

模拟三峡库区消落带土壤水分变化对 落羽杉幼苗光合特性的影响

李昌晓^{1,2}, 钟章成^{1,2*}, 刘 芸³

(1. 西南师范大学生命科学学院, 重庆 400715; 2. 西南师范大学国家教育部三峡库区生态环境重点实验室, 重庆 400715;
3. 西南农业大学农学及生命科学学院, 重庆 400715)

摘要:为三峡库区消落带植被恢复建设进行适生树种优选, 本研究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、土壤水饱和以及水淹 4 个不同处理组, 研究落羽杉当年实生幼苗光合特性以及生理生态适应机理。研究表明, 不同水分处理均显著影响落羽杉幼苗光合色素、叶片气体交换以及资源利用效率。其中, 水淹处理组光合色素含量一直处于最低, 受到的影响最大且最为明显; 与轻度干旱组和水饱和处理组在干重条件下的光合色素含量和对照组并无显著差异形成鲜明对比。各组叶绿素 a 与 b 比值介于 2.043~2.691 之间, 叶绿素与类胡萝卜素含量比则介于 3.079~4.514 之间。在轻度干旱水分胁迫环境下, 落羽杉幼苗表现出较低的光能利用效率、CO₂ 利用效率和净光合速率, 其净光合速率比正常下降 24.9%; 相反在土壤饱和水与水淹环境下, 其光能利用效率、CO₂ 利用效率和净光合速率并未受到显著影响, 仍保持与正常生长条件下一致的水平。在整个实验期, 落羽杉幼苗各组的水分利用效率均随时间延长而持续增加, 以水淹组增幅最小, 常规生长组最大。研究证实落羽杉树种具有喜水和耐水淹生理学特性, 完全可以考虑将落羽杉树种列为三峡库区消落带防护林体系建设树种之一, 但应避免将其置于干旱环境之中。

关键词:三峡库区; 消落带; 土壤水分变化; 落羽杉幼苗; 光合特性

文章编号:1000-0933(2005)08-1953-07 **中图分类号:**Q948 **文献标识码:**A

Effect of soil water change on photosynthetic characteristics of *Taxodium distichum* seedlings in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Area

LI Chang-Xiao^{1,2}, ZHONG Zhang-Cheng^{1,2*}, LIU Yun³ (1. College of Life Sciences, Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China; 2. The State Education Ministry's Key Laboratory for the Eco-environment of Three Gorges Reservoir Area, Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China; 3. College of Agronomy and Life Sciences, Southwest Agricultural University 400715, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1953~1959.

Abstract: Four different kinds of water treatment were applied to examine the photosynthetic characteristics of *Taxodium distichum* seedlings in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Area. The aim was to shed light on the plant's physio-ecological adaptation to changing water levels for revegetation purposes. The water treatments were normal growth water condition (CK), light drought water stress (T1), growth under soil water saturation (T2) and growth with soil submersion (T3). T3 had the lowest content of photosynthetic pigment; T1 and T2 did not differ from CK in the content of chlorophylls and carotenoids. The ratio of chlorophylls a to b in four groups ranged 2.043~2.691 and chlorophylls to carotenoids 3.079~4.514. In group T1 the seedlings of *T. distichum* had lower apparent light use efficiency, lower apparent

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30370279); 重庆市发改委 2003 年重大资助项目([2003]1136)

收稿日期:2005-01-13; **修订日期:**2005-07-17

作者简介:李昌晓(1970~), 男, 四川渠县人, 博士生, 讲师, 主要从事植物生态学、林业生态工程学研究. E-mail: eoffice@swnu.edu.cn

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: zzhong@swnu.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30370279) and the Key Project of Chongqing Development and Reform Committee (No. [2003]1136)

Received date: 2005-01-13; **Accepted date:** 2005-07-17

Biography: LI Chang-Xiao, Ph.D. candidate, mainly engaged in plant ecology and forestry eco-engineering. E-mail: eoffice@swnu.edu.cn

