

洪文君,徐瑞晶,魏依娜,等.干旱胁迫对圆叶乌桕和毛果巴豆幼苗生长、形态和生理特性的影响[J].华南农业大学学报,2015,36(1):79-84.

干旱胁迫对圆叶乌桕和毛果巴豆幼苗生长、形态和生理特性的影响

洪文君, 徐瑞晶, 魏依娜, 何妙坤, 庄雪影

(华南农业大学 林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】为华南石灰岩地区植被恢复的树种选择及人工造林提供理论依据。【方法】应用温室盆栽生长法,通过不同浇水频度控制干旱条件,并用常规方法测定各项指标。【结果和结论】在干旱胁迫条件下,圆叶乌桕 *Triadica rotundifolia* 和毛果巴豆 *Croton lachnocarpus* 的苗高净生长量分别比对照减少 2% ~ 5% 和 8% ~ 10%, 基径净生长量增加 17% ~ 35% 和 10% ~ 30%;随着干旱胁迫的加剧,2 种植物幼苗的地上部和地下部生物量、根冠比均呈现下降趋势。生理检测结果表明,圆叶乌桕苗木的可溶性蛋白含量、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量均低于毛果巴豆;2 种植物苗木的可溶性蛋白含量和 POD 活性对干旱胁迫的响应比较敏感,但 SOD 活性和 MDA 含量对干旱胁迫的响应变化不明显。茎部解剖结构比较结果表明,2 种植物在茎部皮层、韧皮部、木质部和髓部比例存在较大的差异,干旱胁迫会导致其木质部与髓部厚度比值增加,反映了 2 个树种可通过增加木质部与髓部结构来适应干旱胁迫。模糊隶属函数值分析结果表明,无论是轻度干旱,还是中度和重度干旱,圆叶乌桕的耐旱能力均强于毛果巴豆,其生理指标和茎部结构对于干旱胁迫响应的不同反映了其耐干旱胁迫机制存在差异。

关键词:干旱胁迫; 幼苗生长; 形态解剖; 生理响应; 圆叶乌桕; 毛果巴豆

中图分类号:S718.43 文献标志码:A 文章编号:1001-411X(2015)01-0079-06

Seedling growth, morphology and physiological characteristics of *Triadica rotundifolia* and *Croton lachnocarpus* under drought stress

HONG Wenjun, XU Ruijing, WEI Yina, HE Miaokun, ZHUANG Xueying
(College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】Seedling growth, morphology and physiological characteristics of *Triadica rotundifolia* and *Croton lachnocarpus* were investigated under drought stress to provide scientific basis for species selection and artificial reforestation in the limestone region of South China. 【Method】Pot culture experiment was applied in this study to simulate drought stress by watering frequency. The physiological indicators were measured with conventional methods. 【Result and conclusion】The results showed that height growth of *T. rotundifolia* and *C. lachnocarpus* declined by 2% - 5% and 8% - 10% respectively, while basal diameter growth increased by 17% - 35% and 10% - 30% respectively under drought stress. Seedling aboveground biomass, underground biomass, total biomass, and root-shoot ratio could be enhanced by light drought stress, but they declined with the increase of drought stress. Results of physiological examination showed that the soluble protein content, peroxidase (POD) activity, activity of superoxide dismutase (SOD), and malondialdehyde (MDA) content varied with species and drought stress. Soluble protein content and POD activity were more sensitive than the activity of SOD and MDA content. Comparison of the stem anatomical structure showed that there were differences in the structure of cortex, phlo-

em, xylem and marrow. Drought would result in increasing ratio of xylem and marrow, which indicated that they could adapt to drought stress by adjusting xylem and marrow structure. Analyses of subordinate functions showed that the drought tolerance of *T. rotundifolia* were higher than that of *C. lachnocarpus* under various drought stresses. They may possess different resistance mechanisms to drought stress based on their difference in physiological responses and stem anatomical structures.

