

枫杨与池杉对不同配置及水分的生理生化响应^{*}

王朝英¹, 李昌晓¹, 王振夏¹, 魏 虹¹, 耿养会², 蒋宣斌²

(1. 西南大学 生命科学学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 重庆市林业科学研究院, 重庆 400036)

摘要:模拟三峡库区消落带土壤水分变化特征设置了常规生长水分条件、轻度干旱水分胁迫和水淹 3 个不同水分处理组,通过构建人工植被体系,对消落带适生树种枫杨(*Pterocarya stenoptera* C. DC.)、池杉(*Taxodium ascendens* Brongn)进行不同比例的配置处理,研究枫杨、池杉在不同配置和不同水分处理下的生理生化响应特征。结果表明:不同配置对枫杨和池杉的叶绿素 a、叶绿素 b、SOD、POD、CAT、ASP、O₂·⁻、脯氨酸和可溶性蛋白均没有显著影响,不同水分处理及时间对枫杨和池杉 SOD、POD、CAT、ASP、O₂·⁻和可溶性蛋白有极显著影响。配置×水分、配置×时间以及配置×水分×时间对枫杨和池杉的叶绿素 a、叶绿素 b、SOD、POD、CAT、ASP、O₂·⁻和可溶性蛋白也没有显著影响,然而水分×时间之间的交互作用对枫杨 SOD、POD、ASP 和 O₂·⁻有显著影响,对池杉 SOD、CAT、ASP 和脯氨酸有显著影响。本研究发现枫杨、池杉对水分逆境胁迫的生理生化响应存在差异,但都能较好地适应三峡库区消落带的水分环境。

关键词:三峡库区;布局配置;水分胁迫;生理响应;枫杨;池杉

中图分类号:X53; Q89

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2012)03-0048-09

随着三峡工程竣工,三峡水库的水文调度引起库区水位在坝前高程 145 ~ 175 m 之间变化,形成了大面积的消落带。三峡库区消落带是三峡库区周边陆地生态系统与库区水体生态系统能量、物质和信息转移与转化活跃地带,易受外界变化影响^[1]。与未成库之前的河流消落区相比,三峡库区消落带具有水淹面积大、时间长、淹水深等特点,同时淹水季节也由原来的夏季水淹改变为冬季水淹。这些变化使三峡库区原有植被大量退化,导致三峡库区景观质量、水土保持和环境健康受到威胁^[2-3]。目前,对受损库岸带的治理方法主要采取工程措施和生物措施,但由于工程修复耗资较大,对生态系统存在一定的负面影响,人们往往更倾向于采用生物修复的方式^[4],这样可以更好地保护三峡库区消落带的生态环境。因此,在库区消落带内人工构建植被成为修复三峡库区受损生态系统的重要途径。

自三峡水库水文调度运行以来,周期性水淹导

致沿岸植物缺氧,进而增大了消落带植被体系建设和保护的难度。消落带土壤含水量的这种周期性变化势必影响到适生造林树种池杉(*T. ascendens*)和乡土树种枫杨(*P. stenoptera*)的生长发育及生理生态学特性。目前国内外对池杉和枫杨已经开展了一些研究,主要集中在对它们各自的生物学特性^[5,6]、生长和产量^[7-8]、造林密度^[9-11]、木材物理学性质^[12-14]、生理生态学特性^[15-22]等方面,都是对单一物种的研究。但是在三峡库区进行植被恢复的过程中不能只采用单一的物种,因其一方面不能达到空间的高效利用,另一方面也易受到病虫害的攻击,这就需要多物种间进行立体配置。植物的立体配置需要尽量减少配置物种之间的竞争,使他们能够稳定共存于一个环境内。物种之间能否共存取决于多方面的影响因素,如物种本身的竞争能力、群落密度和物种所占比例均能影响到种内、种间竞争的相对激烈程度^[23]。竞争能力相似或相近的物种能够共

^{*} 收稿日期:2012-02-05 网络出版时间:2012-5-26 12:13

资助项目:国家林业公益性行业科研专项(No. 201004039);留学回国人员科研启动基金(教外司留[2010-1561]);重庆市自然科学基金(No. CSTC-2010BB7003);联合国开发计划署全球环境基金小额赠款项目(No. CPR/SGP/OP5/CORE/LD/11/04);国家林业局 948 项目(No. 2008-4-45)

作者简介:王朝英,女,硕士研究生,研究方向为植物生态学;通讯作者:李昌晓,E-mail:lichangx@swu.edu.cn

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.48_010.html

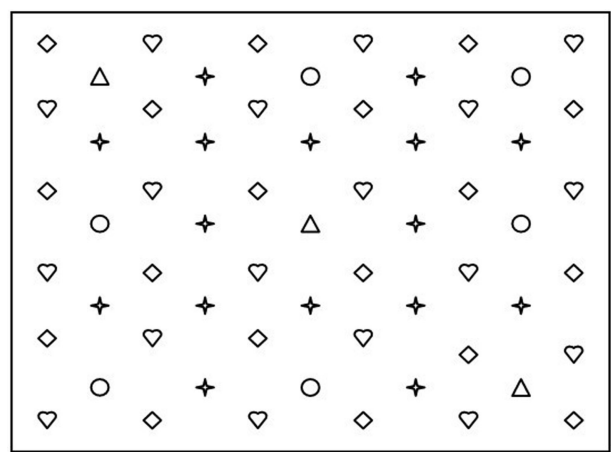
存^[24]。有研究显示随着密度的增加,种内竞争加剧^[25]。在混播时,减少竞争力强的物种的比例可促进共存的形成^[26]。在三峡库区消落带土壤水分变化条件下,适生树种枫杨和池杉配置在一起时,两适生树种能否共存尽管有待于长时间的研究证实,但两树种在不同配置比例下的生理生化响应可以供研究者较为快捷地进行深度探查。有关这方面的问题,长期以来未见相关报道。