CO₂ use efficiency and lower net photosynthetic rate, with the net photosynthetic rate 24.9% lower than that of group CK. However, T2 and T3 did not differ from CK in apparent light use efficiency, apparent CO₂ use efficiency and net photosynthetic rate. The water use efficiency of four treatments consistently increased as treatment was prolonged; the average water use efficiency of T3 was the lowest while that of CK showed highest. Correlational analysis showed that the net photosynthetic rate of *T. distichum* seedlings was positively related to transpiration rate, stomatal conductance, water use efficiency, apparent light use efficiency and apparent CO₂ use efficiency, but highly negatively related to the ratio of chlorophylls *a* to *b*. Net photosynthetic rate was not significantly related with the content of chlorophylls, content of carotenoids, the ratio of chlorophylls to carotenoids, relative air humidity and intercellular CO₂ concentration. Transpiration rate positively correlated with stomatal conductance and negatively to water use efficiency. The results showed that different water treatment could effectively influence the *T. distichum* seedlings' content of photosynthetic pigment, leaf gas exchange and apparent resources use efficiency. The results verified that the species *T. distichum* takes on the features of a water-tolerant and hydrophilic plant, which can be considered as one of the species for the building of protection forest system of the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges Reservoir Area, and should not be planted in drought soil condition.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; hydro-fluctuation belt; soil water change; *Taxodium distichum* seedlings; photosynthetic characteristics

长江三峡工程在库区 145~175m 高程范围内形成的沿岸消落带长度在 2 000km 以上,面积达 298km²^[1,2,3]。因三峡库区水位周期性常年变化,使得形成的消落带土壤含水量也呈现出相应变化。处于消落带上不同高程和具有不同坡度坡向的地段,其土壤含水量将包括从干旱状态到全水淹状态的一系列梯度,具有复杂性、多变性和复合性的土壤水分变化特征。这种周期性的土壤水分梯度变化,一方面会影响到消落带现有树种的光合生理生态学特性及其生长发育,另一方面还对消落带未来造林树种的选择提出了更高要求。如果通过严谨科学实验能较快优选出适应三峡库区消落带这种水分环境复杂多变的林木树种,掌握他们的光合生理生态学特性,无疑将十分有助于三峡库区消落带的植被恢复和库岸防护林体系建设。尽管已有大量土壤水分变化影响林木光合生理生态学特性的报道^[4~7],然而截止目前,针对三峡库区消落带这方面的专门性研究工作还未得到有效开展,现有的可用于指导三峡库区消落带植被恢复建设的适生树种研究成果也仅停留在生物学特性上^[8,9]。

因此,本研究的目的是从生理生态学的角度来认识消落带适生树种光合特性以及适应机理,进行适生树种的优选,以期为三峡库区消落带植被恢复建设提供技术和理论支撑。

1 材料和方法

1.1 研究树种和地点

本实验选择落羽杉(*Taxodium distichum* L. Rich)当年实生幼苗作为研究对象。2004 年 6 月中旬将生长基本一致的 120 株幼苗带土盆栽(土壤为紫色土),每盆 1 株。盆中央内径为 13cm,盆内土层厚度 12cm。将所有盆栽实验用苗置于西南师范大学生态实验园地中(海拔高度 249m)进行相同土壤基质、光照和水分管理适应,于 7 月 25 日搭建透明塑料遮雨棚,开展实验。

研究树种落羽杉原产北美东南部,现已广泛引种到世界各地,我国引种已有 80 多年历史。该树种生长快,树干基部通常膨大,具膝状呼吸根、叶条形羽状,通常生长于沼泽地区,耐湿性很强^[10]。

1.2 实验设计

将实验用苗随机分成 4 组,每组 30 盆,包括对照组 CK、轻度干旱组 T1、水分饱和组 T2 和水淹组 T3。CK 即为常规生长组,土壤含水量为田间持水量的 60%~63%(土壤含水量采用称重法测定),落羽杉幼苗在晴天无萎焉现象。T1 组为轻度水分胁迫,土壤含水量为田间持水量的 47%~50%,植株嫩叶在晴天 13h 左右出现萎焉,17h 左右恢复正常^[11,12]。T2 组为土壤表面一直处于潮湿状态的水饱和土壤。T3 组在本实验中为苗木根部土壤全部淹没,淹水超过土壤表面 1cm。水淹处理时,将苗盆放入直径为 68cm、高 22cm 的大型塑料盆内,然后向盆内注水,直到盆内水面超过土壤表面 1cm 为止^[13]。

