

干旱胁迫对5个海岛树种生长及生理特性的影响

陈闻¹, 赵颖¹, 叶正钱², 王美琴¹, 王晶¹, 王国明¹

(1. 浙江省舟山市林业科学研究院, 浙江舟山 316000; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江临安 311300)

摘要: 为了解全缘冬青 *Ilex integra*, 红楠 *Machilus thunbergii*, 普陀樟 *Cinnamomum japonicum* var. *chenii*, 滨柃 *Eurya emarginata*, 柃木 *Eurya japonica* 等5个海岛树种的抗旱性, 利用盆栽控水方式对5个海岛树种进行干旱胁迫试验, 测定相关的生理指标, 比较5个树种之间抗旱能力的大小。结果表明: 各树种的地上部分和地下部分生物量随着胁迫程度的增加而持续下降, 而根茎比呈现出先降后升的变化趋势; 5个树种的脯氨酸和相对电导率随干旱程度的加剧而呈上升趋势, 叶绿素则随干旱程度的加深而明显下降。在重度胁迫下, 5个树种的存活率大小依次为普陀樟>全缘冬青>红楠=滨柃>埃木。通过隶属函数法分析得出5个树种在中度干旱和重度干旱条件下的抗旱性顺序为普陀樟>全缘冬青>红楠>埃木>滨柃。表4参25

关键词: 树木生理学; 干旱胁迫; 生理指标; 海岛树种; 抗旱性

中图分类号: S718.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)04-0490-09

Growth and physiological characteristics of five island tree species with drought stress

CHEN Wen¹, ZHAO Ying¹, YE Zhengqian², WANG Meiqin¹, WANG Jing¹, WANG Guoming¹

(Zhoushan Forestry Academy, Zhoushan 316000, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To compare the drought-resistance of five island tree species, namely, *Ilex integra*, *Machilus thunbergii*, *Cinnamomum japonicum* var. *chenii*, *Eurya emarginata*, and *Eurya japonica*, an experiment was conducted using tree seedlings with different soil drought stress levels. Plant physiological responses to the drought stress were measured. Results showed that the root and shoot biomass decreased as drought increased, but the root-to-shoot ratios (R/S) increased first and then decreased. In addition, chlorophyll content (Chl) decreased as drought stress increased. With severe drought stress, the survival rate was *C. japonicum* var. *chenii* > *I. integra* > *M. thunbergii* = *E. emarginata* > *E. japonica*. A subordinate function used to rank drought-resistance showed: *C. japonicum* var. *chenii* > *I. integra* > *M. thunbergii* > *E. japonica* > *E. emarginata*. [Ch, 4 tab. 25 ref.]

Key words: tree physiology; drought stress; physiological characteristics; island trees; drought resistance

水分是树木生存及正常生长代谢的基础, 干旱胁迫也是植物受到的最普遍的胁迫形式之一。水分的亏缺不仅限制植物生长, 而且关系到造林的成活率。因此, 在降水较少, 土壤保水性差的立地条件下造林, 选择抗旱性强的树种是前提, 同时选择在适宜的时间给苗木供水也是造林绿化的关键。国内有关植物耐旱性的研究颇多, 大多是从植物生长生理指标等角度探讨抗旱性能。有研究认为^[1], 随着干旱胁迫程度的增加, 植株地上部分生物量和总生物量逐渐降低, 但光合产物向根部的分配比例逐渐增大, 根冠

收稿日期: 2012-07-05; 修回日期: 2012-10-30

基金项目: 浙江省重大科技专项(2010C12024); 浙江省舟山市科技计划项目(2011C13029)

作者简介: 陈闻, 助理工程师, 从事水土保持与土壤学研究。E-mail: chenwen1019@163.com。通信作者: 王国明, 高级工程师, 从事植物资源研究与开发。E-mail: km521@163.com

比也逐渐增加。李芳兰等^[2]研究表明, 幼苗叶生长对干旱胁迫反应比根更加敏感。干旱胁迫下, 幼苗具有浪费型水分利用对策, 水分利用效率随着生物量与耗水量的减小而降低。然而, 树木受到干旱胁迫后, 其水分利用效率通常会不同程度地提高^[3-4]。王新建等^[5]对豫楸1号*Catalpa bungei* ‘Yu-1’4种砧木嫁接苗的抗旱性研究表明, 当土壤含水量降到20%左右即可引起豫楸1号4种砧木嫁接苗体内游离脯氨酸的急剧升高, 而当土壤含水量降到5%左右时嫁接苗体内的游离脯氨酸急剧下降; 不同砧木的质膜透性总体上随着干旱胁迫的加剧均呈上升趋势, 直至胁迫结束。舟山作为海岛城市, 淡水资源普遍比较贫乏, 年平均降水量也较同纬度内陆城市要低200~500 mm。其中位于舟山群岛最北部的嵊泗列岛与衢山岛一线是全省最干旱地区之一, 年平均降水量仅为1 078 mm, 而年均蒸发量高达1 526 mm, 每年的7~8月出现伏旱, 9~10月表现为秋旱, 致使海岛地区季节性缺水现象严重。同时, 与内陆地区相比, 海岛地区造林立地条件较为恶劣, 诸如土壤瘠薄, 保水肥性差, 沿海地区常年海风强度大, 加速土壤水分的蒸发等客观因素都决定了海岛造林难度要远远大于内陆地区, 适林成活率也普遍较低。通常情况下造林成活率不足50%, 在干旱年份几乎无一存活。然而, 从目前国内文献来看, 涉及海岛地区造林树种抗旱性评价的研究尚少。为此, 本研究以全缘冬青*Ilex integra*等5种舟山海岛常见的造林树种为材料, 利用盆栽控水方式实现干旱胁迫, 通过定期观察苗木干旱胁迫下的形态变化及测定相关的生理指标, 运用模糊数学隶属函数值法对5种树种的抗旱性进行定量分析和评价, 旨在探明海岛地区主要造林树种的抗旱性以及为苗木培育、造林抚育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试苗木分别为全缘冬青*Ilex integra*, 普陀樟*Cinnamomum japonicum* var. *chenii*, 滨柃*Eurya emarginata*, 柃木*Eurya japonica*的1年生苗和红楠*Machilus thunbergii*的1年半生苗, 均为自然分布在舟山群岛的海岛树种, 其中全缘冬青、普陀樟、红楠为乔木, 滨柃、埃木为灌木。试验用土壤为普通圃地土。土壤基本理化性质如下: 土壤田间持水量为40.71%, 容重1.26 g·cm⁻³, pH 5.39, 有机质为13.95 g·kg⁻¹, 全氮0.87 g·kg⁻¹, 有效磷67.18 mg·kg⁻¹, 速效钾59.50 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计与处理

