

文章编号:1001-1498(2006)01-0054-07

池杉幼苗对不同土壤水分水平的光合生理响应

李昌晓^{1,2}, 钟章成^{1,2*}

(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)

摘要:为模拟三峡库区消落带土壤水分变化特征,作者设置了常规生长水分条件(CK)、轻度干旱水分胁迫(T_1)、土壤水饱和(T_2)以及水淹(T_3)4个不同处理组,研究池杉当年实生幼苗在三峡库区消落带水位变化条件下的光合生理生态响应机理和适应对策。研究结果表明,不同水分处理均显著影响池杉幼苗光合色素、叶片气体交换以及表观资源利用效率。池杉幼苗不仅具有耐水湿的特点,还具有一定程度的耐旱性。在消落带防护林体系建设中,池杉适宜栽植于土壤饱和水或渍水的环境中;在干旱环境条件下应注意浇水抗旱,使池杉保持正常的净光合速率。

关键词:三峡库区; 消落带; 池杉幼苗; 土壤水分水平; 光合生理响应

中图分类号:S718.43 **文献标识码:**A

Photosynthetic Physio-response of *Taxodium ascendens* Seedlings to Different Soil Water Gradients

LI Chang-xiao^{1,2}, ZHONG Zhang-cheng^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Southwest China Normal University 400715, Chongqing, China; 2. The State Education Ministry's Key Laboratory for the Eco-environment of Three Gorges Reservoir Area, Southwest China Normal University 400715, Chongqing, China)

Abstract: Upon simulation of soil water change of hydro-fluctuation belt in Three Gorges Reservoir Area, four different kinds of water treatment were applied to study the photosynthetic eco-physiological characteristics of *Taxodium ascendens* seedlings under the environment of hydro-fluctuation belt. Four kinds of water treatment were normal growth water condition (CK), light drought stress (T_1), soil water saturation (T_2) and soil submersion (T_3). The results showed that different water treatments could effectively influence the content of photosynthetic pigment, leaf gas exchange and apparent resources use efficiency of *Taxodium ascendens* seedlings. It was also demonstrated that the *Taxodium ascendens* seedlings could not only tolerate water submersion and wet condition but also endure a certain degree of drought. To establish protection forest system of hydro-fluctuation belt in Three Gorges Reservoir Area, the species *Taxodium ascendens* was suitable to be planted in conditions of root submersion or saturation soil water. In case planted in drought soil condition, this tree species should be watered appropriately in order to keep its normal net photosynthetic rate.

Key words: Three Gorges Reservoir Area, hydro-fluctuation belt, *Taxodium ascendens* seedlings, soil water gradients, photosynthetic physio-response

三峡库区消落带因水位周期性常年变化^[1~4],使得土壤含水量呈现出从干旱状态到全水淹状态的一系列梯度性变化,由此引起消落带植被体系的建

设和保护难度加大。消落带土壤含水量的这种梯度性变化势必影响到适生造林树种池杉(*Taxodium ascendens* Brongn.)的生长发育及其生理生态学特性,

收稿日期: 2005-04-22

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

作者简介: 李昌晓(1970 年—),男,四川渠县人,讲师,在职博士生,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: 钟章成,教授,博士生导师。E-mail: zzhong@swnu.edu.cn

尤其是该树种的光合特性。国内外对池杉树种的研究远不如对落羽杉 (*Taxodium distichum* (L.) Rich.) 树种的研究^[5~16]深入全面,而是大部分局限在生物学特性和生长发育规律上^[5~8,17~27],对于不同土壤水分条件下池杉树种的光合生理生态学特性却鲜有报道。

本研究的目的是认识不同土壤水分变化条件下适生树种池杉的光合生理生态响应机理和适应对策,以期为三峡库区消落带的植被恢复建设提供技术和理论指导。

1 材料和方法

1.1 研究树种和地点

本实验选择池杉当年1年生实生幼苗为研究对象。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)进行相同光照和水分管理,于7月25日搭建透明塑料遮雨棚,开展实验。