Key words: drought stress; seedling growth; morphology; physiological response; *Triadica rotundifolia*; *Croton lachnocarpus*

石灰岩山地土层浅薄,储水能力差,是限制植物生长的重要因素^[1].然而,在石灰岩特殊生境中却拥有丰富的特有植物类群^[2-5],那些石灰岩特有种是如何适应石灰岩干旱瘠薄环境的?认识石灰岩特有种耐旱生态学特性可为石灰岩退化山地植被恢复的树种选择提供科学依据.近年有关石灰岩植物生理生态特性的研究已受到关注^[6-10].莫凌等^[7]比较研究了西南喀斯特地区红背山麻杆 *Alchornea trewioides* 和圆叶乌柏 *Triadica rotundifolia* 等 4 种植物的水分特征,发现圆叶乌柏的各项测定指标均居于中间.张中峰等^[8]比较研究了红背山麻杆和圆叶乌柏物等 4 种植物对光与水分的适应能力,揭示了圆叶乌柏拥有较高的光饱和点,对光的利用能力较强,但其水分利用效率较低.

圆叶乌柏和毛果巴豆 *Croton lachnocarpus* 均为自然分布于粤北石灰岩山区特有的大戟科 (*Euphorbiaceae*) 植物.其中,圆叶乌柏自然分布于我国广东、广西、贵州、湖南、云南以及越南北部的石灰岩地区^[11],毛果巴豆为我国特有种,生长于华南地区海拔 30 ~ 800 m 山地疏林下林缘或灌丛中^[12].本研究应用盆栽生长试验法,比较研究了不同干旱条件对圆叶乌柏和毛果巴豆生长、茎部形态及生理生化特性的影响,拟为华南石灰岩地区植被恢复的树种选择及人工造林提供理论科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广州市天河区华南农业大学树木园 (113°18'26"E、23°06'26"N).广州市地处亚热带季风区,年平均气温 21.8 ℃,年平均降雨量 1 623.6 ~

1 899.8 mm.

1.2 材料及试验设计

供试种子采自广东省清远市清新区白湾石灰岩次生林.随采随播育苗,2013 年 6 月移栽入盆中,育苗容器为营养袋,规格为 18 cm × 16 cm(直径 × 高),以 V(黄心土):V(河砂):V(有机质) = 2:1:1 作为基质,每盆 1 株,并保持一致的日常生长管理.试验前测量苗高和基径,作为基础生长量(表 1).每隔 30 d 记录成活率,测量苗高和基径;90 d 时完成试验,统计成活率,并进行生物量、生理指标及茎部解剖研究.

表 1 2 种供试植物的苗木基本情况

Tab. 1 Seedling sizes of two species for experiments

处理组	圆叶乌柏		毛果巴豆	
	苗高/cm	基径/mm	苗高/cm	基径/mm
对照(CK)	25.2 ± 1.65	3.5 ± 0.12	44.6 ± 1.11	2.4 ± 0.05
T1	25.4 ± 1.53	3.4 ± 0.18	46.3 ± 2.34	2.3 ± 0.04
T2	25.3 ± 0.98	3.3 ± 0.08	44.4 ± 2.93	2.4 ± 0.06
T3	25.8 ± 1.44	3.2 ± 0.16	46.8 ± 2.00	2.6 ± 0.08

1)表中数据为平均值 ± 标准差.

供试土壤的平均田间持水量为 (25.78 ± 6.25)%,平均容重为 (1.26 ± 0.12)g · cm⁻³.采用盆栽控水法设置了 4 个梯度的干旱试验.每个试验组设 3 个重复,每个重复 5 株幼苗.试验前先浇透所有参试植株,然后对照组 (CK) 和轻度干旱 (T1)、中度干旱 (T2)、重度干旱 (T3) 处理组分别按间隔 1、3、6、9 d 的浇水频度进行循环控水,使其土壤含水量及占田间持水量的比例达到并保持在表 2 所示的范围之内.试验时间为 90 d.