试验于2011年7月在舟山市林业科学研究院苗圃大棚内进行。选取生长情况良好、无病虫害且长势一致的上述5个树种的苗木各96株, 各种苗木4个处理, 8株·处理⁻¹, 3次重复, 随机区组设计。4种处理分别如下: 处理1(T1, 对照)、处理2(T2, 轻度干旱)、处理3(T3, 中度干旱)和处理4(T4, 重度干旱), 土壤含水量分别占田间持水量的75%~80%, 55%~60%, 40%~45%和30%~35%。胁迫试验开始前, 将各盆苗木浇透, 以保证土壤的水分含量基本达到饱和。利用称量法来控制各处理的土壤含水量, 以维持在各自的胁迫范围内, 隔1 d监测1次水分含量, 低于水分含量下限的补水至上限。定期观察和记录苗木的形态变化, 30 d后解除胁迫正常浇水, 并调查存活率。

1.3 测定指标与方法

试验前, 对栽培用土进行基本理化性质测定, 具体方法参照文献[6-7], 在试验第15天和第30天采集植株中下部叶片, 立即测定叶绿素、电导率、脯氨酸等指标。其中叶绿素质量分数采用丙酮乙醇浸提法^[8]; 游离脯氨酸质量浓度采用磺基水杨酸提取茚三酮比色法测定; 相对电导率采用直读电导仪测定^[9]。至年底, 将余下株数超过10株的处理, 挑选10株标准株挖起, 不足10株的处理则将剩余苗木全部挖起, 将泥土洗净, 吸干叶片表面水分, 称取地上部分和地下部分鲜质量, 放置烘箱内于65℃烘干48 h至恒量, 分别称取地上和地下2个部分的干质量, 并且计算各部分生物量、根茎比等指标。

1.4 数据处理

数据采用Excel和SPSS软件进行统计分析。抗旱性综合评价采用模糊数学隶属函数值法, 将某树种的各项抗旱指标换算成隶属函数值, 然后对各项指标的隶属函数值求平均值。平均值越大, 说明抗旱性越强。隶属函数计算公式如下: 若指标与抗旱性成正相关, 则 $z_{ij}=(x_{ij}-x_{i\min})/(x_{i\max}-x_{i\min})$; 若指标与抗旱性成负相关, 则 $z_{ij}=1-(x_{ij}-x_{i\min})/(x_{i\max}-x_{i\min})$; 上述公式中 z_{ij} 表示*i*树种*j*指标的抗旱隶属函数值, x_{ij} 表示*i*树种*j*指标的测定值, $x_{i\min}$ 和 $x_{i\max}$ 分别表示各树种中对应指标的最小值和最大值。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对5个树种苗木形态特征的影响

在干旱环境下，植物的外观形态会发生一系列的变化，持续的干旱会导致叶片下垂，干枯萎焉，甚至脱落。这些症状表现可由老叶一直蔓延至新叶，而生长较快的植物还会表现出主干倾斜，茎部顶端逐渐变褐色并转黑，最后全株死亡。从5个树种苗木的形态变化来看(表1)：胁迫至第10天时，全缘冬

表1 持续干旱胁迫对5个树种苗木形态特征的影响

Table 1 Effect of drought stress on morphological characteristics of 5 tree species