从实验处理之日算起,每间隔 5d 为 1 个处理期,对各项生理生化指标连续进行 5 次测定,每个处理每次测定 5 个重复,8 月 25 日正式结束实验。

1.3 叶片交换气体参数的测定

选取植株从上到下数的第 3 至第 4 片叶在饱和光强下完成光诱导后,使用 CI-310 POS 便携式光合系统直接测定叶片气体交换系数。所有测定均在 9:00~11:00 25℃ 的室温环境下完成。每次测定在 400 μmol/L CO₂ 和 1 000 μmol photons/(m² · s) 光强下测定叶片的净光合速率。测定参数包括净光合速率(*P_n*)、蒸腾速率(*Tr*)、气孔导度(*g_s*)、气温(*T_a*)、叶温(*T_l*)、空气相对湿度(*RHi*)、胞间 CO₂ 浓度(*C_i*)。水分利用效率(*WUE*) = *P_n*/*Tr*^[14]、光能利用效率(*LUE*) = *P_n*/*PAR*^[15,16]、CO₂ 利用效率

(CUE) = P_n/C_i ^[4]。

1.4 光合色素含量的测定

采用浸提法^[17]用岛津 5220 分光光度计测定叶绿素($Chls$)、类胡萝卜素(Car)含量。

1.5 统计分析

根据测定生理指标,将水分处理作为独立因数,用一元方差分析(One-way ANOVA)揭示水分变化对落羽杉生理特征的影响(GLM 程序,SPSS 10.0 版)。若主效应显著用 Duncan 检验法进行多重比较,检验每个生理指标在处理间($\alpha=0.05$)的差异显著性^[18]。

2 结果

2.1 光合色素的变化

方差分析结果(见表 1)显示,不同水分处理对落羽杉幼苗光合色素含量的影响极其显著。落羽杉幼苗叶绿素含量、类胡萝卜素含量、叶绿素 a/b 、叶绿素与类胡萝卜素比值($Chls/Car$)均随着土壤含水量变化而出现不同程度的变化。在 4 组中,T3 组光合色素含量一直处于最低,受到影响最大且最为明显(见图 1)。

T1 和 T2 组在干重条件下的叶绿素含量、类胡萝卜素含量与 CK 组并无显著差异性;相反,T3 组不仅与 CK 组有极显著差异,还与另外两处理组差异显著,其光合色素含量最少。落羽杉幼苗叶绿素和类胡萝卜素干、鲜重含量在整个实验期的总体变化趋势大体相似;叶绿素 a/b 比值与叶绿素和类胡萝卜素比值也有基本相同的变化趋势。叶绿素 a 与 b 比值介于 2.043~2.691 之间波动, $Chls$ 与 Car 的比值则介于 3.079~4.514 之间波动。

表 1 不同水分处理对落羽杉幼苗生理特征影响方差分析结果

Table 1 The results of ANOVA of the effects of different water treatment on the physiological characteristics of <i>T. distichum</i> seedlings			
特征 Character	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	概率 Probability	显著性 Significance
叶绿素鲜重含量 $Chls(a+b)$ (fw)	40.157	0.000	* * *
叶绿素干重含量 $Chls(a+b)$ (dw)	50.022	0.000	* * *
类胡萝卜素鲜重含量 Car (fw)	30.196	0.000	* * *
类胡萝卜素干重含量 Car (dw)	42.524	0.000	* * *
叶绿素 a/b $Chls a/b$	20.202	0.000	* * *
叶绿素/类胡萝卜素 $Chls/Car$	33.052	0.000	* * *
净光合速率 P_n	34.524	0.000	* * *
蒸腾速率 Tr	52.658	0.000	* * *
气孔导度 g_s	100.743	0.000	* * *
胞间 CO_2 浓度 C_i	1.055	0.373	ns
水分利用效率 WUE , Water use efficiency	18.223	0.000	* * *
光能利用效率 LUE , Light use efficiency	35.109	0.000	* * *
CO_2 利用效率 CUE , CO_2 use efficiency	26.627	0.000	* * *

显著水平 Significance levels: * * * $p<0.001$; * * $p<0.01$; * $p<0.05$; ns $p>0.05$; “fw”指鲜重条件下测量值,“dw”指干重条件下测量值;“fw” refers to fresh weight, and “dw” means dry weight

