

西双版纳5种乔木对CO₂摩尔分数倍增的响应¹⁾

宋清海 张一平

(中国科学院热带森林生态学重点实验室(西双版纳热带植物园) 勐腊 666303)

摘要 使用LI-6400便携式光合作用测定仪测定了西双版纳地区5种乔木在CO₂摩尔分数从360 μmol·mol⁻¹倍增加到720 μmol·mol⁻¹倍生理生态指标的变化。结果表明:5种植物光合作用都有明显提高趋势,但提高幅度不同,幅度范围25%~118%。耐荫树种(云南玉蕊、大叶白颜树)提高幅度高于喜光树种。表观量子效率均提高,幅度范围7.8%~45.7%。华南石栎、红木荷和大叶白颜树发生光抑制,发生光抑制时的叶温和饱和水汽压差(V_{DP})较其他热带地区叶温和饱和水汽压差(V_{DP})小。水分利用效率(W_{UE})均明显提高,其中红木荷提高幅度最大为367%,千果榄仁最小为77%。气孔导度均降低,其中红木荷降低幅度最大为70%,大叶白颜树降幅最小为25%。暗呼吸作用均下降。要全面认识森林生态系统对CO₂摩尔分数升高的响应程度,应在更大空间和时间尺度上进行环境因子与植物生理研究。

关键词 生理生态; CO₂摩尔分数倍增; 暗呼吸速率; 西双版纳
分类号 Q948.158

Ecophysiological Responses of Five Tree Species to Elevated Carbon Dioxide Concentration in Xishuangbanna, China / Song Qinghai, Zhang Yiping (Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Chinese Academy of Sciences (Xishuangbanna Tropical Botanical Garden), Mengla 666303, P. R. China) // Journal of Northeast Forestry University. - 2011, 39 (2). - 17~20

An experiment was conducted to study the changes in ecophysiological indexes of five tree species in Xishuangbanna using portable LI-6400 photosynthesis system when carbon dioxide concentration varied from 360 to 720 μmol·mol⁻¹. Result showed that the net photosynthetic rates of the five tree species all increased with the elevation of carbon dioxide concentration, with an increase in the range of 25 percent and 118 percent. The increasing range of the shade-tolerant tree species was higher than that of the intolerant tree species. Apparent quantum yield of photosynthesis of the five tree species increased, with an increase ranging from 7.8 percent to 45.7 percent. Photosynthetic light responses of *Lithocarpus fenestrata*, *Schima wallichii*, *Gironniera subaequalis* were inhibited under high leaf temperature (TL) and vapor pressure deficit (VPD). However, the values of TL and VPD resulted in photoinhibition of *L. fenestrata*, *S. wallichii*, *G. subaequalis* were lower than those of some tree species in other tropical zones. Water use efficiency of all the tree species increased obviously with the increase of carbon dioxide concentration, and the increasing range for *S. wallichii* was the maximum (367%) and that for *T. myriocarpa* was the minimal (77%). Stomatal conductance of all the tree species decreased, and *S. wallichii* exhibited the maximum increasing range (70%) and *G. subaequalis* showed the minimal one (25%). Dark respiration rate of all the tree species also decreased. Studies on environmental factors and plant physiology at large time-space scales should be carried out to make a full understanding of responses of forest ecosystems to the elevated carbon dioxide concentration.

Keywords Physiological ecology; Elevated carbon dioxide; Dark respiration rate; Xishuangbanna

CO₂等温室气体浓度持续增加,致使全球气候系统正在发生着有史以来从未有过的急剧变化,主要表现在全球气候温暖化、降水格局变化、海平面上升等方面,给人类社会的可持续发展构成了严峻的挑战。大气CO₂摩尔分数的上升对生态系统最直接、也是最重要的影响是其所引起的光合作用变化。同时,还引起陆地生物圈的一系列反馈效应,影响着地球系统的辐射平衡和水循环。

热带雨林通过其物理特性和生理活动对全球的CO₂和水循环有重要的潜在影响。热带雨林以陆地生物量的形式拥有约40%的碳储量,并占有30%~50%的陆地初级生产力,因此这个生物群系的微小变化就可能引起全球碳循环的明显变化^[1]。