因此,本研究针对三峡水库消落带的实际情况,根据植物对水分胁迫条件的适应能力,将适生树种池杉和枫杨共同配置在一个人工植被体系内,通过模拟三峡库区消落带土壤的水分变化特征,研究两适生树种的生理生化响应,初步探索两适生树种的不同配置效应,为构建三峡水库消落带植被体系提供直接参考。

1 材料和方法

1.1 研究材料

由于树木生长快慢的原因,考虑到实验条件的一致性,本实验选择高度均在 1.2 m 左右、生长基本一致的枫杨和池杉(此时枫杨苗龄 1 年,池杉苗龄 3 年)作为研究对象。为了模拟构建三峡库区消落带人工植被,选择生长基本一致的池杉和枫杨树苗各 63 棵,灌木秋华柳 288 棵,草本狗牙根和菖蒲各 324 棵,于 2011 年 1 月 15 ~ 18 日将所有苗木带土栽入 18 个修建好的 2 m×2 m×1 m 的水池中,栽植模式见图 1。



注:○表示优势树种,△表示辅助树种,
+表示秋华柳,◇表示狗牙根,♥表示菖蒲

图 1 乔木、灌木和草本种植方法示意图

Fig. 1 Sketch map of the planting method of trees, shrub and herbs

水池底部垫上 50 cm 的土,每个水池共种植 9 棵树木,株距 0.7 m×0.7 m,均比较均衡地分布于灌草之中。为了尽可能与三峡库区消落带的环境条件一致,种植后不进行日常田间管理,待其自然恢复至 5 月初再正式开展水分处理实验。实验用水池位于重庆市歌乐山林业科学研究院试验基地中。

1.2 实验设计

试验共设计两种配置模式 1、2(见表 1),每个模式均为优势树种与辅助树种搭配。3 种水分处理,CK 组为正常供水,含水量为田间持水量的 60% ~ 63%(土壤含水量采用称重法测定),植株嫩叶在晴天无萎蔫现象。LD 组为轻度干旱组,土壤含水量为田间持水量的 47% ~ 50%,植株嫩叶在晴天 13 时左右出现萎蔫,17 时左右恢复正常^[27-28]。SM 组为水淹至土壤表面 30 cm。每种处理设置 3 个重复。

从实验处理之日起,每间隔 10 d 为 1 个处理期,对各项生理生化指标进行连续测定,即分别于 5 月 12 日、5 月 23 日、6 月 3 日、6 月 14 日和 6 月 25 日进行 5 次测定,每处理每次测定 3 个重复。

1.3 叶片生理指标的测定

取样时选取植株嫩叶,先用干净的剪刀剪下叶片,将叶片装入自封袋中,排尽空气,写上编号,放入事先准备好的冰盒中,带回实验室,保存于-80℃冰箱中,以供测试。

叶绿素含量的测定采用浸提法^[29],用岛津 5220 分光光度计测定叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量。超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用高俊凤^[30]的方法进行,以抑制 NBT 光化还原 50% 所需的酶量为 1 个酶活力单位(U),酶的活性以 $U \cdot g^{-1}$ 来表示。过氧化物酶(POD)活性的测定采用高俊凤^[30]的方法,以每分钟吸光值减少 0.01 为 1 个酶活力单位,酶活性以 $U \cdot g^{-1}$ 表示。过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用张以顺等^[31]的方法,以每分钟吸光度值减少 0.1 为 1 个酶活力单位。抗坏血酸过氧化物酶(ASP)活性的测定采用文献^[32]的方法,以室温下每分钟氧化 $1 \mu mol$ AsA 的酶量作为一个酶活性单位,酶活性以 $U \cdot g^{-1}$ 表示。超氧阴离子($O_2 \cdot^-$)的测定采用高俊凤^[26]的方法,以 $nmol \cdot g \cdot h^{-1}$ FW 表示 $O_2 \cdot^-$ 的产生速率。可溶性蛋白的测定采用高俊凤的考马斯亮蓝法进行测定^[30]。游离脯氨酸含量的测定采用茚基水杨酸法,用茚三酮比色法测定其含量^[30]。

1.4 统计分析

本实验将配置、水分、时间作为影响所测指标的 3 个因素,来检验全部处理的差异显著性。采用多因素方差分析法揭示配置、水分、时间以及他们之间的交互作用对枫杨、池杉生理生化特征的影响(GLM

程序,SPSS 16.0 版)。并用 Duncan’s 多重比较法检验每个生理指标($\alpha=0.05$)的差异显著性。实验图表用 Microsoft Office Excel 2003 根据 SPSS 分析结果制作。

表 1 两种不同配置模式
Tab. 1 Two different configuration modes

配置 Configuration mode	乔木 tree	灌木 shrub	草本 herbaceous
1	3 棵枫杨+6 棵池杉 3 <i>P. stenoptera</i> +6 <i>T. ascendens</i>	18 棵秋华柳 18 <i>S. variegata</i>	8 株狗牙根+8 株菖蒲 8 <i>C. dactylon</i> +8 <i>A. calamus</i>
2	6 棵枫杨+3 棵池杉 6 <i>P. stenoptera</i> +3 <i>T. ascendens</i>	18 棵秋华柳 18 <i>S. variegata</i>	8 株狗牙根+8 株菖蒲 8 <i>C. dactylon</i> +8 <i>A. calamus</i>

2 结果

2.1 叶绿素含量变化

方差分析结果(表 1 和表 2)显示,不同配置对枫杨、池杉叶绿素 a、叶绿素 b 影响均不显著,而不同土壤水分含量对枫杨叶绿素 a 产生了显著影响,对叶绿素 b 产生了极显著($p < 0.001$)的影响;不同水分处理极显著影响池杉叶绿素 a 含量,但对叶绿素 b 含量没有影响;不同处理时间对枫杨和池杉的