2.2 气体交换的变化

如表 1 所示,水分梯度能显著影响落羽杉幼苗光合气体交换,对 P_n 、 Tr 以及 g_s 的影响均达到极显著性。随着处理时间延长, P_n 在各处理组之间的变化不同,CK 组的 P_n 出现连续上升,与 T2 和 T3 组连续下降形成鲜明对比,然而 T1 组却介于上述二者之间,表现出上升下降交替出现趋势(见图 2)。就整个实验期的总平均值而言,T2 和 T3 组以及二者与 CK 组之间并无显著差异,T1 组与其他 3 组差异均极其显著。落羽杉幼苗在干旱水分胁迫环境下,会出现较低的净光合速率,比正常下降 24.9%;相反在土壤饱和水与水淹环境下,其光合能力并未受到任何影响,与正常生长条件下相一致,进而证实落羽杉树种的喜水和耐水淹生理学特性。

落羽杉幼苗 Tr 和 g_s 在各组之间的变化差异均十分显著。在整个实验期,各处理组 Tr 和 g_s 平均值均随着土壤水分含量的增加而递增,二者的变化规律有很大的相似性。随着水分处理的继续,T1、T2 和 T3 组的 Tr 和 g_s 平均值均有接近 CK 组平均值的的发展趋势,表现出落羽杉幼苗对逆境条件的自我调适性功能和可塑性特征。

落羽杉幼苗 P_n 与 Tr 和 g_s 之间的变化不具有同步性,但 Tr 和 g_s 之间的变化却具有很强的同步性变化特征。

2.3 资源利用效率的变化

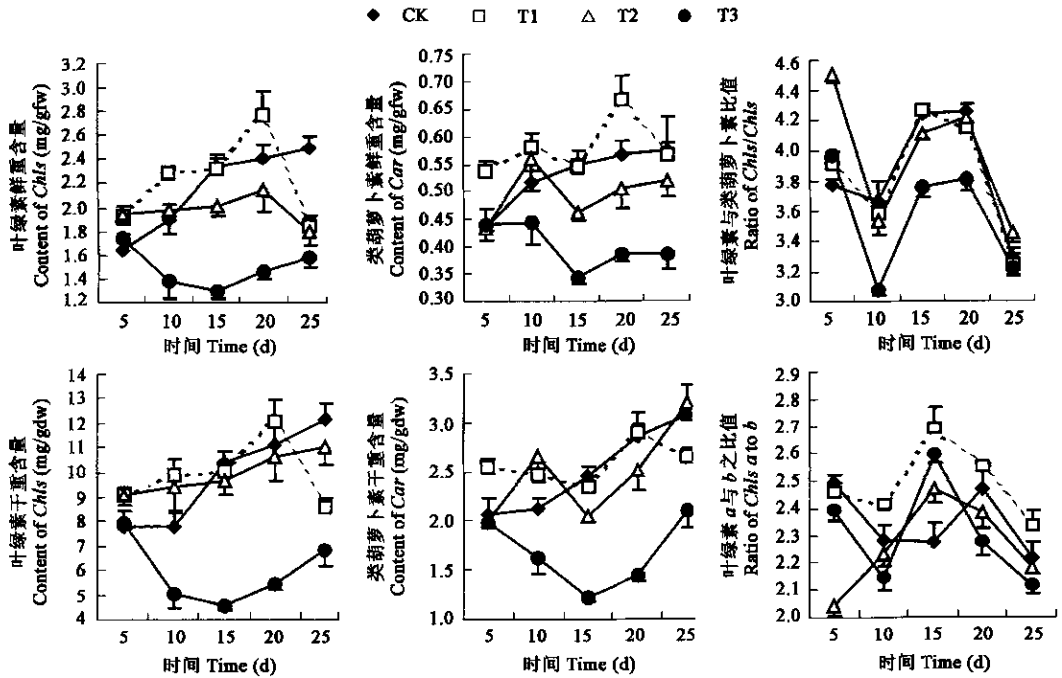


图1 不同水分条件下落羽杉幼苗的光合色素含量变化(±标准误)

Fig.1 The change of photosynthetic pigment content of *T. distichum* seedlings under different water treatment (±SE)