近年来对热带雨林的一些研究表明^[1-4],当叶片温度达

到26~34℃时净光合速率会显著下降。热带雨林林冠叶片温度一般高于空气温度1~7℃^[1-2],随着全球气温的不断增加,叶片温度也会增加,当温度达到40~55℃时,叶片光合机构可能会被破坏。Salafsky对印尼West Kalimantan地区长期降水量数据分析后发现^[5]:自1948年以来,干季降水量明显减少,导致森林生产力减少,增加了森林死亡率。目前在巴西亚马逊热带雨林有两个大尺度的干旱响应实验正在进行,初步的实验表明:次林冠树种的地上生物量增长量显著减少,许多树种光合速率下降。Fan和Graham指出^[6-7],光质和光强的任何变化都可能改变森林的碳平衡。Lovelock等^[8]在巴拿马热带森林对林冠叶片和小枝进行了超过40周的CO₂倍增实验,尽管CO₂的倍增使净光合速率提高了约30%,但生物量没有增加。Wurth等^[9]在巴拿马郁闭森林下对5种植物幼苗(1种草本、2种木本、1种灌木)进行实验,一半在CO₂倍增环境下生长,一半在环境CO₂摩尔分数下生长,7个月后,倍增环境中的幼苗生长均很明显,但随着林下光强的增强,这种响应会降低。

西双版纳地处北回归线以南,面积19 223 km²,其中山地(坡度>8°)面积占95%,山间盆地(坡度≤8°)面积占5%。西双版纳终年受西南季风控制,属热带季风气候,且地处内

1) 云南省自然科学基金项目(2008CD167)、国家重点基础研究发展计划(国家973项目)(2010CB833501)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-05-04)共同资助。

第一作者简介:宋清海,男,1979年12月生,中国科学院热带森林生态学重点实验室(西双版纳热带植物园)助理研究员。

通信作者:张一平,中国科学院热带森林生态学重点实验室(西双版纳热带植物园)研究员。

收稿日期:2010年8月30日。

责任编辑:潘华。

陆,森林内的气候要素特征不同于其他热带地区,森林群落结构复杂。西双版纳热带季节雨林也有明显的干湿季之分。由于西双版纳地处热带北缘,在全球变化时,森林生态系统所受到的影响更为显著,因此在该地区开展森林乔木对 CO_2 倍增响应研究,有助于预测未来气候变化对热带森林群落的影响,显得尤为重要。

本研究选取了西双版纳地区热带季节雨林 3 种优势乔木树种:千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、大叶白颜树(*Gironniera subaequalis*)、云南玉蕊(*Barringtonia macrostachya*)和处于热带季风常绿阔叶林向热带季节雨林过渡的 2 种乔木树种(华南石栎(*L. fenestratus* Rox b.) Rehd.)、红木荷(*S. wallichii* Choisy)为研究对象,以探讨自然生态环境中植物对 CO_2 摩尔分数升高的响应程度,并预测在未来新 CO_2 摩尔分数环境下对植被生理生态和生产力可能的影响等,从而有助于揭示这一特殊地区植物群落对 CO_2 摩尔分数升高的响应趋势和森林群落的演替规律等。

1 研究区概况与研究方法

1.1 样地自然环境及群落特征

观测点位于云南省西双版纳州勐腊县境内的国家级自然保护区内,海拔 756 m,位于热带的北缘,1 a 中有雾凉季(11—翌年 2 月份)、干热季(3—4 月份)、雨季(5—10 月份)之分,该地区独特的天气现象为雾日较多,年雾日可达 186.4 d。