树种	处理	形态特征				
		10	15	20	25	30 d
全缘冬青	T2	3株老叶轻微下垂。	1/3叶片下垂，3株枝条顶端褐色。	10株叶片卷曲，1/3植株枝条顶部变黑。	全株叶片下垂、卷曲、焦边。	1/2植株倾斜，老叶干枯，新叶失绿。
	T3	2/3老叶轻微下垂、整体叶片下垂，1/3卷曲。	7株枝条倾斜、叶片卷曲，新叶失绿、焦边。	全部植株枝条顶端开始发黑。	全部植株倾斜，叶片枯黄，1株死亡。	
	T4	1/2植株叶片严重下垂。	全部新叶严重下垂，少数黄化，3/4植株倾斜。	全株叶片下垂、卷曲，10株老叶失绿，枝条整体倾斜。	10株老叶失绿，枝条顶端整体变黑。	叶片枯黄萎焉，有脱落，1/2植株死亡。
红楠	T2	10株老叶轻微下垂。	全部老叶下垂，少数新叶卷曲。	2株老叶干枯，新叶焦边。	1/6植株叶片干枯萎焉。	1/3植株叶片枯黄，2株上部枝条枯死。
	T3	叶片全部下垂，焦边。	2株老叶干枯，有脱落。	3株死亡，6株老叶干枯。	2/3叶片枯黄，有脱落。	19株死亡，2株上部枝条枯死。
	T4	叶片全部下垂，2株失绿、干枯。	3株老叶枯黄，有脱落。	4株上部叶片干枯萎焉，2株死亡。	7株叶片干枯、脱落，3株死亡。	2株上部枝条枯死，其余死亡。
普陀樟	T2	正常。	2株新叶下垂。	5株老叶出现下垂。	1/4植株叶片出现下垂、卷曲。	1/4植株叶片下垂，叶缘波皱状。
	T3	正常。	1/6老叶下垂、卷曲。	3株新叶卷曲、焦边，枝条顶端褐色。	4株叶片干枯，7株新叶卷曲、失绿。	2/3叶片枯黄萎焉，1株死亡。
	T4	正常。	1/4老叶下垂、卷曲。	1/2新叶卷曲、焦边，枝条顶端褐色。	2/3新叶卷曲、焦边，脱落，2/3新叶卷曲、失绿，枝条顶端发黑。	2株上部枝条枯死，7株死亡。
滨柃	T2	正常。	正常。	正常。	正常。	正常。
	T3	正常。	正常。	1/4植株叶缘波皱状，新叶下垂、焦边。	5株老叶干枯、脱落，全部新叶卷曲、黄化。	1/2叶片干枯、脱落，3株死亡。
	T4	正常。	1株新叶下垂。	1/2新叶卷曲、焦边，老叶全部下垂。	3株死亡，1/2叶片干枯、脱落。	2株上部枯死，其余死亡。
柃木	T2	正常。	正常。	2株新叶下垂，卷曲。	2株老叶出现干枯，2株死亡，1株上部枯死。	
	T3	正常。	正常。	7株叶片下垂，卷曲。	叶片全部下垂，1/2新叶卷曲，1/4老叶干枯。	2/3叶片干枯萎焉，9株死亡。
	T4	正常。	10株新叶出现下垂，2/3全株叶片下垂，卷曲。	10株新叶出现下垂，2/3全株叶片下垂，卷曲，少数老叶干枯。	1/3叶片干枯、脱落，枝条顶端发黑。	1株存活，其余死亡。

青和红楠均出现了叶片下垂, 卷曲以及失绿等症状, 并随胁迫程度的增加而加深, 受害范围也不断扩大, 而普陀樟、滨柃和柃木均表现正常。至第15天时, 全缘冬青的叶片已出现整体下垂, 枝条顶端开始变褐色; 红楠表现为新叶卷曲, 少数老叶干枯脱落; 而普陀樟也开始表现出新老叶片下垂、卷曲等受害症状; 滨柃和柃木仅在T4条件下表现出少数新叶下垂和卷曲。胁迫至第20天, 全缘冬青的T2有半数叶片卷曲, 1/3植株的枝条顶端转黑色, 而在T3条件下出现新叶失绿、焦边, 部分植株倾斜等, T4水平下植株整体倾斜; 红楠T3和T4分别有3株和2株死亡; 普陀樟T3和T4条件下枝条顶端开始变成褐色; 滨柃T3有1/4的叶片叶缘呈现波皱状, 新叶出现下垂, 焦边等症状, 而T4的受害程度也较15d时有明显加深; 柃木少数新叶开始下垂卷曲, T4受害植株的范围明显扩大。胁迫第25天时, 全缘冬青T3和T4的植株枝条顶端整体发黑; 红楠的受害范围进一步扩大; 普陀樟的T3和T4出现老叶干枯脱落, 枝条由褐色转黑等症状; 滨柃T3有5株老叶干枯脱落, 全部新叶卷曲、黄化, T4有3株死亡; 而柃木有部分叶片脱落, 枝条顶端开始转黑色。至胁迫第30天时, T2条件下仅柃木有2株死亡, 其余树种均未死亡; 而在T3条件下, 全缘冬青和普陀樟各出现1株死亡, 滨柃和柃木分别有3株和9株死亡, 红楠的死亡数最多, 达到19株。在T4条件下, 柃木的死亡数高达23株, 占到总数的95.83%; 其次是红楠和滨柃, 死亡数均为总数的91.67%; 全缘冬青有50%的植株死亡; 死亡率最低的为普陀樟, 占总数的29.17%。

2.2 干旱胁迫对5个树种苗木生物量和存活率的影响

由表2可以看出: 干旱条件下, 5个树种的地上、地下生物量以及总生物量均低于对照, 并且随胁迫程度的增加而降低, 其中全缘冬青T1的总生物量分别是T2, T3和T4的1.31倍、1.85倍和2.10倍; 普陀樟分别较对照下降6.07%, 29.47%和37.92%; 柃木3种干旱处理的降幅分别达到25.49%, 46.68%