叶绿素 a 含量没有显著影响,但却显著影响叶绿素 b 含量。不同配置、水分及处理时间之间的交互作用对枫杨和池杉的叶绿素 a、叶绿素 b 均没有显著影响。在整个实验期间,枫杨的叶绿素 a、叶绿素 b 含量在 LD 组最高,SM 组则显著低于对照组(图 2,图 3);池杉的叶绿素 a 含量与枫杨有相似的变化规律,但不同土壤水分含量变化对池杉的叶绿素 b 含量影响不显著(图 2、图 3)。

表 2 不同配置比例、水分处理及时间对枫杨生理生化指标影响方差分析结果

Tab. 2 Results of analysis of variance (ANOVA) testing for main effects of configuration mode, water treatment, time, and their interactions on physiological and biochemical responses of *P. stenoptera*

项目	枫杨生理生化指标								
	叶绿素 a	叶绿素 b	SOD	POD	CAT	ASP	$O_2 \cdot ^-$	脯氨酸	可溶性蛋白
配置	0.714	0.711	0.986	0.298	0.934	0.833	0.606	0.981	0.121
处理	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.133	0.000
时间	0.391	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000
配置×处理	0.974	0.926	0.883	0.995	0.851	0.918	0.879	0.914	0.978
处理×时间	0.906	0.623	0.001	0.000	0.939	0.005	0.044	0.501	0.001
配置×时间	1.000	0.995	0.517	0.001	0.988	0.992	0.989	0.958	0.891
配置×处理×时间	1.000	1.000	0.999	0.206	0.999	0.990	0.999	1.000	0.998

注:表中数据均为 p 值,下同。

2.2 超氧阴离子含量变化

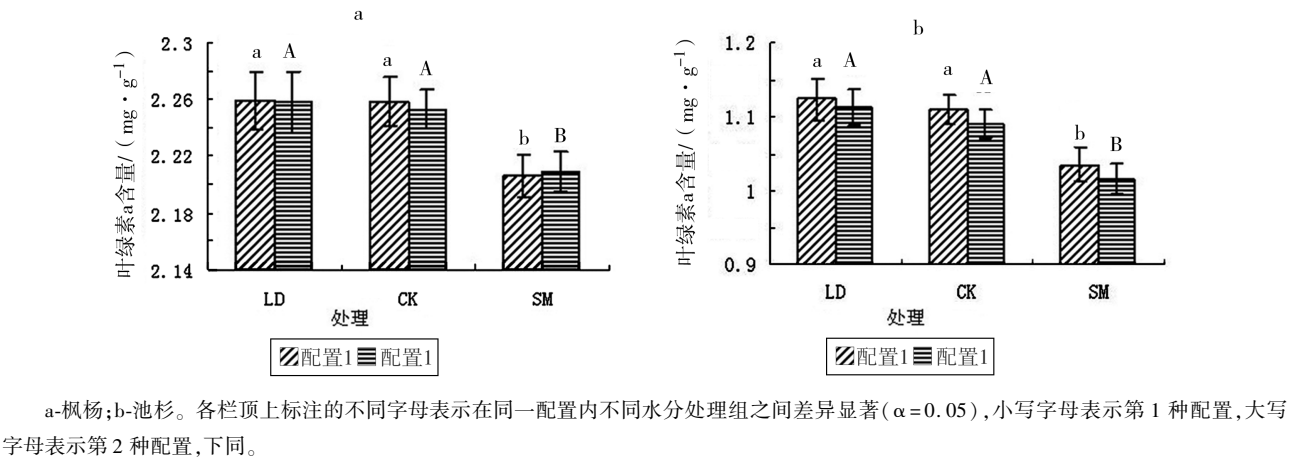
不同配置比例对枫杨和池杉 $O_2 \cdot ^-$ 含量影响不显著,而不同水分处理和时间对枫杨和池杉的 $O_2 \cdot ^-$ 含量影响极显著(表 1、表 2)。配置×处理、配置×时间、配置×处理×时间对枫杨 $O_2 \cdot ^-$ 含量没有显著影

响,但水分×时间却对枫杨的 $O_2 \cdot ^-$ 含量产生显著影响;不同配置比例、水分及处理时间之间的交互作用对池杉 $O_2 \cdot ^-$ 含量均没有产生显著影响。实验还发现,轻度干旱和水淹均使枫杨和池杉的 $O_2 \cdot ^-$ 含量显著升高(图 4)。

表 3 不同配置比例、水分处理及时间对池杉生理生化指标影响方差分析结果

Tab.3 Results of analysis of variance (ANOVA) testing for main effects of configuration mode, water treatment, time, and their interactions on physiological and biochemical responses of *T. ascendens*

项目	枫杨生理生化指标								
	叶绿素 a	叶绿素 b	SOD	POD	CAT	ASP	O ₂ · ⁻	脯氨酸	可溶性蛋白
配置	0.940	0.444	0.607	0.539	0.954	0.637	0.755	0.962	0.301
处理	0.007	0.626	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
时间	0.098	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000
配置×处理	0.976	0.991	0.422	0.960	0.977	0.762	0.990	0.095	0.940
处理×时间	0.957	0.239	0.000	0.899	0.000	0.003	0.676	0.000	0.002
配置×时间	1.000	1.000	0.977	0.934	0.733	0.998	0.996	0.051	0.997
配置×处理×时间	1.000	1.000	0.669	0.996	0.895	0.998	1.000	0.025	0.995



a-枫杨;b-池杉。各栏顶上标注的不同字母表示在同一配置内不同水分处理组之间差异显著(α=0.05),小写字母表示第 1 种配置,大写字母表示第 2 种配置,下同。