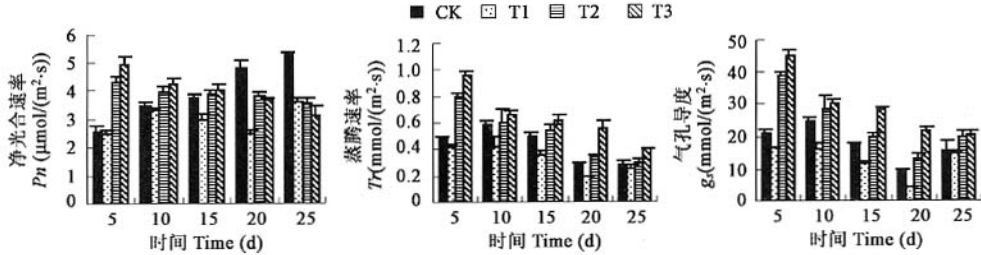


图2 落羽杉幼苗在不同水分条件下净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的变化(±标准误)

Fig.2 The change of P_n , T_r and g_s of *T. distichum* seedlings under different water treatment(±SE)

不同水分处理对落羽杉幼苗资源利用效率的影响极其显著(见表1)。4个处理组的 WUE 均随时间的延长而持续增加,但以CK组增加最快,第5次测量平均值比第1次增加2.892倍;然而T3组的 WUE 却只增加0.510倍,另外两组T1和T2的 WUE 增长介于他们之间,分别为1.457倍和1.249倍。CK、T1、T2和T3组的 WUE 总平均值分别为11.004、9.592、8.818和6.571 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$,以CK组的 WUE 最高,另3组则随着土壤水分含量增加而显著降低。

落羽杉幼苗 LUE 和 CUE 具有相似变化规律,二者受到水分的影响特别显著(分别见图3和表1)。在整个实验期,CK、T1、T2和T3组的 LUE 总平均值分别为3.891、2.911、3.827和3.942 $\text{mmol CO}_2/\text{mol photons}$; CUE 的总平均值分别为9.722、7.467、9.564和9.807 $\text{mmol}/\text{mol CO}_2$ 。T1组的 LUE 、 CUE 与CK组以及T2、T3组均有显著差异,但T2、T3、CK组相互之间均无显著差异,这更进一步说明落羽杉幼苗对渍水和水淹环境的适宜性特征。

2.4 相关性分析

相关性分析结果(见表2)显示,落羽杉幼苗 P_n 与 T_r 、 g_s 、 WUE 、 LUE 以及 CUE 均达到极显著正相关,这说明落羽杉幼苗净光合速率 P_n 受到这些因子的影响极其显著。相反, P_n 与叶绿素、类胡萝卜素以及他们的比值均无明显相关关系,而只与叶绿素 a/b 的比值表现出极显著负相关。

落羽杉幼苗 P_n 与大气相对湿度和胞间 CO_2 浓度无显著相关性; T_r 与 g_s 表现出极显著正相关的同时,与 WUE 表现出极显著的负相关。

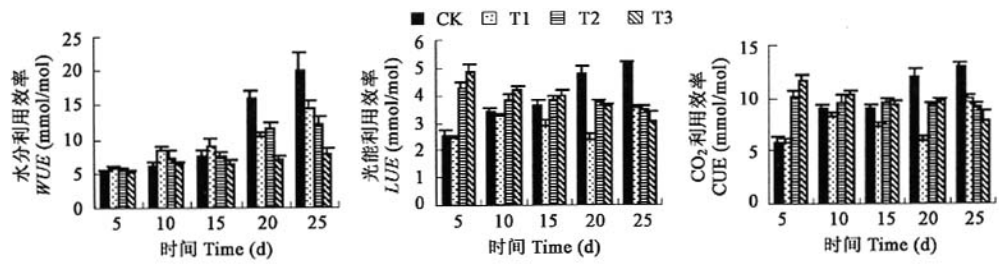


图3 落羽杉幼苗在不同水分条件下水分利用效率、光能利用效率和CO₂利用效率的变化(±标准误)

Fig. 3 The change of WUE, LUE and CUE of *T. distichum* seedlings under different water treatment (±SE)