表 2 2 种植物不同干旱处理组苗木的土壤含水量

Tab. 2 Soil moisture of two species under different drought treatments

处理组	浇水间隔 时间/d	圆叶乌柏		毛果巴豆	
		土壤含水量/%	占田间持水量的比例/%	土壤含水量/%	占田间持水量的比例/%
CK	1	25.6 ~ 29.5	99.4 ~ 114.4	27.5 ~ 29.4	106.7 ~ 114.1
T1	3	20.3 ~ 23.2	78.8 ~ 90.0	18.5 ~ 21.2	71.8 ~ 82.3
T2	6	14.6 ~ 16.5	56.7 ~ 64.1	13.1 ~ 14.3	50.8 ~ 55.5
T3	9	10.8 ~ 12.1	41.9 ~ 47.0	10.3 ~ 11.2	40.0 ~ 43.5

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤含水量 用土壤水分探测仪(型号 FOM,厂家 Easttest)测定土壤的体积含水量. 土壤含水量 = 体积含水量/土壤容重 × 100%.

1.3.2 幼苗存活率 按下式统计幼苗的存活率:存活率 = (处理后存活苗数/处理前存活苗数) × 100%.

1.3.3 幼苗生物量检测 幼苗经 105 ℃ 烘箱中烘 15 min 杀青后,置于 70 ℃ 烘干 24 h,测定地上部、地下部生物量和总生物量,并计算根冠比(植株地下部生物量/地上部生物量).

1.3.4 可溶性蛋白质量分数的测定 利用考马斯亮蓝 G-250 法^[13]测定可溶性蛋白质量分数(单位: mg · g⁻¹).

1.3.5 保护性酶活性测定 过氧化物酶(POD)活性(单位:U · g⁻¹ · min⁻¹)采用愈创木酚法测定^[13];超氧化物歧化酶(SOD)活性(单位:U · g⁻¹):采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定^[13].

1.3.6 丙二醛(MDA)含量测定 采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定 MDA 的质量摩尔浓度(单位: μmol · g⁻¹)^[13].

1.3.7 茎部解剖试验 选取经 90 d 处理后苗木基茎处一段,用 FAA 固定液(用体积分数为 70% 的乙醇溶液配制)固定,滑走切片法制片,切片厚度为 30 μm,番红固绿染色,中性树胶封片.采用 Motic Images Plus 3.0 图像分析软件测量,每个测量指标重复 20 次,求平均值.

1.4 数据分析

采用模糊隶属函数法对圆叶乌柏和毛果巴豆抗旱能力进行综合评定^[14].

$$X(u) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}),$$
式中: $X(u)$ 为某一植物在某一处理下的隶属函数值; X 为该植物在该处理下的平均测定值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为所有参试植物在该处理下平均测定值中的最大值和最小值.

采用 Microsoft excel 2003 和 SPSS19.0(Statistical product and service solutions)分析软件进行数据处理与统计分析.

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对幼苗成活率的影响

供试苗木在不同干旱条件下生长 90 d 后,圆叶乌柏所有处理组苗木成活率均为 100%;毛果巴豆 CK 组和 T1 处理组苗木成活率为 100%,而 T2 和 T3 处理组个别植株出现老叶枯萎、凋落和生长缓慢,甚至出现死亡,成活率分别为 73.3% 和 80.0%.

2.2 干旱胁迫对幼苗生长量的影响

生长检测结果表明,在干旱胁迫处理 90 d 时,干旱胁迫组苗木的平均苗高净生长量小于 CK 组;随着干旱胁迫强度的增加,苗高净生长量呈下降趋势,但胁迫组苗木基径平均净生长量大于 CK 组(表 3). 方差分析结果表明,圆叶乌柏干旱胁迫组与 CK 组的苗高净生长量差异不明显,而 T1 处理组的基径净生长量与 CK 组的差异达到显著水平;毛果巴豆各干旱胁迫组与 CK 组苗高净生长量的差异达到显著水平,T2 处理组与 CK 组苗木基径净生长量的差异达到显著水平.

