用105℃烘干法测定苗木地上和地下部分干重,两部分相加即为苗木总生物量。

1.4 数据分析处理

数据统计分析与处理使用SPSS11.5、Microsoft Excel软件完成。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下土壤水势的变化

本实验以12 d为1个处理周期,共进行3个周期的干旱胁迫处理,在每个干旱胁迫处理周期结束

后测定土壤水势 (表 1)。

表 1 不同程度干旱胁迫下的土壤水势

Tab 1 The soil water potential under different drought stress

处理 Treatment	处理 12 d (第 1 周期) Treated for 12 days (First cycle)			处理 24 d (第 2 周期) Treated for 24 days (Second cycle)			处理 36 d (第 3 周期) Treated for 36 days (Third cycle)		
	对照 CK	中度干旱 Medium drought stress	重度干旱 Heavy drought stress	对照 CK	中度干旱 Medium drought stress	重度干旱 Heavy drought stress	对照 CK	中度干旱 Medium drought stress	重度干旱 Heavy drought stress
	土壤水势 /MPa Soil water potential	- 0.282	- 1.397	- 1.781	- 0.255	- 1.365	- 1.984	- 0.188	- 1.330

从表 1 可以看出,不同处理周期的土壤水势基本保持一致。根据 Hsiao^[10]对中生植物水分胁迫程度的分级标准,本文将每 2 d 浇水 1 次视为对照、每 4 d 浇水 1 次视为中度干旱胁迫、每 6 d 浇水 1 次视为重度干旱胁迫。3 个处理周期的相同处理之间土壤水势基本一致,这为研究干旱胁迫下不同种源马尾松苗木生长及生物量的变化提供可供比较的条件。

2.2 干旱胁迫对不同种源马尾松苗木外部形态的影响

本试验于第 1 个处理周期结束后对苗木形态做观察记录,各种源及处理间叶片及茎干形态发生明显的变化。从表 2 可看出,干旱胁迫后各种源马尾松苗木均受不同程度的干旱伤害,对照和处理间表现出明显的变化,受中度干旱胁迫的苗木均有不同程度的失水萎蔫,重度干旱胁迫的针叶出现明显脱水现象,发黄变枯。中度胁迫下广东乐昌种源长势最好。比较各种源重度干旱胁迫下的生长状况后发现,广东乐昌种源针叶发黄植株较多,而其他 4 个种源生长势较弱,均出现较重的萎蔫,但相互之间在相同干旱胁迫水平上其外观表现并无明显差异。