表2 落羽杉幼苗净光合速率与其他指标相关性分析

Table 2 Correlations between Pn and other parameters in *T. distichum* seedlings

	<i>Pn</i>	<i>Tr</i>	<i>g_s</i>	<i>WUE</i>	<i>LUE</i>	<i>CUE</i>	<i>Chls(dw)</i>	<i>Car(dw)</i>	<i>Chls a/b</i>	<i>Chls/Car</i>
<i>Tr</i>	0.303**									
<i>g_s</i>	0.352**	0.891**								
<i>WUE</i>	0.364**	−0.683**	−0.539**							
<i>LUE</i>	0.999**	0.315**	0.364**	0.354**						
<i>CUE</i>	0.967**	0.254*	0.307**	0.393**	0.964**					
<i>Chls(dw)</i>	0.021	−0.421**	−0.488**	0.414**	−0.027	−0.036				
<i>Car(dw)</i>	−0.013	−0.474**	−0.499**	0.414**	−0.094	−0.060	0.820**			
<i>Chls a/b</i>	−0.273**	−0.180	−0.347**	−0.028	−0.274**	−0.311**	0.223*	0.142		
<i>Chls/Car</i>	−0.029	0.112	−0.072	−0.150	−0.024	−0.122	0.428**	0.121	0.397**	
<i>RHi</i>	0.053	−0.102	0.145	0.209*	0.051	0.140	−0.215*	−0.037	−0.551**	−0.748**
<i>Ci</i>	0.059	0.152	0.132	−0.143	0.067	−0.195	0.056	−0.076	0.184	0.357**

*表示在α=0.01水平下相关性达到极显著(两尾检验);*表示在α=0.05水平下相关性达到显著(两尾检验)。**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); *Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

3 讨论

落羽杉幼苗在水淹条件下,叶绿素的合成低于正常生长 36.47%,类胡萝卜素低于正常生长 33.41%。然而,水淹所造成的落羽杉幼苗光合色素含量严重下降并未影响到使其净光合速率也随之下降的程度,这很可能是由于水淹条件下落羽杉幼苗具有显著高于CK组的气孔导度所致。落羽杉幼苗光合色素含量虽然显著降低,在一定程度上可能影响到光能合成作用,但大开度的气孔可以增加CO₂的进入和光合气体交换面积、时间以及交换总量,从而弥补因光合色素含量减少可能引起的光合作用降低。另一方面,水淹条件下落羽杉幼苗的胞间CO₂含量并未出现明显变化(见表1),与对照组相比无显著差异性,说明叶肉细胞利用CO₂的能力并未降低,仍然保持着正常水平,再次确保了其净光合速率不下降。

实验发现落羽杉幼苗光合色素含量*Chls/Car*的比值大于3:1与*Chls a/b*的比值小于3:1形成鲜明对照,这可能是落羽杉光合色素含量的重要特征之一。一般来说,正常叶子的上述两项比值均约为3:1^[19]。落羽杉幼苗具有光合色素含量的上述比例特征,是由于光照以及其他多种因素产生的,与其光合能力和适应逆境的光合生理生化特性密切相关。*Chls/Car*的比值大于3:1可以起到提高叶绿素在光合色素中相对含量比例进而增加光合能力的作用;也同时起到确保有足够反应中心色素的作用。*Chls a/b*的比值小于3:1可起到保证有充足的聚光色素参与光能合成的作用,使叶绿素*a*与*b*的分配比例显得更加合理高效^[20,21],以利于植物朝着最优化的光合作用方向发展^[22]。落羽杉幼苗净光合速率只与*Chls a/b*比值成极显著负相关,也说明落羽杉树种在光合色素分配上的合理性。

落羽杉幼苗净光合速率受到多种因素影响,光合气体交换参数以及资源利用效率是其重要的影响因子^[23,24,25]。在整个实验期,CK、T1、T2和T3等4个处理组的*Pn*总平均值分别为3.960、2.972、3.904和4.004 μmolCO₂/(m²·s)。落羽杉幼苗在湿害和涝害的逆境中仍然有保持其正常净光合速率的能力;相反,在干旱水分胁迫条件下其净光合速率受到严重影响,这与落羽杉幼苗*g_s*和*Tr*的变化规律密切相关。在三峡库区消落带环境条件下,当处于过多的土壤水分环境时(如T2、T3组所设定的环境条件),落羽杉将加大叶片气孔导度,提高蒸腾速率,增强生理活性,增大水分利用效率,保持或提高光能利用效率和CO₂利用效率,合成更多光合产物以满足呼吸速率提高的需要,克服根部处于缺氧的环境条件以及过多水分带来的不利影响,最终保持其净光合速率的正常水平。当处于过少的土壤水分环境时(如T1组所设定的环境条件),落羽杉将因水分不足而降低气孔导度,减小蒸腾速率,提高水分利用效率,进而降低光能利用效率和CO₂利用效率,最终导致净光合速率的减少。