表 3 2 种植物不同干旱处理组苗木的净生长量比较¹⁾
Tab. 3 Seedling growth of two species under different drought treatments

处理组	圆叶乌柏净生长量		毛果巴豆净生长量	
	苗高/cm	基径/mm	苗高/cm	基径/mm
CK	2.81 ± 0.37a	2.11 ± 0.07b	6.02 ± 1.42a	1.65 ± 0.14b
T1	2.79 ± 0.89a	2.98 ± 0.34a	3.03 ± 2.04b	1.83 ± 0.17b
T2	2.07 ± 0.55a	2.60 ± 0.25ab	2.53 ± 2.01b	2.82 ± 0.23a
T3	2.02 ± 0.55a	2.75 ± 0.16ab	2.17 ± 1.17b	2.60 ± 0.40ab

1) 同列数据后凡具有一个相同小写英文字母者,表示在 0.05 水平上差异不显著(Duncan's 法).

2.3 干旱胁迫对幼苗生物量的影响

生物量测定结果表明,T1 处理组有利于 2 种植物幼苗的地上部和地下部生物量增长,但 T3 处理组对其地上部和地下部生物量增长有抑制作用. 随着干旱胁迫的加强,2 种植物幼苗的总生物量和根冠比均呈下降趋势. 方差分析结果显示,圆叶乌柏 T1 处理组与其他组幼苗总生物量的差异达到显著水平,但不同试验组间幼苗根冠比的差异未达到显著水平(表 4);而毛果巴豆不同组间苗木总生物量的差异均不显著,但 CK 组苗木的根冠比明显小于干旱胁迫组(表 4).

2.4 干旱胁迫对幼苗可溶性蛋白含量的影响

由图 1A 可知,圆叶乌柏的可溶性蛋白含量明显低于毛果巴豆. 干旱胁迫导致 2 种苗木可溶性蛋白含量下降. 随着胁迫程度的加剧,圆叶乌柏不同干旱胁迫组间的可溶性蛋白含量未出现明显变化;但毛果巴豆不同干旱胁迫组间的变化显著,T1 处理组胁迫时显著下降,T2 处理组胁迫时达到最大,T3 处理组胁迫时又下降,各试验组间差异达到统计学的显著性水平.

2.5 干旱胁迫对幼苗 POD 和 SOD 活性的影响

圆叶乌柏整体的 POD 活性低于毛果巴豆(图 1B). 干旱胁迫导致 2 种苗木 POD 活性的增加. 圆叶乌柏体内 POD 活性以 T1 处理组最高,随着胁迫的加

剧呈现轻微下降;而毛果巴豆 POD 活性则随着干旱胁迫程度的增加呈逐渐上升趋势,以 T3 处理组的 POD 活性最高,且与 CK 组的差异达到统计学显著性水平.

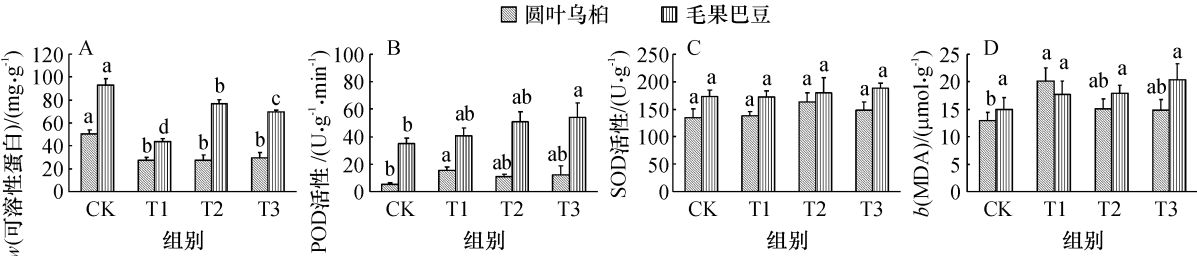
表 4 2 种植物不同干旱处理组苗木的生物量和根冠比¹⁾

Tab.4 Biomass and root shoot ratio of two species under different drought treatments