图 2 不同配置比例下不同土壤水分含量对枫杨和池杉叶绿素 a 含量的影响(±标准误)

Fig.2 Effects of water treatment on chlorophyll a of *P. stenoptera* and *T. ascendens* under different configuration mode (± SD)

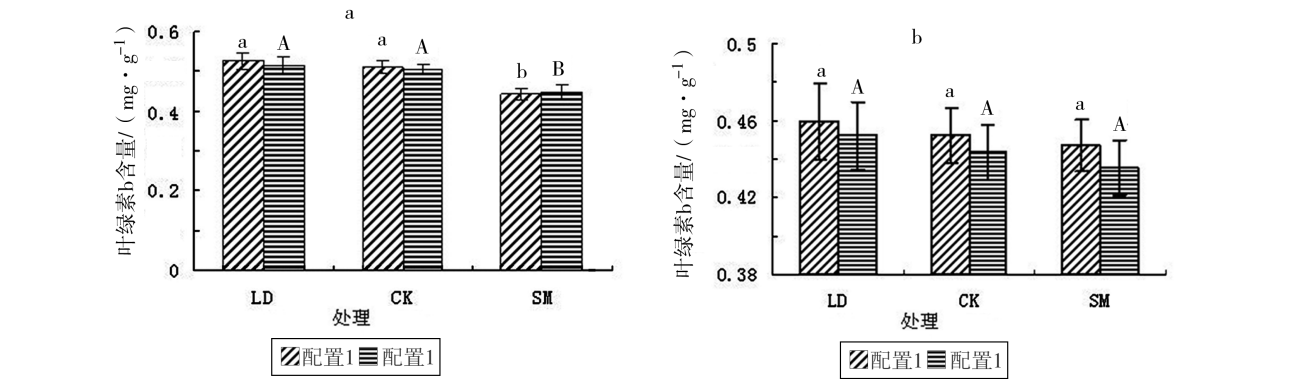


图 3 不同配置比例下不同土壤水分含量对枫杨和池杉叶绿素 b 含量的影响(±标准误)

Fig.3 Effects of water treatment on chlorophyll b of *P. stenoptera* and *T. ascendens* under different configuration mode (± SD)

2.3 保护酶系活性变化

不同配置比例没有显著影响枫杨和池杉的 SOD、POD、CAT 和 ASP 活性,但不同水分处理和时间却极显著地影响枫杨和池杉的 SOD、POD、CAT 和 ASP 活性(表 1、表 2)。配置×处理对枫杨和池杉的 SOD、POD、CAT 和 ASP 活性没有显著影响,而水分×

时间却对枫杨的 SOD、POD、ASP 活性和池杉的 SOD、CAT、ASP 活性产生极显著影响。有趣的是,配置×时间仅对枫杨的 POD 活性产生极显著影响,对两树种其余各测定保护酶活性均没有显著影响。在本实验中,枫杨和池杉 LD 组与 SM 组的 SOD、POD 活性分别均显著高于各自对应的 CK 组(图 5、

图 6),与两树种 LD 组与 SM 组的 CAT 活性分别均显著低于各自对应的 CK 组形成鲜明对比(图 7)。与 CK 组相比,枫杨与池杉 LD 组的 ASP 活性均显著

增加,但枫杨 SM 组差异并不显著,这与池杉 SM 组显著增加形成对照(图 8)。

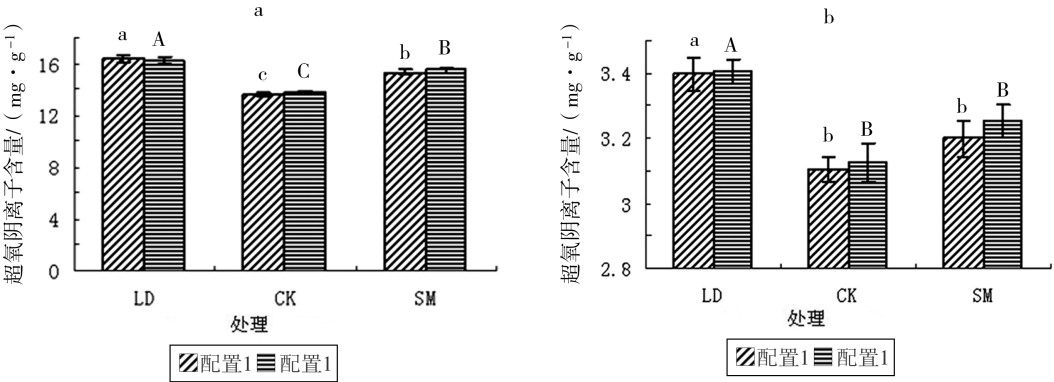


图 4 不同配置比例下不同土壤水分含量对枫杨和池杉 $\text{O}_2 \cdot^-$ 含量的影响 ($\pm$ 标准误)

Fig.4 Effects of water treatment on superoxide anion of *P. stenoptera* and *T. ascendens* under different configuration mode ($\pm$ SD)