轻度干旱组和水饱和、水淹两个处理组处于正常生长条件所需水分的两个不同发展方向,其相关性分析应当进一步考虑单个处理组内各光合气体交换参数之间的情况。如各组的 P_n 和 T_r 均遵循二次多项式变化规律, T3 组的 $P_n = -0.0014Tr^2 + 0.1467Tr + 0.9905$, 其相关系数 $R = 0.715$, 明显大于 4 个处理组整体相关系数 (0.352^{**})。

综合落羽杉光合生理生态适应性特征, 可以考虑将落羽杉树种列为三峡库区消落带防护林体系建设树种之一。但在栽植营造以及管护时, 须充分考虑该树种的喜水耐湿性特征, 避免将其置于干旱环境之中, 以免造成不应有的浪费和损失, 给造林地的库区库岸安全带来隐患。

References:

- [1] Diao C T, Huang J H. A preliminary study on land resources of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1999, **8** (1): 75~80.
- [2] Zhang H J, Gao Z Q, Xie M S, *et al.* Overall arrangement of multi-functional protection forest system in the Three-Gorge Reservoir Area of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2000, **9** (4): 479~486.
- [3] Huang J H. Development and utilization of land resources of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 1994, **19** (5): 528~533.
- [4] He W M, Ma F Y. Effects of water gradient on fluorescence characteristics and gas exchange in *Sabina vulgaris* seedlings. *Acta Phytoecological Sinica*, 2000, **24** (5): 630~634.
- [5] Liu W L, Xie S X, Yu L F. Physiological response of several karst common tree species seedlings to water stress. *Guizhou Science*, 2003, **21** (3): 51~55.
- [6] Chen D X, Li Y D, Luo T S, *et al.* Study on photosynthetic physiological ecology of *Cryptocarya chinensis* in tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hailan Island. *Forest Research*, 2003, **16** (5): 540~547.
- [7] Ma C C, Gao Y B, Wang J L, *et al.* Ecological adaptation of *Caragana opulens* on the Inner Mongolia Plateau; Photosynthesis and water metabolism. *Acta Phytoecological Sinica*, 2004, **28** (3): 305~311.
- [8] He Z A, Chen W D, Gao Z J, *et al.* Investigative study on the property of urban greening trees in submersion. *Hu'nan Science and Technology of Forestry*, 1997, **24** (2): 70~72.
- [9] Xiao W F, Li J W, Yu C Q, *et al.* *Terrestrial animal and plant ecology of the Three Gorges of Yangtze River*. Chongqing: Press of Southwest China Normal University, 2000. 1~20.
- [10] Wang Q M, Jiang Z P, Lü X S, *et al.* Studies on the variation of provenances and families in Genus *Taxodium*; Introduction to the genus. *Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology*, 1995, **22** (2): 14~18.
- [11] Hu X S, Wang S J. A review of studies on water stress and drought tolerance in tree species. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, **34** (2): 77~88.
- [12] Hu Z S, Xu C Q, Fu R S. Physiological response for *Castanea henryi* seedling under water stress and the action of 6-BA. *Journal of Fujian Forestry College*, 2000, **20** (3): 1~4.
- [13] Bragina T V, Martinovich L I, Rodionova N A, *et al.* Ethylene-induced activation of xylanase in adventitious roots of maize as a response to the stress effect of root submersion. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2001, **37** (6): 618~621.
- [14] Nijs I, Ferris R, Blum H. Stomatal regulation in a changing climate: A field study using free air temperature increase (FATI) and free air CO₂ enrichment. *Plant, Cell and Environment*, 1997, **20**: 1041~1050.
- [15] Long S P, Baker N R, Raines C A. Analyzing the responses of photosynthetic CO₂ assimilation to long-term elevation of atmospheric CO₂ concentration. *Vegetation*, 1993, **104/105**: 33~45.
- [16] Penuelas J, Filella I, Llusia J, *et al.* Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the Mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. *Journal of Experimental Botany*, 1998, **49** (319): 229~238.
- [17] Zou Q. *Experimental introduction of plant physiology and biochemistry*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1995. 36~39.
- [18] Du R Q. *Biostatistics*. Beijing: Higher Education Press, 2003. 104~116.
- [19] Pan R C, Wang X J, Li N H. *Plant physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2004. 64~68.
- [20] Scholes J D, Press M C, Zipperlen S W. Differences in light energy utilization and dissipation between dipterocarp rainforest tree seedlings. *Oecologia*, 1997, **109**: 41~48.
- [21] Lee D W, Bone R A, Tarsis S L, *et al.* Correlations of leaf optical properties in tropical forest sun and extreme-shade plants. *Am. J. Bot.*, 1990, **77**: 370~380.
- [22] Ronzhina D A, Nekrasova G F, P'yankov V I. Comparative characterization of the pigment complex in emergent, floating, and submerged leaves of hydrophytes. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2004, **51** (1): 21~27.