处理组	圆叶乌桕				毛果巴豆			
	生物量/g			根冠比	生物量/g			根冠比
	地上部	地下部	总生物量		地上部	地下部	总生物量	
CK	7.37 ± 0.84a	2.94 ± 1.08a	10.31 ± 1.89b	0.40 ± 0.11a	8.36 ± 0.82a	3.12 ± 0.20a	11.48 ± 1.11a	0.37 ± 0.03c
T1	9.37 ± 1.27a	5.06 ± 0.30a	14.43 ± 1.47a	0.54 ± 0.06a	8.23 ± 1.78a	5.58 ± 1.80a	13.81 ± 2.32a	0.67 ± 0.08a
T2	7.19 ± 1.20a	3.33 ± 0.45a	10.52 ± 1.38b	0.46 ± 0.07a	7.56 ± 2.35a	4.18 ± 1.14a	11.84 ± 2.56a	0.55 ± 0.03ab
T3	7.09 ± 1.07a	2.88 ± 0.12a	9.97 ± 1.08b	0.40 ± 0.05a	6.08 ± 1.53a	3.07 ± 1.39a	9.15 ± 1.39a	0.49 ± 0.11b

1) 同列数据后凡具有一个相同小写英文字母者,表示在 0.05 水平上差异不显著(Duncan's 法).

在干旱胁迫下,圆叶乌桕幼苗体内 SOD 活性呈现先升后降的趋势,在 T2 处理时达到峰值,但各胁迫组与 CK 组的差异不明显(图 1C);随干旱胁迫强度的增加,毛果巴豆的 SOD 活性则呈现逐渐上升的趋势,在 T3 处理时达到最大,但各胁迫组与 CK 组的差异也未达到统计学显著性水平(图 1C).



各图中,同种植物柱子上方凡具有一个相同小写字母者,表示在 0.05 水平差异不显著(Duncan's 法).

图 1 2 种植物对不同干旱胁迫的生理响应

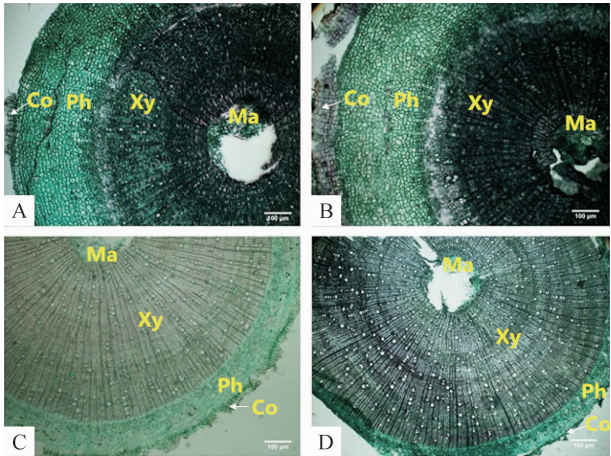
Fig.1 Physiological responses of two species to different drought stresses

2.6 干旱胁迫对幼苗 MDA 含量的影响

从图 1D 可以看出,在干旱胁迫下,2 种植物的 MDA 含量均有上升.随着胁迫的加剧,圆叶乌桕的 MDA 含量呈现先升后降的趋势,在 T1 处理时 MDA 含量显著高于 CK 组;而毛果巴豆叶片 MDA 含量随干旱胁迫强度的增加呈现逐渐上升的趋势,T3 处理时 MDA 含量达到最大,但与 CK 组的差异不明显.

2.7 2 种幼苗茎部结构的比较及对干旱胁迫的响应

比较研究了 2 种幼苗茎部的解剖结构.结果表明,2 个树种的幼苗茎部均由表皮、皮层、维管柱和髓部构成,但圆叶乌桕茎部的韧皮部厚度比例较高,而毛果巴豆则以木质部厚度比例较高(图 2).由表 5 可知,与 CK 组比较,在干旱胁迫下,圆叶乌桕和毛果巴豆苗木的皮层厚度比例均有增加,毛果巴豆随着干旱胁迫程度的增加而显著下降;圆叶乌桕幼苗 CK 组韧皮部厚度比例为 32.9%,毛果巴豆幼苗 CK 组韧皮部厚度比例仅为 17.3%,明显小于前者.在干旱条件下,圆叶乌桕的韧皮部比例增加,但毛果巴豆的韧皮部比例下降;圆叶乌桕 CK 组幼苗的木质部厚度比例为 46.5%,而毛果巴豆 CK 组幼苗的木质部厚



Ma:髓;Xy:木质部;Ph:韧皮部;Co:皮层.