1.2 实验设计

将实验用苗分成4组,每组30盆,分别为对照组CK、轻度干旱组T₁、水分饱和组T₂和水淹组T₃。对照组CK即为常规生长组,土壤含水量为田间持水量的60%~63%(土壤含水量采用称质量法测定),池杉幼苗在晴天无萎蔫现象。轻度干旱组T₁即为轻度水分胁迫,土壤含水量为田间持水量的47%~50%,植株嫩叶在晴天13时左右出现萎蔫,17时左右恢复正常^[28~30]。水分饱和组T₂即为土壤表面一直处于潮湿状态的水饱和土壤。水淹组T₃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^[31]。对于T₂组,早上6时至晚上24时期间每隔2h检查一次土壤水分情况,如发现土壤表面不潮湿即开始补水,以维持土壤水分饱和状态;对于T₃组,当盆内水面超过淹没土壤仅0.8cm时,即开始补水,直至盆内水面超过土壤表面1cm。

从实验处理之日算起,每间隔5d为一个处理期,对各项生理生化指标进行连续测定,即分别在7月31日、8月6日、8月12日、8月18日和8月24日开展5次测定,每个处理每次测定5个重复。

1.3 叶片交换气体参数的测定

在预备实验的基础上,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,使用美国CID公司生产的CI-310 POS便携式光合系统直接测定叶片气体交换系数。所有测定均在上午9:00—11:00点内25℃的室温环境下完成。每次测定在400 μmol·L⁻¹ CO₂和1000 μmol·m⁻²·s⁻¹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(T_r)、气孔导度(G_s)、气温(T_a)、叶温(T_{leaf})、空气相对湿度(RH)、胞间CO₂浓度(C_i)。水分利用效率(WUE) = P_n/T_r ^[32]、表观光能利用效率(LUE_{app}) = P_n/PAR ^[33]、表观CO₂利用效率 = P_n/C_i 。

1.4 光合色素含量的测定

采用浸提法^[34]用岛津5220分光光度计测定叶绿素、类胡萝卜素含量。

1.5 统计分析

根据测定生理指标,将水分处理作为独立因素,用单因素方差分析揭示池杉对水分变化的光合生理生态响应。若主效应显著,用Duncan检验法进行多重比较,以检验每个生理指标在处理间($\alpha = 0.05$)的差异显著性^[35]。

2 结果与分析

2.1 光合色素的变化

方差分析结果(表1)显示,不同水分处理能显著影响池杉幼苗的光合色素含量。经Duncan检验多重比较,发现水淹处理组T₃的光合色素含量平均值最低,与对照组CK以及轻度干旱组T₁和水分饱

表1 不同水分处理对池杉幼苗生理特征影响方差分析

特征	F值	概率	显著性
叶绿素(鲜质量)含量 $Chls(a+b)$ (FW)	12.403	0.000	***
叶绿素(干质量)含量 $Chls(a+b)$ (DW)	32.078	0.000	***
类胡萝卜素(鲜质量)含量 Car (FW)	11.79	0.000	***
类胡萝卜素(干质量)含量 Car (DW)	44.492	0.000	***
叶绿素 a/b $Chls a/b$	4.057	0.01	*
叶绿素/类胡萝卜素 $Chls(a+b)/Car$	8.382	0.000	***
净光合速率 P_n	39.115	0.000	***
蒸腾速率 T_r	61.621	0.000	***
气孔导度 G_s	71.17	0.000	***
水分利用效率 WUE	18.425	0.000	***
表观光能利用效率 LUE_{app}	38.309	0.000	***
表观CO ₂ 利用效率 CUE_{app}	38.565	0.000	***

显著水平: *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; ns $P > 0.05$ 。“FW”指鲜质量条件下测量值,“DW”指干质量条件下测量值;