表2 干旱胁迫对5个树种苗木生物量的影响

Table 2 Effect of drought stress on biomass of five tree species

树种	处理	地上生物量/g	地下生物量/g	根茎比/%	总干质量/g	苗高增量/cm	地径增量/mm	存活率/%
全缘冬青	T1	19.14	10.36	54.12	29.50	50.23	4.40	100.00
	T2	15.75	6.81	43.21	22.56	48.32	3.38	100.00
	T3	11.42	4.51	39.45	15.93	38.22	3.00	95.83
	T4	9.70	4.33	44.60	14.03	31.53	2.64	50.00
红楠	T1	13.26	9.02	67.98	22.28	25.04	3.50	100.00
	T2	11.28	6.72	59.57	18.00	20.23	2.91	100.00
	T3	7.48	4.09	54.65	11.57	14.72	2.40	20.83
	T4	2.54	1.11	72.84	3.65	2.53	1.55	8.33
普陀樟	T1	6.15	3.08	50.09	9.23	16.07	2.41	100.00
	T2	5.95	2.72	45.72	8.67	15.58	1.96	100.00
	T3	4.59	1.92	41.79	6.51	14.27	1.67	95.83
	T4	3.93	1.80	45.70	5.73	13.16	1.52	70.83
滨柃	T1	1.07	0.46	43.49	1.53	4.65	1.61	100.00
	T2	1.08	0.40	37.18	1.48	4.03	1.48	100.00
	T3	0.58	0.20	35.17	0.78	3.04	0.95	87.50
	T4	0.14	0.07	51.85	0.21	0.14	0.32	8.33
柃木	T1	2.25	0.77	34.18	3.02	12.59	2.16	100.00
	T2	1.51	0.74	36.43	2.25	9.20	1.59	91.67
	T3	1.13	0.48	36.70	1.61	9.08	1.54	62.50
	T4	0.87	0.35	40.23	1.22	6.80	1.47	4.17

和59.60%，而红楠和滨柃的T4处理较其对照降幅最大，分别高达510.41%和628.57%。5种树种的苗高和地径增量随着胁迫程度的加大而递减，这是因为干旱胁迫抑制了植物的高生长和地径生长，在水分亏缺条件下，植物不能从土壤当中吸收足够的水分以提供其自身生长所需，从而致使各种受害症状的产生，生物量下降。

从根茎比的变化来看，全缘冬青和普陀樟的根茎比始终小于对照，但3种干旱处理的根茎比则随着胁迫程度的加大而升高，其中全缘冬青T4分别是T2和T3的1.03倍和1.13倍；普陀樟的T4是T3的1.09倍，这一方面表明由于随着胁迫强度的加大，苗木逐渐改变了根茎生物量的分配比例，把更多养分用于地下部分的生长，以获取更多水分来适应土壤的干旱环境，提高自身的生存能力；另一方面可能是全缘冬青和普陀樟属于乔木，因胁迫受害导致叶片失水脱落引起生物量下降所产生的差异被乔木本身地上部分生物量大这一特性所掩盖。而从红楠、滨柃和柃木的变化来看，T4下的根茎比要高于对照，分析其原因应该跟这3个树种叶片脱落情况严重，死亡率高等因素有关。这一点从其症状表现也可以得到验证。

从5个树种的存活率来看：在T2条件下，只有柃木出现2株死亡。T3条件下，5种树种均出现死亡现象，全缘冬青和普陀樟的存活率最高，为95.83%；滨柃和柃木其次，分别为87.50%和62.50%；红楠的存活率最低，仅为20.83%。T4情况下5种树种的存活率较T3大幅下降，由高到低依次为普陀樟>全缘冬青>红楠=滨柃>柃木。

2.3 干旱胁迫对5个树种苗木生理特性的影响

2.3.1 干旱胁迫对脯氨酸的影响 脯氨酸被认为是植物体内的渗透调节剂，在正常情况下，植物体内

表3 干旱胁迫对5个树种苗木生理特性的影响

Table 3 Effect of drought stress on physiological characteristics of 5 tree species