A:圆叶乌桕 CK 组;B:圆叶乌桕 T3 处理组;C:毛果巴豆 CK 组;D:毛果巴豆 T3 处理组.

图 2 圆叶乌桕和毛果巴豆幼苗的基茎横切面

Fig.2 Stem anatomical structures in the seedlings of *Triadica rotundifolia* and *Croton lachnocarpus*

度比例为 69.0%,在干旱条件下,前者木质部厚度比例的变化不大,后者呈增加趋势,T2 和 T3 处理组与

CK 组的差异达到显著水平. 与 CK 组比较,2 种植物干旱胁迫组的髓部比例均有下降,但只有圆叶乌柏 T1 和 T2 组与 CK 组差异达到显著水平,毛果巴豆干旱胁迫组与 CK 组的差异未达到显著水平. 值得关注的是 2 种植物幼苗茎部的木质部/髓部比值干旱胁迫组均显著大于 CK 组,在 T1 处理组条件下,木质部/髓部比值显著升高,但随着胁迫的加强,该值又呈现下降趋势.

表 5 2 种植物不同干旱处理组苗木茎横切面各部分半径厚度比较¹⁾
Tab.5 Comparisons of stem anatomical structure of two species under different drought treatments

处理组	圆叶乌柏						毛果巴豆					
	茎半径/ mm	皮层/ 茎半径	韧皮部/ 茎半径	木质部/ 茎半径	髓/茎 半径	木质部/ 髓部	茎半径/ mm	皮层/ 茎半径	韧皮部/ 茎半径	木质部/ 茎半径	髓/茎 半径	木质部/ 髓部
CK	2.44 ± 0.06c	0.050b	0.329b	0.465a	0.156a	0.030c	1.78 ± 0.08c	0.013c	0.173a	0.690b	0.124a	0.051c
T1	3.90 ± 0.10a	0.073ab	0.374a	0.459a	0.094b	0.049a	2.02 ± 0.06c	0.054a	0.137b	0.690b	0.119a	0.065a
T2	3.66 ± 0.09a	0.065b	0.364a	0.469a	0.103b	0.046a	2.15 ± 0.11b	0.044a	0.143ab	0.709a	0.105a	0.061ab
T3	3.28 ± 0.10b	0.084a	0.336b	0.455a	0.125ab	0.036b	2.61 ± 0.08a	0.032b	0.112b	0.747a	0.110a	0.057b

1) 同列数据后凡具有一个相同小写英文字母者,表示在 0.05 水平上差异不显著(Duncan's 法).

2.8 2 种幼苗耐旱综合能力评价

植物耐旱性是受多种因素影响的复杂综合性状,应用尽可能多的指标进行综合评价,可避免和弥补单个指标评定结果的片面性,使评定结果与实际结果更为接近. 基于可溶性蛋白含量、POD 酶、SOD 酶和 MDA 含量 4 项生理指标及茎组织结构参数所进行的模糊隶属函数值综合评价结果(表 6)表明:无论是轻度干旱(T1 处理组),还是中度干旱(T2 处理组)或重度干旱(T3 处理组),圆叶乌柏的综合耐旱能力均略强于毛果巴豆.

表 6 基于模糊隶属函数值对 2 种植物耐旱性的综合评价
Tab.6 Comprehensive assessments of drought tolerance of two species based on subordinate function values

处理组	种名	隶属函数值								隶属函数 平均值	排 名
		可溶性 蛋白	POD 活性	SOD 活性	MDA 含量	茎半径	皮层/ 茎半径	髓/茎 半径	木质部/ 髓部		
T1	圆叶乌柏	0.59	0.52	0.65	0.66	0.56	0.61	0.60	0.59	0.60	1
	毛果巴豆	0.61	0.52	0.60	0.59	0.53	0.33	0.62	0.53	0.53	2
T2	圆叶乌柏	0.52	0.47	0.66	0.54	0.42	0.62	0.70	0.70	0.58	1
	毛果巴豆	0.56	0.39	0.51	0.59	0.47	0.56	0.69	0.45	0.53	2
T3	圆叶乌柏	0.58	0.48	0.74	0.35	0.50	0.42	0.47	0.50	0.50	1
	毛果巴豆	0.45	0.48	0.40	0.56	0.35	0.36	0.37	0.51	0.44	2