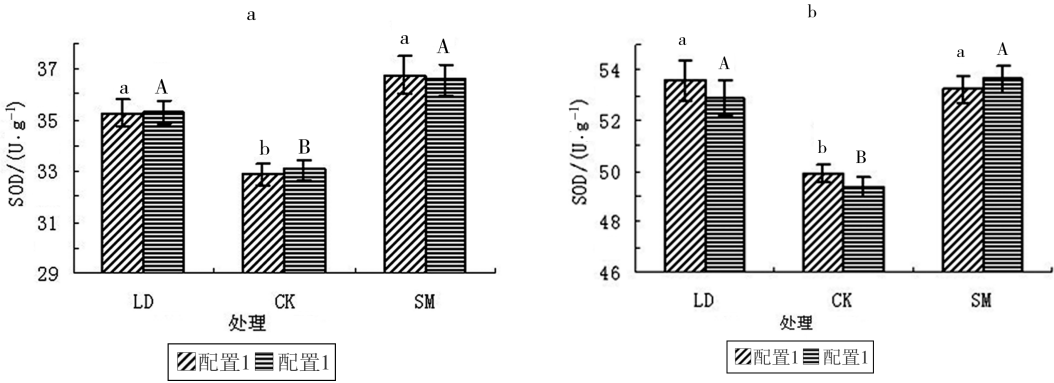


图 5 不同配置比例下不同土壤水分含量对枫杨和池杉 SOD 活性的影响 ($\pm$ 标准误)

Fig.5 Effects of water treatment on superoxide dismutase of *P. stenoptera* and *T. ascendens* under different configuration mode ($\pm$ SD)

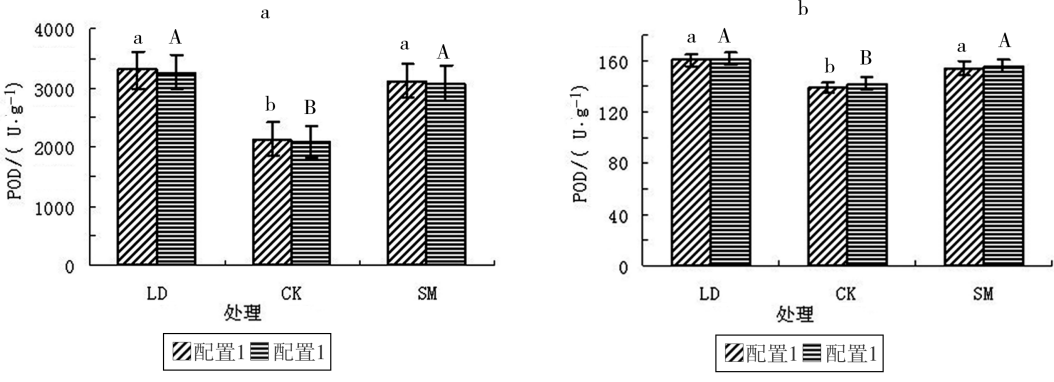


图 6 不同配置比例下不同土壤水分含量对枫杨和池杉 POD 活性的影响 ($\pm$ 标准误)

Fig.6 Effects of water treatment on peroxidase of *P. stenoptera* and *T. ascendens* under different configuration mode ($\pm$ SD)

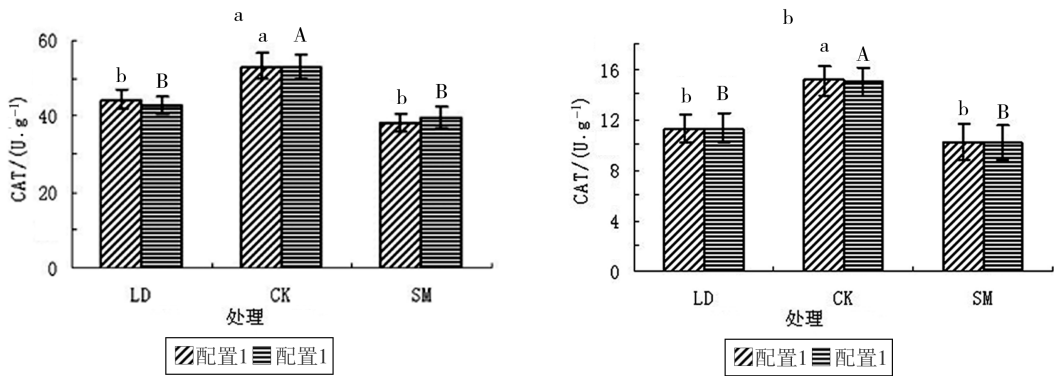


图 7 不同配置比例下不同土壤水分含量对枫杨和池杉 CAT 活性的影响 ($\pm$ 标准误)

Fig. 7 Effects of water treatment on catalase of *P. stenoptera* and *T. ascendens* under different configuration mode ($\pm SD$)

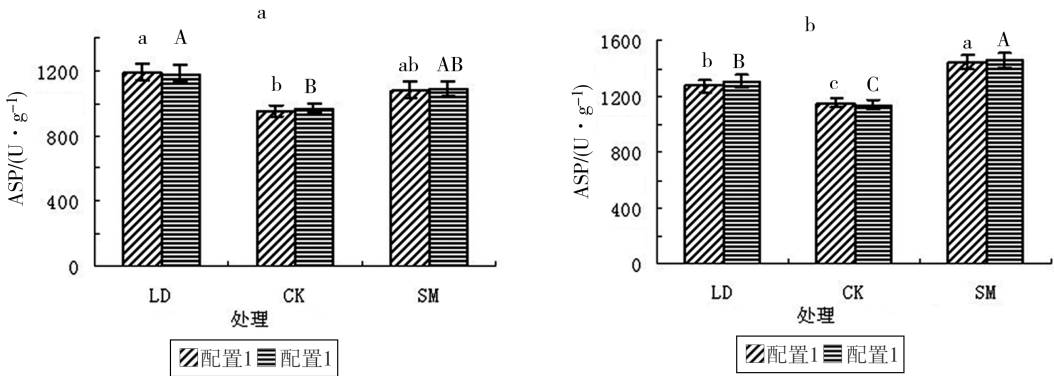


图 8 不同配置比例下不同土壤水分含量对枫杨和池杉 ASP 活性的影响 ($\pm$ 标准误)

Fig. 8 Effects of water treatment on ascorbate peroxidase of *P. stenoptera* and *T. ascendens* under different configuration mode ($\pm SD$)