树种	处理	脯氨酸/(mg·L ⁻¹)		叶绿素/(mg·g ⁻¹)		相对电导率/%	
		15	30	15	30	15	30 d
全缘冬青	T1	1.78 ± 0.22 b	2.66 ± 0.85 b	2.68 ± 0.35 a	2.57 ± 0.11 a	12.08 ± 3.75 b	12.86 ± 1.19 c
	T2	3.18 ± 1.08 a	3.86 ± 0.33 a	2.39 ± 0.13 a	1.79 ± 0.12 b	15.47 ± 1.30 b	16.80 ± 1.39 c
	T3	2.58 ± 0.10 a	3.06 ± 0.52 a	1.93 ± 0.12 b	1.69 ± 0.15 b	19.75 ± 0.83 ab	25.00 ± 4.44 b
	T4	2.70 ± 0.73 a	3.19 ± 1.11 a	1.70 ± 0.16 b	1.68 ± 0.22 b	26.36 ± 8.27 a	37.32 ± 1.44 a
红楠	T1	2.68 ± 0.38 c	2.69 ± 0.54 c	1.74 ± 0.30 a	1.42 ± 0.01 a	11.91 ± 1.32 b	12.10 ± 1.49 b
	T2	2.38 ± 0.58 c	11.74 ± 2.46 b	1.64 ± 0.23 ab	1.28 ± 0.27 ab	14.03 ± 0.90 ab	13.74 ± 0.51 ab
	T3	4.94 ± 1.78 b	16.76 ± 4.22 b	1.42 ± 0.27 b	1.23 ± 0.20 b	15.52 ± 2.10 ab	16.98 ± 1.24 ab
	T4	16.01 ± 6.38 a	23.41 ± 2.67 a	1.17 ± 0.15 c	1.12 ± 0.08 c	17.19 ± 2.66 a	18.76 ± 2.46 a
普陀樟	T1	6.15 ± 1.55 c	11.62 ± 1.12 c	2.57 ± 0.32 a	2.30 ± 0.27 a	11.55 ± 1.88 c	11.06 ± 2.53 c
	T2	4.69 ± 1.62 bc	15.20 ± 0.76 bc	2.44 ± 0.52 a	2.06 ± 0.73 a	13.38 ± 0.55 bc	14.73 ± 1.18 bc
	T3	12.86 ± 5.79 ab	20.24 ± 2.55 ab	2.15 ± 0.37 b	1.62 ± 0.53 b	15.84 ± 1.03 b	18.04 ± 1.66 ab
	T4	18.05 ± 7.23 a	24.36 ± 6.44 a	1.78 ± 0.02 c	1.31 ± 0.32 c	19.60 ± 1.86 a	21.12 ± 1.97 a
滨柃	T1	0.53 ± 0.37 b	1.48 ± 0.27 b	1.61 ± 0.15 a	1.49 ± 0.14 a	11.29 ± 0.70 c	11.14 ± 1.93 b
	T2	0.92 ± 0.31 ab	1.57 ± 0.05 ab	1.49 ± 0.35 b	1.36 ± 0.07 b	12.05 ± 0.51 bc	13.27 ± 5.57 b
	T3	1.19 ± 0.19 a	1.62 ± 0.59 a	1.42 ± 0.12 b	1.18 ± 0.12 c	13.07 ± 0.66 b	14.26 ± 2.05 b
	T4	1.23 ± 0.20 a	1.81 ± 0.08 a	1.40 ± 0.05 b	1.21 ± 0.20 c	21.47 ± 1.17 a	24.71 ± 2.64 a
柃木	T1	1.32 ± 0.12 b	2.38 ± 0.30 b	2.28 ± 0.36 a	2.03 ± 0.15 a	13.16 ± 3.08 b	14.34 ± 4.08 b
	T2	1.89 ± 0.35 ab	2.30 ± 0.19 b	2.15 ± 0.16 a	1.83 ± 0.20 b	14.13 ± 1.53 b	16.35 ± 0.90 b
	T3	2.03 ± 0.54 a	2.53 ± 0.51 a	1.96 ± 0.02 b	1.93 ± 0.08 ab	16.68 ± 1.16 b	18.78 ± 1.88 b
	T4	2.04 ± 0.47 a	2.82 ± 0.45 a	1.79 ± 0.01 b	1.70 ± 0.35 b	23.30 ± 4.57 a	28.52 ± 4.45 a

说明：表中同一列数后注有不同英文字母者为达到新复极差检验5%显著水平($P<0.05$)。

的脯氨酸处于较低水平, 但当遭受干旱胁迫时, 便会迅速积累^[10-11]。因此, 脯氨酸的增加也可以看作是植物抵御干旱的一种方式。由表3可知: 5个树种的脯氨酸随干旱程度的增加而增加, 且显著高于对照。通过方差分析结果表明: 全缘冬青3种处理之间并没有显著差异; 而红楠和普陀樟的3种处理之间表现出显著差异。在T2条件下, 滨柃和柃木均未与对照产生显著差异, 3种干旱处理的差异性也不显著, 但T3和T4下的脯氨酸要显著高于T1。从脯氨酸的增幅来看, 以红楠为最高, 其T4情况下的15 d和30 d脯氨酸分别达 $16.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $23.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是其对照的5.97倍和8.70倍。从胁迫15 d至胁迫30 d, 5个树种的脯氨酸随胁迫时间的延长均有不同程度的提高。

2.3.2 干旱胁迫对叶绿素的影响 叶绿素是植物进行光合作用的色素。干旱胁迫条件下植物叶绿素的变化, 不仅能反映出植物在胁迫环境下进行同化作用的能力, 而且还被看作植物受到干旱胁迫的敏感指示因素^[12-13]。由叶绿素的变化规律可知(表3): 5个树种叶绿素均随干旱程度的加深和干旱时间的延长而下降。至试验结束为止, 5个树种叶绿素的最大降幅分别为普陀樟43.04%, 全缘冬青34.63%, 红楠21.13%, 滨柃18.79%和柃木16.26%。叶绿素的下降表明5个树种苗木对干旱环境的敏感性, 而从叶绿素降幅的大小可以看出, 柃木在重度干旱环境下较其他树种具备更强的能力避免光合机构受到损害。方差分析的结果表明: 5个树种在干旱条件下的叶绿素均显著低于对照($P<0.05$), 而3种干旱处理之间, 红楠、普陀樟和滨柃达到了显著差异, 全缘冬青和柃木的差异性并不显著。