3 讨论

3.1 圆叶乌柏及毛果巴豆苗木对干旱胁迫的生长响应

干旱胁迫是石灰岩山地植物生长的主要限制因素. 本研究结果揭示了干旱胁迫均不利于 2 种石灰岩乡土树种的苗高生长,但其基径增粗. 这与其他耐旱植物对干旱胁迫的生长响应趋势^[15]相似. 茎部解剖结果表明,2 种苗木茎部皮层、韧皮部、木质部和髓部比例存在一定的差异,干旱胁迫条件下,2 种植物木质部与髓部厚度比值均显著增加,反映 2 个树种均可通过增加与水分输导相关的木质部与髓部比值来适应干旱胁迫.

此外,干旱胁迫条件下,2 种植物的根冠比增大,反映了它们能通过提高根冠比来适应土壤干旱环境,具有较强的自我调节能力,这与香椿 *Toona sinen-*

sis^[16]和柏木 *Cupressus funebris*^[17]等其他石灰岩适生植物对逆境的适应策略相似.

3.2 干旱胁迫对圆叶乌柏及毛果巴豆苗木生理生化特性的影响

本研究检测了 2 种苗木在干旱胁迫下的可溶性蛋白含量、POD 活性、SOD 活性和 MDA 含量的变化情况. 综合来看,2 种植物体内的可溶性蛋白含量和 POD 活性对干旱胁迫的响应比较敏感,但 SOD 活性和 MDA 含量对干旱胁迫的响应变化不明显. 可溶性蛋白是植物体内渗透调节物质之一,具有亲水胶体性质,可增强细胞的保水能力,因此其含量大小可作为评价植物耐干旱胁迫的生理指标^[18]. 干旱胁迫可导致 2 种植物可溶性蛋白含量的明显下降,但随着胁迫的强度增加,2 种植物幼苗可溶性蛋白含量变化的趋势不完全一致,反映了干旱胁迫会抑制圆叶乌柏和毛果巴豆的细胞代谢和蛋白质合成,但 2 种植物对干旱条件的生理响应和生理适应策略有差异.

SOD 和 POD 活性是评价植物耐旱性的常用指标^[19-20]. 在干旱胁迫下, 2 种植物的 POD 活性均出现上升的变化, 但圆叶乌柏以轻度干旱组最高, 而毛果巴豆的 POD 活性随着干旱胁迫程度的增加而上升, 以重度干旱组的 POD 活性最高, 反映了 2 种植物在干旱胁迫下, 均能通过提高体内 POD 酶活性, 降低体内超氧自由基水平, 减缓膜脂氧化速度和细胞的受害程度.

MDA 含量的变化是反映植物体膜脂过氧化作用的重要指标^[18]. 在干旱胁迫下, 植物 MDA 含量增幅越小, 说明抗旱性较强; 相反, MDA 含量增幅越大, 抗旱性越弱^[21]. 圆叶乌柏和毛果巴豆 MDA 含量对于干旱胁迫响应的变化趋势与 POD 活性相近, 圆叶乌柏在轻度干旱时其 MDA 含量显著高于对照组, 而毛果巴豆所有干旱胁迫组与对照组 MDA 含量的差异均未达到显著水平. 干旱胁迫可导致 2 种植物体内 MDA 含量增加, 反映了其幼苗在干旱条件下体内的细胞膜产生了不同程度的过氧化损伤, 但受损的程度不高. 圆叶乌柏体内 MDA 含量对于干旱胁迫程度的响应与石漠化造林银荆 *Acacia dealbata*、滇楸 *Catalpa fargesii* 和任豆 *Zenia insignis* 树种幼苗相近^[22], 而毛果巴豆叶片 MDA 含量对于干旱胁迫强度的响应与黄槿 *Phellodendron amurense* 幼苗^[23] 相近.