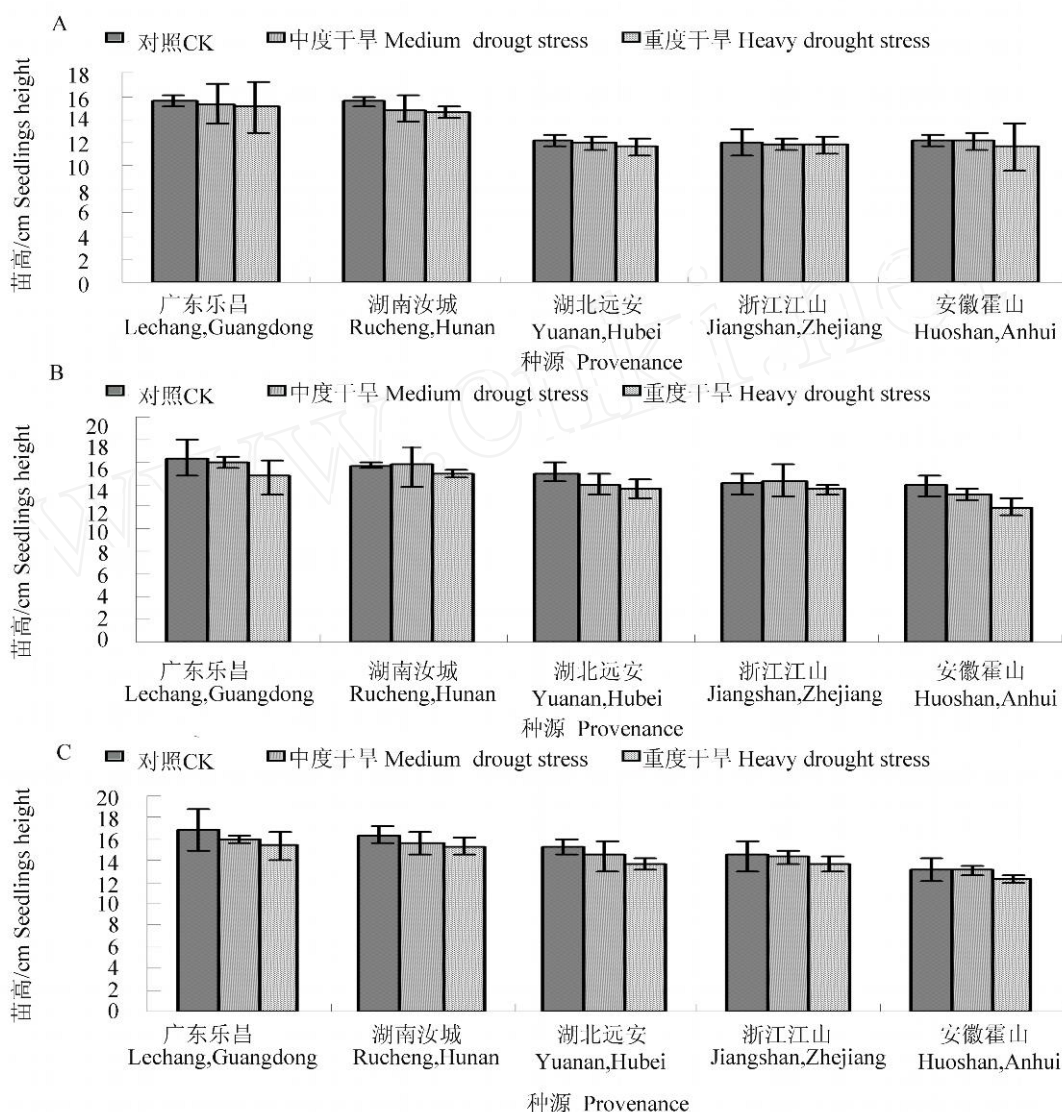
表 2 干旱胁迫下不同种源马尾松苗木外部形态的变化

Tab 2 Changes of seedling appearance in different Pinus massoniana provenances under drought stress

处理 Treatment	苗木形态变化 Changes of seedling appearance				
	广东乐昌 Lechang, Guangdong	湖南汝城 Rucheng, Hunan	湖北远安 Yuanan, Hubei	浙江江山 Jiangshan, Zhejiang	安徽霍山 Huoshan, Anhui
对照 CK	正常,无明显变化	正常,无明显变化	正常,无明显变化	正常,无明显变化	正常,无明显变化
中度干旱 Medium drought stress	无明显变化,针叶颜色变浅	针叶有少许萎蔫,植株底部针叶变黄	少许萎蔫,颜色变浅,部分苗木顶端下垂,针叶生长较细长	针叶生长细弱,长势差	针叶脱水变细,植株生长较差
重度干旱 Heavy drought stress	部分苗木植株针叶脱水变黄,株顶干枯,茎表皮皱缩,萎蔫程度较深	针叶失水少许变黄或顶端干枯变黄,茎表皮皱缩	少许脱水变黄,茎表皮微皱缩,部分植株顶端稍萎蔫下垂	部分植株脱水黄化,茎表皮皱缩,稍有萎蔫,植株瘦弱	失水针叶颜色变浅,少许针叶枯黄,茎表皮微皱缩,植株瘦弱

2.2.1 干旱胁迫对不同种源马尾松苗木苗高生长的影响 生长环境影响植物高生长,因此高生长与其抗逆性具有一定的关系,一般情况下逆境胁迫增强,生长速度随之减慢,甚至停止。所以高生长指标是衡量苗木生长状况的重要形态指标之一,本研究干旱胁迫对不同种源马尾松苗木苗高生长的影响。从图 1 可以看出,各种源马尾松在干旱胁迫下苗高生长普遍受到不同程度的抑制。在处理 12 d 后,湖北远安、浙江江山种源在中度干旱和重度干旱胁迫下苗高差异不显著。在处理 24 d 后,广东乐昌、湖北远安、安徽霍山 3 种源在重度胁迫下苗高较对照相比差异较大,生长明显受到影响;而湖南汝城、浙江江山种源在中度胁迫下苗高稍微高出对照和重度胁迫。在处理 36 d 后,各种源处理间苗高差异趋势更明显,对照最好,中度干旱次之,重度干旱最差。各种源苗高生长的差异及胁迫影响出现的时间可能与马尾松本身较耐旱及各种源本身抗旱能力存在差异有关。