2.4 渗透调节物质含量变化

不同配置比例对枫杨和池杉游离脯氨酸含量影响不显著,而不同水分处理、时间以及水分 $\times$ 时间却对池杉的游离脯氨酸含量影响显著(表 1,表 2)。方差分析发现,轻度干旱和水淹均使枫杨和池杉的游离脯氨酸含量明显升高;同时还发现枫杨 LD 组与 SM 组的游离脯氨酸含量没有显著差异,与池杉的 LD 组与

SM 组之间差异显著形成明显对比(图 9)。同样地,不同配置比例对枫杨和池杉的可溶性蛋白含量也没有显著影响,而不同水分处理、时间以及水分 $\times$ 时间却对枫杨和池杉的可溶性蛋白含量产生极显著影响(表 1,表 2)。枫杨和池杉 LD 组可溶性蛋白含量均显著高于各自对应的 CK 组,但 SM 与 CK 组之间并无显著差异存在(图 10)。

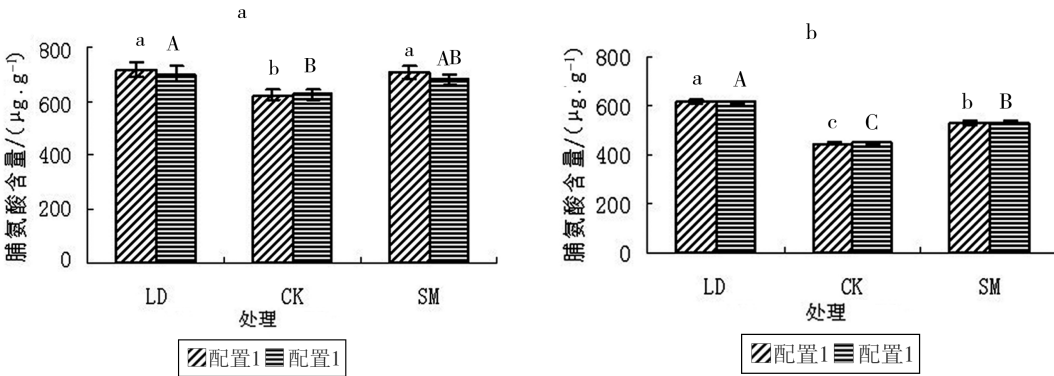


图 9 不同配置比例下不同土壤水分含量对枫杨和池杉游离脯氨酸含量的影响 ($\pm$ 标准误)

Fig. 9 Effects of water treatment on proline of *P. stenoptera* and *T. ascendens* under different configuration mode ($\pm SD$)

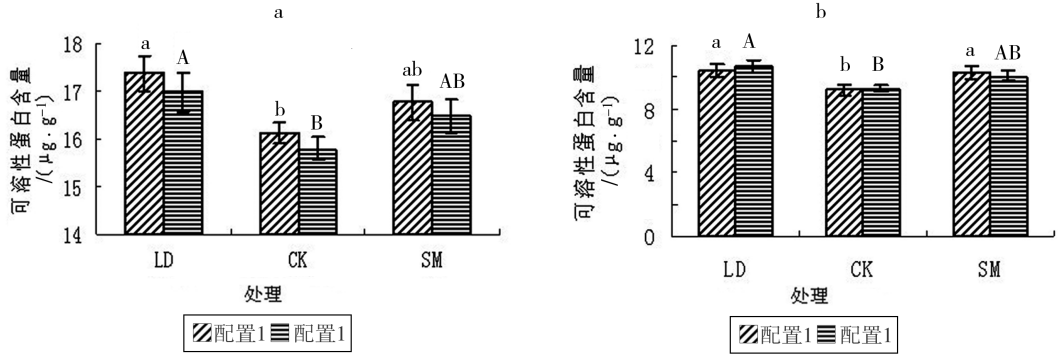


图 10 不同配置比例下不同土壤水分含量对枫杨和池杉可溶性蛋白含量影响(±标准误)

Fig. 10 Effects of water treatment on Soluble protein of *P. stenoptera* and *T. ascendens* under different configuration mode (± SD)

3 讨论

三峡库区消落带持续性水淹和短时间的干旱均可能影响植物的光合作用。光合色素在光合作用中起着十分重要的作用,主要参与光能的吸收、传递和转换,并能够随着环境的变化调整他们之间的比例^[33-34]。已有研究结果表明,当植物处于短时间的轻度干旱环境时,植物可以通过提高光合色素的含量来抵御不良的环境^[35,16]。而当植物处于水淹环境时,水淹可导致植物缺氧,引起自由基积累,影响其合成途径,且活性氧能加速叶绿素的降解,最终导致叶绿素含量降低^[36-37,19]。本研究发现,在轻度干旱环境下,枫杨的叶绿素 a 和叶绿素 b 均有所增加,但都未达到显著水平;在水淹环境中,枫杨的叶绿素 a 和叶绿素 b 均显著下降。有所不同的是,池杉的叶绿素 a 和叶绿素 b 在轻度干旱条件下没有显著增加;叶绿素 a 在水淹条件下显著下降,而叶绿素 b 在水淹条件下却没有显著下降,出现这种现象的原因可能是因为叶绿素 a 对逆境胁迫的反应较叶绿素 b 敏感,并且其敏感度与植物物种有关。干旱和水淹对枫杨和池杉造成逆境胁迫,导致它们的光合色素含量发生改变;另一方面,植株密度也会影响光合色素的含量^[38],最终影响植物的生长。