综上所述, 在干旱胁迫下, 圆叶乌柏和毛果巴豆幼苗可通过地上部与地下部生物量的分配和体内可溶性蛋白含量、保护酶活性和 MDA 含量的自我调节方式来维持植物体的正常生理代谢功能, 减轻干旱伤害, 达到适应干旱环境的目的, 均表现较强的耐旱性能. 模糊隶属函数值分析结果表明, 无论是轻度干旱, 还是中度和重度干旱, 圆叶乌柏的耐旱能力略强于毛果巴豆.

参考文献:

- [1] 容丽, 王世杰, 俞国松, 等. 荔波喀斯特森林 4 种木本植物水分来源的稳定同位素分析[J]. 林业科学, 2012, 48(7): 14-22.
- [2] 王发国, 秦新生, 陈红锋, 等. 海南岛石灰岩特有植物的初步研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(1): 45-54.
- [3] 吴静, 秦飞, 王维, 等. 我国石灰岩地区特有植物研究进展[J]. 江苏林业科技, 2010, 37(2): 50-54.
- [4] CLEMENTS R, SODDHI N S, SCHILTHUIZEN M, et al. Limestone karsts of Southeast Asia: Imperiled arks of biodiversity[J]. Bio Sci, 2006, 56(9): 733-742.
- [5] ZHU H, WANG H, LI B, et al. Biogeography and floristic affinities of the limestone flora in Southern Yunnan, China[J]. Ann Missouri Bot Gard, 2003, 90(3): 444-465.
- [6] 韩玉杰, 徐志防, 叶万辉, 等. 不同类型喀斯特植物的荧

光特征及抗旱性比较[J]. 广西植物, 2007, 27(6): 918-922.

- [7] 莫凌, 黄玉清, 覃家科, 等. 西南喀斯特地区四种植物水分生理的初步研究[J]. 广西植物, 2008, 28(3): 402-406.
- [8] 张中峰, 黄玉清, 莫凌, 等. 岩溶区 4 种石山植物光合作用的光响应[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(1): 44-48.
- [9] QUEREJETA J I, ESTRADA-MEDINA H, ALLEN M F, et al. Utilization of bedrock water by *Brosimum alicastrum* trees growing on shallow soil atop limestone in a dry tropical climate[J]. Plant Soil, 2006, 287(1/2): 187-197.
- [10] QUEREJETA J I, ESTRADA-MEDINA H, ALLEN M F, et al. Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate[J]. Oecologia, 2007, 152(1): 26-36.
- [11] WU Z Y, RAVEN P H. Flora of China; Vol. 11[M]. Beijing: Science Press, 1999: 284.
- [12] 张宏达, 丘华兴. 值得注意的中国植物: 续二[J]. 广西植物, 2003, 23(2): 97-101.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [14] 庄丽, 陈亚宁, 陈明, 等. 模糊隶属法在塔里木河荒漠植物抗旱性评价中的应用[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 367-372.
- [15] 贺少轩, 梁宗锁, 蔚丽珍, 等. 土壤干旱对 2 个种源野生酸枣幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1387-1393.
- [16] 杨玉珍, 贾遂民, 彭方仁. 干旱胁迫对不同种源香椿苗木生长的影响[J]. 林业科技开发, 2009, 23(6): 52-55.
- [17] 刘锦春, 钟章成. 水分胁迫和复水对石灰岩地区柏木幼苗根系生长的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6439-6445.
- [18] 邹琦, 李德全, 郑国生, 等. 作物抗旱生理生态研究[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1994: 24-29.
- [19] 时忠杰, 杜阿朋, 胡哲森, 等. 水分胁迫对板栗幼苗叶片活性氧代谢的影响[J]. 林业科学研究, 2007, 20(5): 683-687.
- [20] 谢志玉, 张文辉, 刘新成. 干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(5): 948-954.
- [21] 何开跃, 李晓储, 黄利斌, 等. 干旱胁迫对木兰科 5 树种生理生化指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(4): 20-23.
- [22] 徐利霞. 石漠化山区造林树种幼苗的抗旱性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [23] 李霞, 阎秀峰, 于涛. 水分胁迫对黄槿幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2353-2356.

【责任编辑 李晓卉】