2.3.3 干旱胁迫对相对电导率的影响 叶片相对电导率可以用来表征植物的质膜透性, 反映了植物组织在干旱环境下的受损程度, 因而也被认为是植物受害的敏感指标^[14-15]。从相对电导率的变化可以看出(表3): 随着干旱程度的加剧, 5个树种相对电导率呈急剧上升趋势。至胁迫30 d时, 全缘冬青叶片相对电导率增幅达到最大, 为190.20%; 滨柃、柃木和普陀樟分别为121.81%, 98.89%和90.96%; 增幅最小的是红楠, 为55.04%。方差分析的结果显示, 全缘冬青、普陀樟、滨柃和柃木在T4条件下, 相对电导率显著($P<0.05$)高于T2, T3及对照, 而红楠在T4条件下与对照的显著性差异($P<0.05$), 而3种干旱处理间并未达到显著差异水平($P<0.05$)。

2.4 抗旱性综合评价

植物抗旱性是一个由多因素控制的复杂性状, 利用某一指标单独评价树种的抗旱能力有很大的局限性。模糊数学隶属函数法是目前被普遍应用于树种抗旱性评价的一种方法, 它是将多个指标的具体测定值转换成隶属值, 用这些隶属值的平均值来评价树种的抗旱能力, 尽可能的减少了单因子评价法所带来的片面性, 从而得出较为科学的结论^[16-18]。

本研究从树种的形态和生理特性方面入手选择了与抗旱性相关的7个指标, 通过隶属函数将各指标的测定值转换成隶属函数值并进行累加, 取平均数进行树种间的比较, 平均隶属值越大, 说明树种的抗旱性越强。对5个树种的平均隶属函数值进行排序得到表4。表4表明: 在T3和T4条件下, 5种树种的抗旱能力从高到低依次为普陀樟>全缘冬青>红楠>柃木>滨柃。

表4 5个树种苗木各指标隶属函数值及抗旱性综合评价

Table 4 Function value of subordination and synthetical evaluation on drought-resistance of 5 tree species

处理	树种	苗高增量+	地径增量+	根茎比+	存活率+	叶绿素+	脯氨酸+	相对电导率-	综合隶属值	抗旱顺序
T3	全缘冬青	1.00	1.00	0.22	1.00	0.68	0.08	0.00	0.57	2
	红楠	0.33	0.71	1.00	0.00	0.07	0.81	0.75	0.52	3
	普陀樟	0.32	0.35	0.34	1.00	0.59	1.00	0.65	0.61	1
	滨柃	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	1.00	0.27	5
	柃木	0.16	0.24	0.38	0.56	1.00	0.05	0.58	0.42	4
T4	全缘冬青	1.00	1.00	0.38	0.69	0.97	0.06	0.00	0.59	2
	红楠	0.08	0.53	0.31	0.06	0.00	0.96	0.75	0.38	3
	普陀樟	0.42	0.52	0.47	1.00	0.33	1.00	0.65	0.63	1
	滨柃	0.00	0.00	1.00	0.06	0.16	0.00	1.00	0.31	5
	柃木	0.21	0.50	0.00	0.00	1.00	0.04	0.54	0.33	4

说明: “+”表示抗旱指标与抗旱性成正相关, “-”表示指标与抗旱性成负相关。

3 讨论与结论

植物在持续干旱环境下的存活率是反映其抗旱能力的一个最直观的指标。本研究的结果表明，在T3条件下，全缘冬青和普陀樟各出现1株死亡，滨柃和柃木仅有少数死亡，而红楠的死亡数为最多；在T4条件下，柃木的死亡率高达95.83%，红楠和滨柃为91.67%，全缘冬青和普陀樟分别为50.00%和29.17%。从出现死亡现象的时间来看，红楠和柃木在T2条件下持续30 d已经出现死亡；全缘冬青、普陀樟在T3情况下持续30 d才出现死亡现象。因此，从死亡率及出现死亡现象的时间来看，全缘冬青和普陀樟的抗干旱能力要比其他树种更强。

5个树种的高生长和地径生长，地上和地下部分生物量随着胁迫程度的增加而持续下降；根茎比呈现先降后升的态势。这是因为随着水分亏缺程度的加重，苗木开始改变根茎生物量的分配比例，红楠、滨柃和柃木在T4条件下根茎比超过了T1，这点应归功于在重度胁迫下，叶片脱落数量较多，导致地上部分生物量明显减少，而使根茎比额外增大。这也与陈诗等^[19]的研究结果相吻合。

有关干旱胁迫环境下脯氨酸积累的过程，已有的研究提出了2种不同的看法：一种是脯氨酸的积累可以看作是植物对逆境的积极响应；另一种则认为脯氨酸在细胞内大量积累可能是由于细胞结构遭受损伤所致。而目前有关逆境下脯氨酸的积累效应也存在2种不同的观点：一种观点认为随着干旱胁迫程度的加深，脯氨酸含量增加^[20-21]；而另一种观点则认为，虽然脯氨酸的积累有助于缓解干旱带来的伤害，但这种缓解能力是有限的，在脯氨酸达到峰值后呈下降趋势^[22]。本研究中5个海岛树种随着干旱程度的加重和干旱时间的延长，脯氨酸呈上升的趋势。以不同干旱处理下脯氨酸的增幅来比较，5个树种的抗旱性顺序从高到低依次为红楠>普陀樟>全缘冬青>柃木>滨柃。