和组 T 均有极显著差异(图 1)。相反, T₂ 组的光合色素含量最高, 在干质量条件下叶绿素和类胡萝卜素含量平均值明显高于 CK 组。而 T₁ 组在干质量条件下的光合色素含量则大于 T₃ 组, 小于 CK 组。在

整个实验期, 池杉幼苗叶绿素 a 与 b 比值介于 2.124 ~ 2.644 之间, 叶绿素与类胡萝卜素之比则介于 3.331 ~ 4.387 之间。

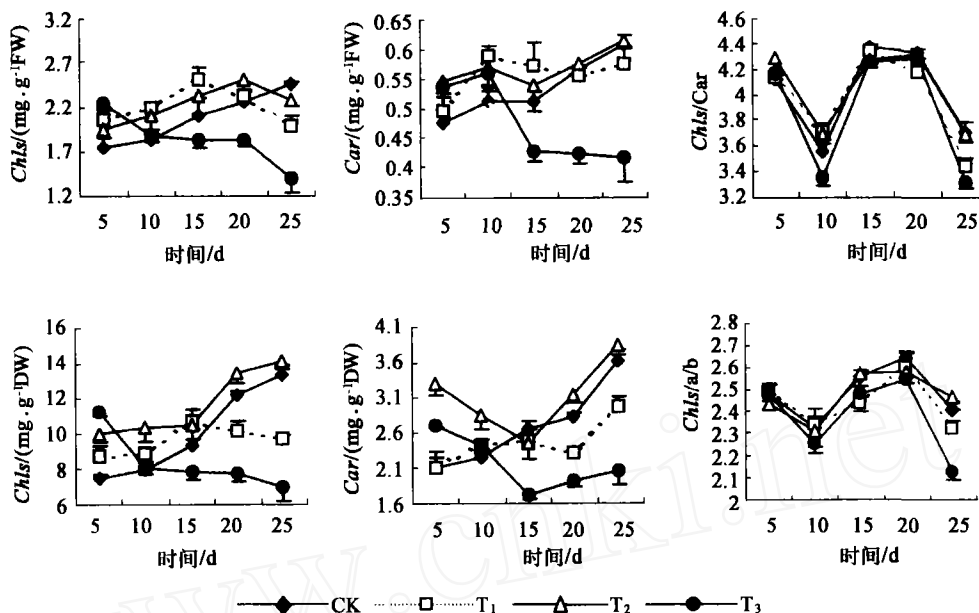


图 1 不同水分条件下池杉幼苗的光合色素含量变化

2.2 气体交换的变化

从表 1 可以看出, 不同水分变化能极其显著地影响池杉幼苗净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 和气孔导度 G_s 。经方差分析发现, 随着处理时间延长, 池杉幼苗光合气体交换的生理响应特性在各处理组之间表现各异(图 2)。

池杉幼苗的 P_n 在 CK 组呈现出连续上升的变化趋势, 与 T₂ 和 T₃ 组呈现出连续缓慢下降的趋势形成鲜明对比, T₁ 组则先下降后又有所回升。在整个处理期, T₂ 和 T₃ 组的净光合速率平均值无显著差异, 均高于 CK 组; 但以 T₂ 组最大, 高于 CK 组 9.421%, 且与 CK 组有极显著差异。相反, T₁ 组的

净光合速率平均值最低, 与另外 3 组均存在极显著差异, 低于 CK 组 23.062%。这说明池杉幼苗对水淹与渍水的环境条件具有积极的正向光合生理响应, 与对照组相比出现较高的净光合速率。

池杉幼苗的 T_r 和 G_s 具有极其相似的变化规律。T₂ 与 T₃ 组的 T_r 和 G_s 平均值均大于 CK 组, 且与 CK 组有极显著差异; T₁ 组的平均值略小于 CK 组, 但与 CK 组并无显著差异。4 组中以 T₂ 组的平均值最大。在整个实验期, T₂ 和 T₃ 组的蒸腾速率及气孔导度均随处理时间的延长而降低, 但 T₁ 组在连续下降之后略有回升, 与 CK 组先上升后下降的变化趋势有所不同。