用苗高增长量和增长率来比较各种源间的抗旱差异性更具科学性。从表 3 中可以看出,除浙江江山种源在中度干旱胁迫下苗高增长量及增长率略高出对照外,其余各种源干旱处理后的苗高均受到抑制,且随干旱程度加重苗高生长受抑制程度更为明显,其苗高增长量和苗高增长率随胁迫程度的加重呈下降趋势。干旱胁迫对苗高增长量影响最小的是浙江江山种源,中度干旱胁迫下苗高增长量为 2.50 cm,



A:处理 12 d,B:处理 24 d,C:处理 36 d

A: after 12 days drought stress, B: after 24 days drought stress, C: after 36 days drought stress

图 1 干旱胁迫处理对不同种源马尾松苗木苗高的影响

Fig 1 Effect of drought stress on seedling height growth in different *Pinus massoniana* provenances

苗高增长率为 21.08%, 重度干旱胁迫下苗高增长量为 1.86 cm, 增长率为 15.79%; 其次为湖北远安、安徽霍山、湖南汝城种源。干旱胁迫对苗高增长量影响最大的为广东乐昌种源, 在重度胁迫下苗高增长量只有 0.35 cm, 其苗高增长率仅为 2.33%, 是 5 个种源中增长量最小的, 说明广东乐昌种源在干旱胁迫下抗旱性较弱。

2.2.2 干旱胁迫对不同种源马尾松苗木总生物量的影响 植物在胁迫下, 生物量的变化反映其对外界环境的适应能力。水分胁迫对植物生长的影响最终也可体现在生物量积累的差异上, 因此它可以比较直观地反映胁迫条件与植物生长之间的关系。由图 2 可以看出, 马尾松各种源生物量对干旱胁迫的反应趋势基本一致, 即生物量与土壤水势变化成正比。随着水分胁迫程度的加重, 生物量积累受到抑制作用增强, 较对照表现出下降趋势。方差分析结果表明, 不同种源和不同干旱胁迫程度对马尾松苗木生物量的影响都达到极显著水平, 而种源和胁迫水平两者间的交互作用却表现得无明显。

马尾松苗木受到干旱胁迫时, 生物量的积累均表现为减慢趋势, 各种源马尾松苗木总生物量都具有下降趋势, 但降幅不一, 所以用干旱胁迫下的生物量与对照苗木生物量的比值百分率来比较各种源间的抗旱性差异更贴切。从表 4 可以得出, 中度干旱胁迫下, 除广东乐昌种源生物量稍微高于对照, 生物量

表 3 干旱胁迫下不同种源马尾松苗木苗高增长量和增长率
 Tab 3 The changes of seedling height increment and height increment rate in different *Pinus massoniana* provenances under drought stress

种源 Provenance	苗高增长量 /cm Seedlings height increment			苗高增长率 /% Seedlings height increment rate		
	对照 CK	中度干旱 Medium drought stress	重度干旱 Heavy drought stress	对照 CK	中度干旱 Medium drought stress	重度干旱 Heavy drought stress
广东乐昌 Lechang, Guangdong	1.25	0.62	0.35	8.03	4.04	2.33
湖南汝城 Rucheng, Hunan	0.82	0.78	0.64	5.27	5.23	4.37
湖北远安 Yuanan, Hubei	3.11	2.07	1.48	25.50	17.32	12.74
浙江江山 Jiangshan, Zhejiang	2.39	2.50	1.86	19.90	21.08	15.79
安徽霍山 Huoshan, Anhui	0.91	0.89	0.68	7.48	7.31	5.88

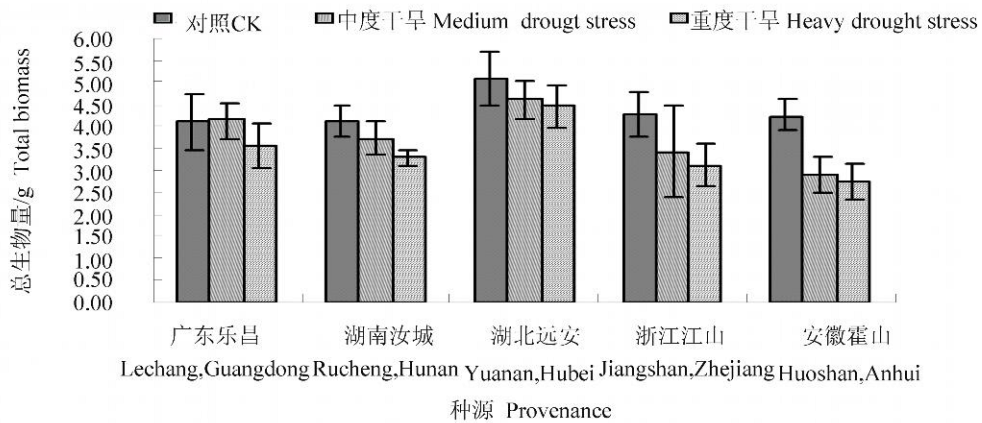


图 2 干旱胁迫对不同种源马尾松苗木总生物量的影响

Fig 2 The effect of drought stress on seedling biomass in different *Pinus massoniana* provenances