在三峡库区水文变动条件下,库区消落带植被将在冬季遭受周期性的水淹胁迫;而在夏季水位下降后,由于气温和降雨的关系也可能面临短暂的轻度干旱胁迫。已有研究表明,植物处于水分胁迫环境中将导致生长减缓,叶片早衰、脱落,叶绿素降解^[35,37]甚至于叶绿体消解^[39],光合速率下降^[40],细胞内活性氧自由基代谢失衡引起自由基积累,质膜受损,细胞内含物大量外渗^[41]等。随着胁迫程度的

加深,活性氧进一步积累,当它积累到一定程度时,就会造成细胞内的一些大分子物质发生过氧化,最终导致植物死亡。植物对抗逆境的机制一方面是通过提高体内的保护酶系统,如 SOD、POD、CAT 等清除过多的活性氧,以减轻逆境胁迫对细胞造成的伤害^[42];另一方面是通过体内渗透调节物质如脯氨酸等来维持渗透势的稳定。脯氨酸是水溶性最大的氨基酸,能有效调节植物细胞的持水能力。Smirnoff^[43]证实对植物施以外源脯氨酸能清除过多的活性氧。植物体内脯氨酸含量的积累是植物对逆境的一种适应性反应^[44]。

Lin^[45]认为植物对逆境产生的活性氧伤害的响应差异,源于它们抗氧化能力的差异。本试验研究结果表明,在轻度干旱和水淹条件下,枫杨的 $O_2 \cdot^-$ 产生速率显著升高,这与阎秀峰等^[46]对红松的研究结果,孙国荣等^[47]对白桦实生苗的研究结果相同。在轻度干旱条件下,池杉的 $O_2 \cdot^-$ 产生速率显著增加,而在水淹条件下,池杉的 $O_2 \cdot^-$ 产生速率却并未显著增加,显示出池杉具有良好的耐水淹特性。由此充分说明在干旱和水淹环境条件下,枫杨叶片中的活性氧已成积累趋势,池杉对干旱胁迫较水淹胁迫更为敏感。相对于池杉而言,枫杨在轻度干旱和水淹条件下渗透调节物质的变化差异不大,说明池杉具有较强的渗透调节能力。在轻度干旱与水淹条件下,枫杨和池杉叶片中的 SOD、POD、CAT 和 ASP 活性变化规律,与对夏腊梅的研究结果一致^[48]。SOD 是一种诱导酶,它的活性受底物浓度的诱导。在本实验中,SOD 活性随胁迫的加强而增加,说明干旱和水淹胁迫能促进枫杨和池杉叶片中 $O_2 \cdot^-$ 的形成, $O_2 \cdot^-$ 的增多诱导 SOD 活性的增加,导致歧化反应产生的 H_2O_2 增多,由此必然导致清除 H_2O_2 的酶

POD 活性增加;随着胁迫进程的深入,CAT 活性显著下降,活性氧的产生速率已超出了细胞的清除能力,致使细胞膜发生脂质过氧化,破坏植物的正常生长。

综上所述,枫杨和池杉对土壤水分变化具有较强的生理生化响应能力,对适应水分逆境胁迫具有较高的可塑性,不仅表现出耐水湿的特点,而且表现出一定的耐旱性。枫杨的耐旱性较耐湿性强,池杉的耐湿性较耐旱性强。因此,在植被恢复建设中,枫杨可栽种在海拔高的地方,池杉可栽种在海拔低的地方,这样可以保证它们正常的生长^[49]。

本实验中枫杨和池杉的两种配置比例在各项指标中均未表现出显著差异性,可能是栽种时间太短,各种资源环境条件都还很充足,两物种间还没有产生竞争抑制作用,这些都是作者在今后的实验中需要加以改进的地方。

参考文献:

- [1] 刘宗群. 三峡水库水位涨落带的景观生态分析及其对策[J]. 重庆环境科学, 1993,15(2):24-28.
- [2] 戴方喜,许文年,陈芳清. 对三峡水库消落区生态系统与其生态修复的思考[J]. 中国水土保持,2006,12:6-8.
- [3] 白宝伟,王海洋,李先源,等. 三峡库区淹没区与自然消落区现存植被的比较[J]. 西南农业大学学报:自然科学版,2005,27(5):684-691.
- [4] 刘云峰,刘正学. 三峡水库涨落带植被重建模式初探[J]. 重庆三峡学院学报,2006,22(3):4-7.
- [5] 汪企明,江泽平,吕祥生,等. 落羽杉属种源研究:树种生物学特性[J]. 江苏林业科技,1995,22(2):14-18.
- [6] 徐友明,绉明宏,史玉虎,等. 枫杨的生物学特性及其资源利用的研究进展[J]. 东北林业大学学报,2002,30(3):42-48.
- [7] 吴祖映,储家森,唐明荣,等. 不同立地对池杉林生长的影响[J]. 浙江林学院学报,1995,12(2):144-148.
- [8] 李纪元,饶龙兵,王慧雄,等. 枫杨种源苗期生长及生物量地理变异研究[J]. 林业科学研究,2001,14(1):60-66.
- [9] 王凤龙. 枫杨速生丰产栽培技术[J]. 中国新技术新产品,2010,1:228.
- [10] 周林,傅先义,张正跃,等. 江苏里下河地区池杉造林密度模型的研究[J]. 浙江林学院学报,1999,26(2):7-12.
- [11] 代燕颖,卜允超. 枫杨育苗及造林技术[J]. 安徽林业,2002,4:24.
- [12] 陶仁中,江泽慧,费本华,等. 间歇性淹水对池杉木材物理力学性质影响的研究[J]. 林业科学,1998,34(3):110-114.
- [13] 汪佑宏,曹仁忠,徐斌,等. 水淹程度对滩地枫杨主要力学性质的影响[J]. 安徽农业大学学报,2003,30(2):168-172.
- [14] 汪佑宏,肖成宝,刘杏娥,等. 水淹程度对长江滩地枫杨木射线的影响[J]. 安徽农业大学学报,2002,29(3):293-296.
- [15] 李昌晓,钟章成. 三峡库区消落带土壤水分变化条件下池杉幼苗光合生理响应的模拟研究[J]. 水生生物学报,2005,29(6):712-716.
- [16] 李昌晓,钟章成. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化条件下落羽杉与池杉幼苗的光合特性比较[J]. 林业科学,2005,41(6):28-34.
- [17] 吕茜,魏虹,李昌晓. 土壤水分条件对枫杨幼苗光合生理的影响[J]. 西南大学学报:自然科学版,2010,32(3):116-123.
- [18] 潘亚丽. 水分胁迫下不同种源枫杨幼苗生理特性的研究[D]. 南京:南京林业大学硕士学位论文,2009.
- [19] 李纪元. 涝渍胁迫对枫杨幼苗保护酶活性及膜脂过氧化物的影响[J]. 安徽农业大学学报,2006,33(4):450-453.
- [20] 贾中民,魏虹,田晓峰,等. 长期水淹对枫杨幼苗光合生理和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西南大学学报:自然科学版,2009,31(5):124-129.
- [21] 衣英华,樊大勇,谢宗强,等. 模拟淹水对枫杨和栓皮栎气体交换、叶绿素荧光和水势的影响[J]. 植物生态学报,2006,30(6):960-968.
- [22] 李昌晓,钟章成,陶建平. 不同水分条件下池杉幼苗根系的苹果酸、莽草酸含量及生物量[J]. 林业科学,2008,44(10):1-7.
- [23] Fowler N. Competition and coexistence in North Carolina grassland: III. mixtures of component species[J]. Journal of Ecology, 1982, 70:77-92.
- [24] Goldberg D E, Barton A M. Patterns and consequences of interspecific competition in natural communities: a review of field experiments with plants[J]. American Naturalist, 1992,139:771-801.
- [25] 赵聪蛟,邓自发,周长芳,等. 氮水平和竞争对护花米草与芦苇叶特征的影响[J]. 植物生态学报,2008,32(2):392-401.
- [26] 王平,周道玮,张宝田. 禾—豆混播草地种间竞争与共存[J]. 生态学报,2009,29(5):2560-2567.
- [27] 郭连生,田有亮. 4种针叶幼树的光合生理特性与大气湿度关系的研究[J]. 生态学报,1994,14(2):136-141.
- [28] 胡新生,王世绩. 树木水分胁迫生理与耐旱性研究进展及展望[J]. 林业科学,1998,34(2):77-88.
- [29] 张宪政. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳:辽宁工业出

- 版社,1989.
- [30] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [31] 张以顺,黄霞,陈云凤. 植物生理学实验教程[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [32] 孙云,江春柳,赖钟雄,等. 茶树鲜叶抗坏血酸过氧化物酶活性的变化规律及测定方法[J]. 热带植物学报,2008,29(5):562-566.
- [33] Scholes J D, Press M C, Zipperlen S W. Differences in light energy utilization and dissipation between dip te-mearp rainforest tree seedlings[J]. *Oecologia*,1997,109:41-48.
- [34] Ronzhina D A , Nekrasova G F , Ppyankov V I. Comparative characterization of the pigment complex in emergent ,floating and submerged leaves of hydrophytes[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*,2004,51(1):21-27.
- [35] 孙景宽,李田,夏江宝,等. 干旱胁迫对沙枣幼苗根茎叶生长及光合色素的影响[J]. 水土保持通报,2011,31(1):68-71.
- [36] 陈芳清,郭成圆,王传华,等. 水淹对秋华柳幼苗生理生态特征的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(6):1229-1233.
- [37] 蒋明义,杨文英,徐江,等. 渗透胁迫下水稻幼苗中叶绿素降解的活性氧损伤作用[J]. 植物学报,1994,36(4):289-295.
- [38] 杨坚,张玲玲,何斌源,等. 互花米草混种密度对秋茄幼苗生理生态的影响[J]. 福建林学院学报,2007,27(2):176-179.
- [39] 万里强,石永红,李向林,等. 高温干旱胁迫下三个多年生黑麦草品种叶绿体和线粒体超微结构的变化[J], 草业学报,2009,18(1):25-31.
- [40] 高天鹏,方向文,李金花,等. 水分对柠条萌蘖株和未平荏株光合参数及调渗透物质的影响[J]. 草业科学,2009,26(5):103-109.
- [41] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [42] Schwanz P, Pone A. Differential stress responses of an-fioxidative systems to drought in pendunculate oak (*Quer-cus robur*) and maritime pine (*pinus pinaster*) grown un-der high CO₂ concentrations[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001,52:133-143.
- [43] Smirnov N. The role of active Oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation[J]. *New Phytol*, 1993,25(1):27-58.
- [44] 蒋明义,郭邵川,张学明. 氧化胁迫下水稻体内积累的脯氨酸的抗氧化作用[J]. 植物生理学报,1997,23(4):347-352.
- [45] Lin K H R, Wen C C, Lo H F, et al. Study of the root an-tioxidative system of tomatoes and eggplants under water-logged conditions[J]. *Plant Science*,167:355-366.
- [46] 阎秀峰,李晶,祖元刚. 干旱胁迫对红松幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 生态学报,1999,19(6):850-854.
- [47] 孙国荣,彭永臻,阎秀峰,等. 干旱胁迫对白桦实生苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 林业科学,2003,39(1):165-167.
- [48] 柯世省,金则新. 干旱胁迫对夏腊梅叶片脂质过氧化及抗氧化系统的影响[J]. 林业科学,2007,43(10):28-33.
- [49] 袁兴中,熊森,李波,等. 三峡水库消落带湿地生态友好型利用探讨[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2011,28(4):23-25.

(责任编辑 游中胜)