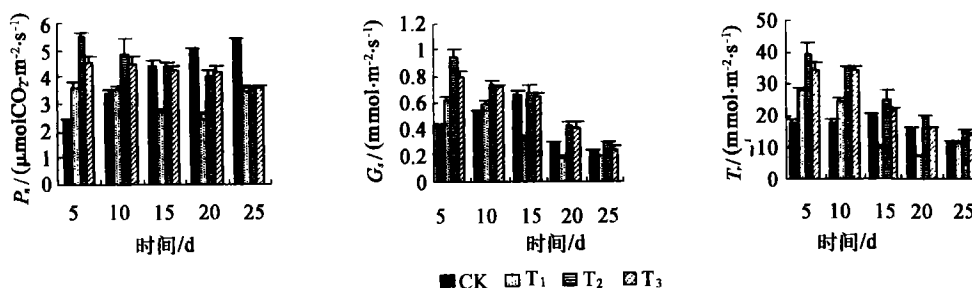


图 2 池杉幼苗在不同水分条件下净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的变化(±标准误)

2.3 资源利用效率的变化

表 1 方差分析结果显示,水分梯度对池杉幼苗资源利用效率的影响极其显著。随着处理时间延长,池杉幼苗 4 个不同处理组的水分利用效率均持续增加,但以 CK 组增加最快,第 5 次测量平均值比第 1 次增加 3.439 倍;然而 T₂ 组却只增加 0.946 倍,另外两组 T₁ 和 T₃ 的 WUE 增长界于他们之间,分别为 1.946 倍和 1.667 倍。经 Duncan 检验多重

比较,发现 T₂ 和 T₃ 组在整个实验期的 WUE 平均值并无显著差异,但显著低于 T₁ 组和 CK 组(图 3)。

池杉幼苗表观光能利用效率 LUE_{app}、表观 CO₂ 利用效率 CUE_{app} 的整体平均值在 T₂ 和 T₃ 组之间无显著差异,但均高于 CK 组和 T₁ 组,表明池杉幼苗在渍水和水淹环境下具有较高的表观光能和 CO₂ 利用效率,相反在受到干旱水分胁迫时会出现较低的表观光能及 CO₂ 利用效率。

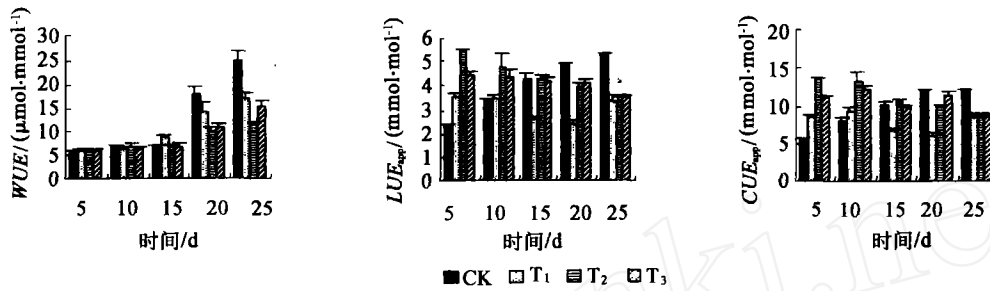


图 3 池杉幼苗在不同水分条件下水分利用效率、表观光能利用效率和表观 CO₂ 利用效率的变化(±标准误)

2.4 相关性分析

经相关性分析(表 2),发现池杉幼苗 P_n 与 T_r、G_s、LUE_{app}、CUE_{app}、叶绿素和类胡萝卜素干质量含量均达极显著或显著正相关,说明池杉幼苗净光合速率受到这些因子的影响至少是显著的。但池杉幼苗