干旱胁迫下植物的光合速率会显著下降，从而阻碍植物干物质的积累，导致生物量下降；而相对电导率反映了植物在干旱环境中质膜的受损程度，也是评价植物抗旱能力的重要指标之一^[23-24]。随着干旱胁迫程度的增强，5个树种叶片叶绿素明显下降，并且随着胁迫时间的推移也呈递减的趋势。5个树种叶绿素降幅最大的为普陀樟达到43.04%，最小的是柃木，为16.26%，说明柃木在重度干旱环境下较其他树种具备更强的能力避免光合机构受到损害。在T4条件下，5个树种的质膜受损程度均达到了最大，整个试验过程，全缘冬青的电导率变幅最大，而红楠的电导率变化最小。全缘冬青、普陀樟、滨柃和柃木4个树种不同处理间的差异达到显著水平，而红楠不同处理间的差异并不显著。这表明全缘冬青、普陀樟、滨柃和柃木这4个树种的相对电导率对干旱程度的变化指示作用要比红楠更敏感。

从5个树种抗旱性评价结果可知：用单个指标来评价5个树种的抗旱性得到的结果有所不同，这应该是树种对各抗旱性指标的响应程度不同所致。韩艳等^[25]对5个常绿阔叶树幼苗的抗旱性研究结果表明：若以脯氨酸的累积量和累计速度来衡量植物的抗旱能力，则为大叶桂樱 *Prunus zippeliana*>红叶石楠红罗宾 *Photinia glabra* × *P. fraseri* ‘Red Robin’>石栎 *Lithocarpus glaber*>木荷 *Schima superba*>樟树 *Cinnamomum camphora*；而若以相对电导率来评价，则顺序为大叶桂樱>石栎>红叶石楠红罗宾>樟树>木荷。黄承玲等^[21]研究发现：大白杜鹃 *Rhododendron decorum* 叶片的脯氨酸对干旱的响应比迷人杜鹃 *Rhododendron agastum* 和露珠杜鹃 *Rhododendron irroratum* 迅速，在持续干旱30 d时达到峰值121.92 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，明显高于迷人杜鹃和露珠杜鹃，但同时大白杜鹃的叶片电导率也始终高于其他2种杜鹃。因此，若用单个指标来比较树种之间的抗旱性，结论不科学，而且各个指标所得到的评价结论也无法统一。

对5个海岛树种抗旱性能的研究发现：①5个树种的脯氨酸质量浓度和相对电导率随干旱程度的加大和胁迫时间的增加而升高，叶绿素质量分数和生物量则下降；根茎比的变化趋势表现为先降后升。②红楠的脯氨酸对干旱胁迫的响应较其他树种积极；普陀樟叶绿素的变化对干旱环境的指示更为敏感；全缘冬青在干旱胁迫下，质膜透性较其他树种明显增强。③用隶属函数法得到的评价结果表明：在T3和T4条件下，5个树种的抗旱能力按以下次序递减：普陀樟>全缘冬青>红楠>柃木>滨柃，与这5个树种的实际基本相符。

通过测定土壤含水量结合干旱持续的时间，针对不同的树种可制定科学的供水计划，有效防止苗木在旱期因干旱死亡。在淡水资源匮乏的小岛及沿海裸地，土壤水分是造林成活率的限制因子，因此在海

岛困难地造林过程中,首先应根据立地条件,土壤保水能力,尽可能选择抗旱性较好的树种,本试验中全缘冬青和普陀樟在干旱环境中的生长情况和存活率要优于其他3个树种;而对于抗旱性相对较弱的树种,在造林应用时应辅以保水措施,如地表覆盖、添加保水剂等来提高成活率。此外,在今后的工作中,还将对更多的海岛珍稀树种的抗旱性进行探索研究。

参考文献:

- [1] 闫海霞, 方路斌, 黄大庄. 干旱胁迫对条墩桑生物量分配和光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(12): 3365–3370.
YAN Haixia, FANG Lubin, HUANG Dazhuang. Effects of drought stress on the biomass distribution and photosynthetic characteristics of cluster mulberry [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22**(12): 3365–3370.
- [2] 李芳兰, 包维楷, 吴宁. 白刺花幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J]. 生态学报, 2009, **29**(10): 5406–5416.
LI Fanglan, BAO Weikai, WU Ning. Morphological and physiological responses of current *Sophora davidii* seedlings to drought stress [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(10): 5406–5416.
- [3] DICKMANN D I, LIU Zhijun, NGUYEN P V, et al. Photosynthesis, water relation, and growth of two hybrid *Populus* genotypes during a severe drought [J]. *Can J For Res*, 1992, **22**(8): 1094–1106.
- [4] RANNEY T G, WHITLOW T H, BASSUK N L. Response of the five temperate deciduous tree species to water stress [J]. *Tree Physiol*, 1990, **6**(4): 439–440.
- [5] 王新建, 何威, 杨淑红, 等. 豫楸1号4种砧木嫁接苗对干旱胁迫的生理响应[J]. 林业科学, 2008, **44**(5): 31–37.
WANG Xinjian, HE Wei, YANG Shuhong, et al. Physiological response to drought stress of four kinds of stocks grafted seedling of *Catalpa bungei* cl. ‘Yu-1’[J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44**(5): 31–37.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [8] 李得孝, 侯万伟, 员海燕. 玉米叶片叶绿素快速浸提方法研究[J]. 西北农林科技大学报: 自然科学版, 2006, **34**(11): 65–67.
LI Dexiao, HOU Wanwei, YUN Haiyan. Fast-soaking methods of chlorophyll from maize leaf [J]. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For Nat Sci Ed*, 2006, **34**(11): 65–67.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 王改萍, 岑显超, 彭方仁, 等. 不同楸树品种的抗旱性鉴定[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26**(6): 815–821.
WANG Gaiping, CEN Xianchao, PENG Fangren, et al. Drought resistance in seedlings of *Catalpa bungei* cultivars [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(6): 815–821.
- [11] 燕平梅, 章艮山. 水分胁迫下脯氨酸的累积及其可能的意义[J]. 太原师范专科学校学报, 2000(4): 27–28.
YAN Pingmei, ZHANG Genshan. Water stress on proline accumulation and its possible significance [J]. *J Taiyuan Teach Coll*, 2000(4): 27–28.
- [12] KAISER W M. Effects of water deficit on photosynthetic capacity [J]. *Plant Physiol*, 2006, **71**(1): 142–149.
- [13] HARRISON R D, DANIELL J W, CHESHIRE J R. Net photosynthesis and conductance of peach seedlings and cutting in responses to change in soil water potential to salinity [J]. *J Am Soc Hort Sci*, 1989, **114**: 986–990.
- [14] 梅俊学. 逆温下发菜脯氨酸含量及质膜透性的变化与含水量的关系[J]. 山东师大学报: 自然科学版, 2000, **15**(2): 178–181.
MEI Junxue. The change of proline content and plasma membrane permeability of dry and wet *Nostoc flagelliforme* in temperature inversion [J]. *J Shandong Norm Univ Nat Sci*, 2000, **15**(2): 178–181.
- [15] 李继新, 丁福章, 袁有波. 不同强度干旱胁迫对烤烟叶片质膜透性和丙二醛含量的影响[J]. 贵州农业科学, 2008, **36**(4): 34–35.
LI Jixin, DING Fuzhang, YUAN Youbo. Effects of different drought stress on malondialdehyde content and cell membrane permeability in tobacco leaves [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2008, **36**(4): 34–35.
- [16] 贾万利, 苗海霞, 孙明高, 等. 6种苗木抗旱性评价指标分析[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2007, **38**(2): 163–168.

- JIA Wanli, MIAO Haixia, SUN Minggao, et al. Comprehensive assessment of drought resistance of six tree species seedlings [J]. *J Shandong Agric Univ Nat Sci*, 2007, **38**(2): 163 – 168.
- [17] 杨俊, 马健, 王婷婷, 等. 5种荒漠植物抗旱性及其抗旱指标相关性的定量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(6): 143 – 146.
- YANG Jun, MA Jian, WANG Tingting, et al. The quantitative evaluation on drought-resistance and its relationship with drought resistance indexes of five desert plants [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2009, **23**(6): 143 – 146.
- [18] 李禄军, 蒋志荣, 李正平, 等. 3树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(6): 253 – 254.
- LI Lujun, JIANG Zhirong, LI Zhengping, et al. Comprehensive evaluation on drought-resistance of three tree species and the choice of drought-resistance indexes [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2006, **13**(6): 253 – 254.
- [19] 陈诗, 和亚君, 代兴涛, 等. 水分胁迫对赤桉苗木生长及生物量的影响和评价[J]. 山东林业科技, 2009(3): 16 – 19.
- CHEN Shi, HE Yajun, DAI Xingtao, et al. Effect and evaluation of water stress on the growth and biomass of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh seedling [J]. *J Shandong For Sci Technol*, 2009(3): 16 – 19.
- [20] 徐莲珍, 蔡靖, 姜在民, 等. 水分胁迫对3种苗木叶片渗透调节物质与保护酶活性的影响 [J]. 西北林学院学报, 2008, **23**(2): 12 – 14.
- XU Lianzhen, CAI Jing, JIANG Zaimin, et al. Effects of water stress on osmotic adjustment and activity of protect enzymes in the leaves of three sorts of seedlings [J]. *J Northwest For Univ*, 2008, **23**(2): 12 – 14.
- [21] 黄承玲, 陈训, 高贵龙. 3种高山杜鹃对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J]. 林业科学, 2011, **47**(6): 48 – 55.
- HUANG Chengling, CHEN Xun, GAO Guilong. Physiological response of seedlings of three azalea species of drought stress and evaluation of drought resistance [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(6): 48 – 55.
- [22] 喻晓丽, 邸雪颖, 宋丽萍. 水分胁迫对火炬树幼苗生长和生理特性的影响[J]. 林业科学, 2007, **43**(11): 58 – 62.
- YU Xiaoli, DI Xueying, SONG Liping. Effects of water stress on the growth and eco-physiology of seedlings of the *Rhus typhina* [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43**(11): 58 – 62.
- [23] REUVENI J, GALE J, ZERONI M. Differentiating day from night effects of high ambient CO₂ on the gas exchange and growth of *Xanthium strumarium* L. exposed to salinity stress [J]. *Ann Bot*, 1997, **79**(2): 191 – 196.
- [24] GRIFFITHS H, PARRY M A J. Plant responses to water stress [J]. *Ann Bot*, 2002, **89**(7): 801 – 802.
- [25] 韩艳, 林夏珍. 5种常绿阔叶树幼苗的抗旱性比较[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26**(6): 822 – 828.
- HAN Yan, LIN Xiazen. Drought resistance in seedlings of evergreen broadleaf tree species [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(6): 822 – 828.