增长率为 0.81% 外,其余 4 种源均表现为下降,但下降最大的为安徽霍山种源,生物量较对照相比下降 1.36 g;其次为浙江江山种源,湖北远安种源,湖南汝城种源。重度胁迫下总生物量与对照的比值百分率从大到小依次为:湖北远安 87.26%,广东乐昌 86.55%,湖南汝城 79.81%,浙江江山 73.28%,安徽霍山 64.55%。

3 讨 论

植株苗高和生物量是植物获取能量能力的主要体现,对植物的发育和结构的形成具有十分重要的影响^[11]。在生长发育中,植物总要不不断调整其生长和生物量的分配策略来适应环境变化。在土壤干旱胁迫条件下,植物通过调整生物量分配将逆境伤害降低到最小来适应逆境胁迫。如 Virginia 等^[12]对地中海 2 种栎类树种苗木的研究发现,干旱胁迫下,苗木体内的碳水化合物更多地向根系积累。本研究以不同种源马尾松苗木为对象,通过设置不同程度的干旱胁迫处理,探讨不同种源马尾松苗木在土壤水分胁迫条件下的苗高生长和生物量分配状况,籍以揭示马尾松苗木对水分胁迫的响应及其生长可塑性,为以后干旱化趋势育苗及选育提供一定的理论依据。

表 4 干旱胁迫下不同种源马尾松苗木总生物量的变化

Tab 4 The changes of seedling Biomass in different provenance of *Pinus massoniana* under drought stress

种源 Provenance	总生物量 Total biomass					
	对照 /g CK	生物量相对值 /% Relative biomass	中度干旱 /g Medium drought stress	生物量相对值 /% Relative biomass	重度干旱 /g Heavy drought stress	生物量相对值 /% Relative biomass
广东乐昌 Lechang, Guangdong	4.09	100.00	4.12	100.81	3.54	86.55
湖南汝城 Rucheng, Hunan	4.11	100.00	3.73	90.84	3.28	79.81
湖北远安 Yuanan, Bubei	5.10	100.00	4.61	90.33	4.45	87.26
浙江江山 Jiangshan, Zhejiang	4.27	100.00	3.42	80.16	3.13	73.28
安徽霍山 Huoshan, Anhui	4.25	100.00	2.89	67.92	2.74	64.55

生物量相对值为: (处理 / 对照) $\times 100$ 。

Relative biomass was: (treatment/CK) $\times 100$ 。

本研究中,马尾松苗木在不同程度的干旱胁迫下,苗高生长受到明显的影响,中度干旱胁迫下马尾松苗木苗高总体表现都低于对照,也有苗高高于对照的,但变幅较小;重度胁迫下苗高受抑制作用更大。肖冬梅等^[13]通过对红松、水曲柳、胡桃楸和椴树 4 树种的干旱试验,证明轻度土壤水分亏缺对 4 个树种的生长就有明显的抑制作用,随着胁迫程度加剧,各树种的株高、地径也随之减小,中度和重度水分胁迫下 4 个树种的株高、地径和对照组相比均有显著性差异,从未出现干旱胁迫后苗高高于对照的情况。马尾松苗木在干旱胁迫的初期出现受干旱胁迫的苗木苗高高于对照的情况,这可能与马尾松苗木的自身特性有关。因为马尾松多生长在土壤瘠薄、水分条件一般的立地条件下,长期的适应和锻炼导致它对轻度干旱不敏感,尤其在干旱胁迫初期。从苗高增长量和增长率反映的情况看,除浙江江山种源中度干旱胁迫下苗高略高于对照之外,各种源的干旱胁迫处理与对照相比,总体出现生长减慢,且干旱程度越重苗高增长受抑制越明显。从苗木总生物量看,各种源处理与对照间均表现出显著差异,随干旱程度加剧苗木生物量总体呈现下降趋势,这一结果与李林锋^[14]对桉树幼苗和谢会成^[15]对栓皮栎幼苗的研究结论较一致。但各种源降幅不一,广东乐昌种源略高于对照。由此可见,不同种源在不同干旱胁迫下表现出的抗旱能力差异较大,不同种源在受到干旱胁迫后,虽然地上部分生长受到抑制,苗高降幅较小,但是地下部分根系受到干旱胁迫影响可能更大更直接,所以导致总生物量降幅较大。苗高降幅最大的种源总生物量却降幅较小,这可能是在干旱胁迫条件下,植物根系吸收不到足够的水分和养分,各器官的生长发育都受到限制,导致地上部分生长受到更大的抑制,从而有效防止水分在地上部分的过多消耗来适应干旱环境条件下的生存。同时,在土壤水分亏缺条件下植物倾向于将更多的资源分配给根系生长,或从地上部分转移到地下部分,这样才能从土壤中获得更多的水分和营养物质,以提高竞争生长的能力,故根系生物量受影响相对较小^[16]。根据苗高和总生物量的总体表现比较,本试验的 5 种源中,受影响最小的为湖北远安和广东乐昌种源;其次为安徽霍山、湖南汝城和浙江江山种源。