P_n 与 WUE、叶绿素鲜质量、类胡萝卜素鲜质量、叶绿素与类胡萝卜素比值、叶绿素 a 与 b 比值、大气相对湿度、胞间 CO₂ 浓度并未表现出直接显著相关性。与此同时,池杉幼苗 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。

表 2 池杉幼苗净光合速率与其他指标相关性分析

项目	P _n	T _r	G _s	WUE	LUE _{app}	CUE _{app}	Chls (DW)	Car (DW)	Chls a/b	Chls/Car
T _r	0.433**									
G _s	0.515**	0.905**								
WUE	0.16	-0.752**	-0.589**							
LUE _{app}	1.000**	0.434**	0.516**	0.159						
CUE _{app}	0.964**	0.463**	0.564**	0.081	0.964**					
Chls (DW)	0.230*	-0.198*	-0.116	0.334**	0.226*	0.175				
Car (DW)	0.280**	-0.078	0.048	0.310**	0.278**	0.233*	0.754**			
Chls a/b	-0.006	-0.059	-0.147	0.016	-0.015	-0.054	0.284**	0.072		
Chls/Car	0.031	0.188	0.01	-0.226*	0.021	-0.036	0.184	-0.102	0.710**	
RH	0.063	-0.220*	-0.033	0.386**	0.07	0.059	0.081	0.369**	-0.512**	-0.781**
C _i	0.05	-0.13	-0.195	0.239*	0.047	-0.211*	0.133	0.085	0.15	0.234*

** 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)。

3 结论与讨论

三峡库区消落带周期性水位变化对消落带适生植物将会产生某些独特的生理生态学影响,其中对适生植物的光合响应特性影响当属于重点研究领域。本实验选择的池杉树种属裸子植物杉科(Taxodiaceae)落羽杉属(Taxodium Rich.)^[6,7],原产于北

美东南部沼泽地区,树干基部膨大,通常具有膝壮呼吸根^[17,23],耐湿性很强,在我国长江流域多有引种^[25]。

通过本项实验研究,发现池杉幼苗 T₃ 组在整个实验期的叶绿素干质量含量平均值比 CK 组降低 16.951%,与 T₂ 组高出 CK 组 16.233% 形成鲜明对照;同样地, T₃ 组的类胡萝卜素干质量含量平均值

比 CK 组降低 19.393%，与 T_2 组高出 CK 组 15.387% 形成对比。这充分说明水淹处理将使池杉幼苗光合色素合成数量相对减少，而饱和水处理则反过来促进池杉幼苗的光合色素合成。然而，水淹处理所导致的光合色素含量减少并未影响到池杉净光合速率也随之下降的程度。由此可以推断，在水淹以及饱和水分条件下用于或参与池杉幼苗光能合成作用的光合色素含量至少是充足的，也就是说为进行光合作用需要发挥正常功能的光合色素分子数量得到了一定程度的保证。这与池杉幼苗光合色素分配比例有很大关系。前面已经提到，池杉幼苗在整个实验期叶绿素 a/b 比值始终小于 3:1，而叶绿素与类胡萝卜素比值则大于 3:1，与正常叶子上述两项比值均约为 3:1^[36] 的比例特征明显不同。光合单位由聚光色素系统和反应中心两部分构成，处于反应中心的叶绿素 a 分子是很少量的，其余的大部分叶绿素 a 和全部叶绿素 b、胡萝卜素、叶黄素都属于聚光色素。叶绿素与类胡萝卜素比值大于 3:1 既可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，又可同时起到确保有足够的反应中心色素的作用；叶绿素 a/b 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^[37]。上述光合色素分配结果十分有助于确保光合单位两部分的光合色素需求量，有利于植物朝着最优化的光合作用方向发展^[38]。