[23] Anderson P H, Pezeshki S R. The effects of intermittent flooding on seedlings of three forest species. *Photosynthetica*, 1999, **37** (4): 543~552.

[24] Eclan J M, Pezeshki S R. Effects of flooding on susceptibility of *Taxodium distichum* L. seedlings to drought. *Photosynthetica*, 2002, **40** (2): 177~182.

[25] Wang G B, Cao F L. Effects of soil water and salt contents on photosynthetic characteristics of *Taxodium distichum*. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural science edition)*, 2004, **28** (3): 14~18.

参考文献:

[1] 刁承泰,黄京鸿. 三峡水库水位涨落带土地资源的研究. 长江流域资源与环境, 1999, **8** (1): 75~80.

[2] 张洪江,高中琪,解明曙,等. 三峡库区多功能防护林体系构成与布局的思考. 长江流域资源与环境, 2000, **9** (4): 479~486.

[3] 黄京鸿. 三峡水库水位涨落带的土地资源及其开发利用. 西南师范大学学报(自然科学版), 1994, **19** (5): 528~533.

[4] 何维明,马风云. 水分梯度对沙地柏幼苗荧光特征和气体交换的影响. 植物生态学报, 2000, **24** (5): 630~634.

[5] 刘伟玲,谢双喜,喻理飞. 几种喀斯特森林树种幼苗对水分胁迫的生理响应. 贵州科学, 2003, **21** (3): 51~55.

[6] 陈德祥,李意德,骆士寿,等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林下层乔木中华厚壳桂光合生理生态特性的研究. 林业科学研究, 2003, **16** (5): 540~547.

[7] 马成仓,高玉葆,王金龙,等. 内蒙古高原甘蒙锦鸡儿光合作用和水分代谢的生态适应性研究. 植物生态学报, 2004, **28** (3): 305~311.

[8] 何正安,陈卫东,高志军,等. 常见城镇绿化树种耐水淹性状调查研究. 湖南林业科技, 1997, **24** (2): 70~72.

[9] 肖文发,李建文,于长青,等. 长江三峡库区陆生动植物生态. 重庆:西南师范大学出版社,2000. 1~20.

[10] 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. 江苏林业科技, 1995, **22** (2): 14~18.

[11] 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. 林业科学, 1998, **34** (2): 77~88.

[12] 胡哲森,许长钦,傅瑞树. 锥栗幼苗对水分胁迫的生理响应及 6-BA 的作用. 福建林学院学报, 2000, **20** (3): 1~4.

[17] 邹琦. 植物生理学 with 生物化学实验指导. 北京:中国农业出版社, 1995. 36~39.

[18] 杜荣骞. 生物统计学. 第二版. 北京:高等教育出版社, 2003. 104~116.

[19] 潘瑞炽,王小菁,李娘辉. 植物生理学. 第五版. 北京:高等教育出版社, 2004. 66~68.

[25] 汪贵斌,曹福亮. 土壤盐分及水分含量对落羽杉光合特性的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, **28** (3): 14~18.