参考文献:

- [1] Egert M, Tevini M. Influence of drought on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress in leaves of chives (*Allium schoenoprasum*) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, 48: 43 - 49.
- [2] Franca M C, Thi A T, Pimentel C, et al Laffray differences in growth and water relations among *Phaseolus vulgaris* cultivars in response to induced drought stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 43: 227 - 237.

- [3] 汪芳,喻理飞. 水分胁迫对掌叶木幼苗生长的影响 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(20): 8436 - 8437, 8457.
- [4] 张英普,何武权,韩健. 水分胁迫对玉米生理生态特性的影响 [J]. 西北水资源与水工程, 1999, 10(3): 18 - 21.
- [5] 汪森,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 - 450.
- [6] 唐罗忠,黄选瑞,李彦慧. 水分胁迫对白杨杂种无性系生理和生长的影响 [J]. 河北林果研究, 1998, 22(2): 99 - 102.
- [7] 杨敏生,裴保华,张树常. 树木抗旱性研究进展 [J]. 河北林果研究, 1997, 12(1): 87 - 93.
- [8] 韦莉莉,张小全,侯振宏,等. 杉木苗木光合作用及其产物分配对水分胁迫的响应 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 394 - 402.
- [9] Millin J D, Wagner M R. Effects of water stress on biomass partitioning of ponderosa pine seedlings during primary root growth and shoot growth periods [J]. Forest Science, 1995, 41(3): 594 - 610.
- [10] Hsiao T C. Plant responses to water stress [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1973, 24: 519 - 570.
- [11] 宇万太,于永强. 植物地下生物量研究进展 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 927 - 932.
- [12] Virginia S, Pilar C, Richard J. Seasonal carbon storage and growth in Mediterranean tree seedlings under different water conditions [J]. Tree Physiology, 29: 1105 - 1116.
- [13] 肖冬梅,王森,姬兰柱. 水分胁迫对长白山阔叶红松林主要树种生长及生物量分配的影响 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 93 - 97.
- [14] 李林锋,刘新田. 干旱胁迫对桉树幼苗的生长和某些生理生态特性的影响 [J]. 西北林学院学报, 2003, 19(1): 14 - 17.
- [15] 谢会成,朱西存. 水分胁迫对栓皮栎幼苗生理特性及生长的影响 [J]. 山东林业科技, 2004(2): 6 - 7.
- [16] 肖春旺,周广胜,马风云. 施水量变化对毛乌素沙地优势植物形态与生长的影响 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(1): 69 - 76.

(上接第 509 页)

- [26] Lertzman K P, Sutherland G D, Inselberg A. Canopy gaps and the landscape mosaic in a coastal temperate rain forest [J]. Ecology, 1996, 77: 1254 - 1270.
- [27] Myers G P, Newton A C, Melgarejo O. The influence of canopy gap size on natural regeneration of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) in Bolivia [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 127: 119 - 128.
- [28] Brown N. A gradient of seedling growth from the centre of a tropical rain forest canopy gap [J]. Forest Ecology and Management, 1996, 82: 239 - 244.
- [29] Gray A N, Spies T A. Microsite controls on tree seedling establishment in conifer forest canopy gaps [J]. Ecology, 1997, 78: 2458 - 2473.
- [30] Gagnon J L, Jokela E J, Moser W K, et al. Dynamics of artificial regeneration in gaps within a longleaf pine flatwoods ecosystem [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 172: 133 - 144.
- [31] Zhu J J, Kang H Z, Tan H, et al. Regeneration characteristics of natural Mongolia pine (*Pinus sibirica* var. *mongolica*) forests on sandy land in Honghuaerji [J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(4): 253 - 259.