在不同水分梯度条件下，池杉净光合速率是检验其对逆境条件光合生理生态响应能力的一个极为重要的核心表征因子。在整个实验期，池杉幼苗的净光合速率 P_n 平均值分别为 T_1 组 $3.136 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < \text{CK 组 } 4.076 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < T_3$ 组 $4.208 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < T_2$ 组 $4.46 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经 Duncan 检验多重比较，得知 T_3 组 P_n 平均值与 CK 组并无显著差异，说明水淹状态下池杉幼苗具有很强的净光合速率正向响应能力，与轻度干旱条件下的净光合速率负向响应能力形成鲜明对比。 T_2 组 P_n 平均值最大且与 CK 组有极显著差异，说明饱和水状态下池杉幼苗具有最强的净光合速率正向响应能力。当然，各处理组净光合速率对水分梯度的上述响应结果还并不能代表各组的光能合成响应能力大小，因为很有可能在轻度干旱以及水淹条件下池杉幼苗用于抵抗逆境而消耗的光能合成产物要多于 CK 组和水分饱和和处理 T_2 组。

池杉幼苗对不同水分处理所表现出的净光合响应能力大小，与其光合气体交换参数以及资源利用效率具有密切关系。池杉幼苗在整个实验期的蒸腾速率 T_r 平均值分别为 T_1 组 $0.38 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < \text{CK 组 } 0.42 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < T_3$ 组 $0.56 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < T_2$ 组 $0.616 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，与气孔导度 G_s 的平均值 T_1 组 $16.296 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < \text{CK 组 } 16.612 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < T_3$ 组 $23.924 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < T_2$ 组 $26.916 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 具有基本一致的变化规律，而且 T_r 和 G_s 这种变化规律与池杉幼苗 P_n 平均值的变化保持着基本相同的对应排序。但是， T_1 组的 T_r 和 G_s 平均值在 Duncan 检验多重比较中并未出现 P_n 平均值与 CK 组有极显著差异的相同现象，相反表现出与 CK 组 T_r 及 G_s 平均值并无显著差异。这说明，尽管轻度干旱的水分胁迫条件能显著降低池杉幼苗的净光合速率，但是并未真正降低其蒸腾速率和气孔导度，这意味着在轻度干旱条件下池杉幼苗仍然保持着蒸腾速率和气孔导度的正常水平，并且可能还具有较高的光能合成正向响应能力。通过本项实验结果可以证明池杉幼苗不仅具有耐水淹和渍水的能力，还具有一定程度的耐旱性。

在三峡库区消落带环境条件下，当处于过多的水分环境时（如 T_2 、 T_3 组所设定的环境条件），池杉将加大叶片气孔导度，提高蒸腾速率，增强生理活性，使水分利用效率提高，保持或提高表观光能利用效率和表观 CO_2 利用效率，合成更多的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。当处于较少的土壤水分环境时（如 T_1 组所设定的环境条件），池杉将保持蒸腾速率和气孔导度的正常水平，努力维持正常生理活性，通过提高水分利用效率来缓解水分供应不足的矛盾，并同时适度降低表观光能利用效率和表观 CO_2 利用效率，消耗较多的光合产物以克服缺水带来的不利环境条件，最终导致净光合速率的减少。

土壤水分变化将影响林木光合生理生态响应特性^[39~46]。三峡库区消落带水位变化将显著地影响到适生树种池杉的多项光合生理特征。从本项实验研究结果来看，池杉树种对土壤水分变化具有很强的光合响应能力，对适应水分逆境条件具有较高的可塑性，不仅表现出耐水湿的特点，还表征出一定程度的耐旱性。在消落带防护林体系建设中，池杉适

宜栽植于土壤饱和水或渍水的环境中;在干旱环境条件下应注意浇水抗旱,使池杉保持正常的净光合速率。

本实验盆栽以及实验处理期间池杉尚处于生长期,故整个处理观测的时间还显得较短。同时,还应测定池杉幼苗生长量、生物量和存活率等项指标以利于进行综合分析。实验所用盆钵也显得太小,盆土太浅,还不能充分满足池杉移植苗生长空间的需要,这些都有待于在今后的实验中加以改进。

参考文献:

- [1] 黄京鸿. 三峡水库水位涨落带的土地资源及其开发利用[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1994, 19(5): 528~533
- [2] 刁承泰,黄京鸿. 三峡水库水位涨落带土地资源的研究[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(1): 75~80
- [3] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(4): 479~486
- [4] 肖文发,李建文,于长青,等. 长江三峡库区陆生动植物生态[M]. 重庆:西南师范大学出版社,2000:1~20
- [5] 曹福亮,方升佐,唐罗忠,等. 美国落羽杉种源试验初报——种子特性与苗期生长测定[J]. 南京林业大学学报,1995,19(1): 65~70
- [6] 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
- [7] 汪企明,王伟,蒋志新,等. 落羽杉属种源研究:生长和生物量变异[J]. 江苏林业科技,1998,25(1): 1~6
- [8] 黄利斌,汪企明,李晓储,等. 落羽杉属种源研究:扦插生根能力变异[J]. 江苏林业科技,2000,27(1): 1~6
- [9] 汪贵斌,曹福亮. 落羽杉抗性研究综述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, 26(6): 78~82
- [10] 汪贵斌,曹福亮. 盐胁迫对落羽杉生理及生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(3): 11~14
- [11] 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[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(3): 14~18
- [12] 郑松发,陈玉军,陈文沛,等. 深水裸滩红树植物与落羽杉生长适应性研究[J]. 林业科学研究, 2004, 17(5): 654~659
- [13] Conner W H, Mcleod K W, McCarron J K. Flooding and salinity effects on growth and survival of four common forested wetland species [J]. Wetlands Ecology and Management, 1997, 5: 99~109
- [14] Pezeshki S R, Santos M I. Relationships among rhizosphere oxygen deficiency, root restriction, photosynthesis, and growth in baldcypress (*Taxodium distichum* L.) seedlings [J]. Photosynthetica, 1998, 35(3): 381~390
- [15] Middleton B. Hydrochory, seed banks and regeneration dynamics along the landscape boundaries of a forested wetland [J]. Plant Ecology, 2000, 146: 169~184
- [16] Eclan J M, Pezeshki S R. Effects of flooding on susceptibility of *Taxodium distichum* L. seedlings to drought [J]. Photosynthetica, 2002, 40(2): 177~182
- [17] 顾永泉,余文,黄厚琦. 池杉林分生长量定期调查与研究[J]. 江苏林业科技,1995,22(1): 12~16
- [18] 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
- [19] 吴祖映,储家森,唐明荣,等. 土壤水分状况对池杉形态结构及生长状况的影响[J]. 浙江林学院学报, 1996, 13(3): 364~366
- [20] 范晓君,林震浩. 提高池杉裸根苗造林成活试验[J]. 江苏林业科技,1997,24(1): 49~50
- [21] 黄文丁,黄宝龙. 林农复合系统中的种群共存增益和林分控制[J]. 南京林业大学学报,1997,21(2): 22~26
- [22] 殷云龙,陈永辉. 中山杉与池杉、落羽杉和水杉对比造林的调查和评价[J]. 植物资源与环境,1997,6(3): 23~28
- [23] 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
- [24] 李培生,倪合根,王存富,等. 中山杉302与池杉江滩造林对比试验[J]. 江苏林业科技,1999,26(2): 33~35
- [25] 曾慧卿,薛建辉. 江苏池杉人工林培育研究综述[J]. 江苏林业科技,1999,26(3): 52~55
- [26] 李兆玉. 里下河地区不同树种耐水性的调查[J]. 江苏林业科技,1993,20(1): 28~29
- [27] 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,1999,16(2): 145~150
- [28] 郭连生,田有亮. 四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
- [29] 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
- [30] 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[J]. 福建林学院学报, 2000, 20(3): 1~4
- [31] 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 [J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2001, 37(6): 618~621
- [32] 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 [J]. Plant Cell and Environment, 1997, 20:1041~1050
- [33] Long S P, Baker N R, Raines C A. Analyzing the responses of photosynthetic CO₂ assimilation to long-term elevation of atmospheric CO₂ concentration [J]. Vegetation, 1993, 104/105:33~45
- [34] 邹琦. 植物生理学与生物化学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 1995:36~39
- [35] 杜荣骞. 生物统计学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2003:104~116
- [36] 潘瑞炽,王小菁,李娘辉. 植物生理学(第五版)[M]. 北京:高等教育出版社. 2004. 66~68
- [37] Scholes J D, Press M C, Zipperlen S W. Differences in light energy utilization and dissipation between dipterocarp rainforest tree seedlings [J]. Oecologia, 1997, 109:41~48

- [38] Rozzhina D A, Nekrasova G F, Pýankov 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
- [39] 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[J]. *植物生态学报*, 2000, 24 (5): 630 ~ 634
- [40] 隋德祥, 李意德, 骆土寿, 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[J]. *林业科学研究*, 2003, 16 (5): 540 ~ 547
- [41] 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[J]. *贵州科学*, 2003, 21 (3): 51 ~ 55
- [42] 赵平, 曾小平, 彭少麟. 植被恢复树种在不同实验光环境下叶片气体交换的生态适应特点[J]. *生态学杂志*, 2003, 22 (3): 1 ~ 8
- [43] 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[J]. *植物生态学报*, 2004, 28 (3): 305 ~ 311
- [44] 史胜青, 袁玉欣, 杨敏生, 等. 水分胁迫对4种苗木叶绿素荧光的光化学淬灭和非光化学淬灭的影响[J]. *林业科学*, 2004, 40 (1): 168 ~ 173
- [45] Anderson P H, Pezeshki S R. The effects of intermittent flooding on seedlings of three forest species [J]. *Photosynthetica*, 1999, 37 (4): 543 ~ 552
- [46] Simone O D, Junk W J, Schmidt W. Central Amazon floodplain forests: Root adaptations to prolonged flooding [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2003, 50 (6): 848 ~ 855

“森林空间结构量化分析方法”成果

达到国际同类研究的领先水平

2005年12月9日,国家林业局科技司在中国林科院主持召开了“森林空间结构量化分析方法”成果鉴定会。该成果源于中国林科院林业研究所承担的国家林业局“948”项目“天然林恢复和经营模式技术研究”。以唐守正院士、董乃钧教授等7人组成的鉴定委员会专家听取了课题组负责人惠刚盈研究员的汇报,详细查阅了有关材料,并进行了认真地质疑和讨论。鉴定意见认为:

空间结构是森林的重要特征,它反映了森林群落内林木的分布格局及其属性在空间上的排列方式。运用森林空间结构指标,对林木空间关系进行合理调控,可以促进森林的稳定和健康。该项目对林分空间结构指标体系进行了系统研究,对森林的科学经营具有重大的理论和实践意义。

该项研究定义了林木空间结构单元,通过理论推导和实践验证,提出了由参照树和4株最近相邻木组成的描述林分空间结构单元的最佳方法。通过离散性变量表达,实现了林分空间结构参数的统一描述。提出了新的森林空间结构量化分析方法(CFSS),创造性地提出了林分空间结构参数体系,包括角尺度,混交度和大小比数,以及各自的定义、计算公式和评判标准,丰富了森林空间结构指标,具有明显的生物学意义,而且可释性强、操作简单,便于生产应用。

在东北阔叶红松林和其它地区其它类型林分的应用表明,CFSS方法既能准确地描述林分的状态,又能指导经营者遵循经营方向对林分进行结构量化调整,为制定有针对性的经营措施提供了可能。

该项研究选题正确,总体思路清晰,研究方法先进,提出的空间结构单元概念明确,构筑的空间结构参数体系是一个明显的创新,对生态学种群空间分布格局的研究是一个理论贡献,应用前景广阔,总体达到国际同类研究的领先水平。

(林讯)