研究地主要是以热带季节雨林为主,林分平均高度 35 m 左右,盖度为 90%,结构复杂,分层现象明显,乔木层按高度即可分为 3 层:上层高 30 m 以上,优势种主要为千果榄仁、绒毛番龙眼;中层高度在 16~30 m,常见种有云南玉蕊、大叶白颜树等;下层高 16 m 以下,主要种包括云树(*Garcinia cowl*)、假广子(*Knema erratica*)、细罗伞(*Ardisia tenera*)等。灌木层除上层乔木的幼苗幼树外,常见种有染木(*Saprosma ternatum*)、狭叶巴戟(*Morinda angustifolia*)、玉叶金花(*Mussaenda* sp.)等。草本层与灌木层处于同一层次,种类不多,常见的有凤尾蕨(*Pteris* sp.)、海芋(*Aloxisis macrorrhiza*)、盈江南星(*Arisaema inkiangense*)等,藤本及附生植物丰富,板根及茎花现象显著。

1.2 研究对象

在样地内选取热带季节雨林上层优势乔木树种:千果榄仁;中层优势树种:大叶白颜树、云南玉蕊;热带季风常绿阔叶

林的代表树种:华南石栎和红木荷。5 树种的研究样树均处在旺盛的生长期,测量时 5 树种的叶片均健康。

1.3 研究方法

测量使用 LI-6400 便携式光合作用测定仪(美国, LiCor 公司),测定及计算得到的指标包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、光合有效辐射(P_{AR})、空气 CO_2 摩尔分数(C_a)、胞间 CO_2 摩尔分数(C_i)、叶温(T_l)、气温(T_a)、气孔导度(G_s)、相对湿度(R_H)、光饱和点(L_{SP})、光补偿点(L_{CP})、表观量子效率(L_{PE})、水分利用效率(W_{UE})为净光合速率与蒸腾速率的比值。使用 CO_2 注入系统(CO_2 Mixer)控制 CO_2 摩尔分数,同时启动人工光源,将光强设定为 2 000、1 500、1 000、800、500、200、100、50、20、0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,每片叶片分别在 360 和 720 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 2 个浓度下进行光响应测量,每种树种叶片测量均重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 CO_2 摩尔分数倍增对 5 种树种光合特性的影响

CO_2 摩尔分数倍增,5 种树种 P_n 增加的相对幅度各不相同。在相近的空气温度和相对湿度条件下, CO_2 摩尔分数倍增,云南玉蕊 P_n 增加幅度最大,为 118.5%,其次是大叶白颜树 81.4%,千果榄仁 73.1%,华南石栎 32.5%,红木荷 P_n 增加幅度最小,为 25.3%。中层树种云南玉蕊和大叶白颜树表观量子效率增加幅度较大,分别为 45.7% 和 34.7%,其余 3 种提高幅度较小,见表 1。

云南玉蕊和千果榄仁在 CO_2 摩尔分数倍增条件下,随光合有效辐射的增强,没有出现光抑制,光合潜力还较大;而其余 3 种植物均出现光抑制现象。同时, CO_2 摩尔分数倍增还使 3 种植物光饱和点上升,延缓光抑制。产生光抑制的原因,有人认为是主要是光系统 II 反应中心受到破坏,有人认为是光系统 II 还原侧的 Q_B 蛋白受到损害。

CO_2 摩尔分数倍增,也引起光补偿点(L_{CP})和光饱和点(L_{SP})的变化。云南玉蕊和大叶白颜树的 L_{CP} 分别提高了 30% 和 9%。而千果榄仁、红木荷和华南石栎的 L_{CP} 均降低了,降低幅度分别为 8%、37% 和 11%。表观光量子效率(L_{PE})均提高,云南玉蕊提高最大(45.7%)、红木荷最小(7.8%) (表 1)。

表 1 不同 CO_2 摩尔分数下 5 树种光合特性的比较

树种	360 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$				720 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$					
	$L_{CP}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_{SP}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$P_{nmax}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	L_{PE}	$L_{CP}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_{SP}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$P_{nmax}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	L_{PE}		
云南玉蕊	10	510	4.68	0.0346	13	801	10.23	118.5	0.0504	45.7
千果榄仁	26	1018	12.25	0.0536	24	1809	21.2	73.1	0.0608	13.4
大叶白颜树	12	414	3.65	0.0326	13	618	6.63	81.4	0.0439	34.7
红木荷	19	604	4.55	0.0374	12	680	5.71	25.3	0.0403	7.8
华南石栎	18	757	6.37	0.0375	16	899	8.44	32.5	0.0414	10.4

2.2 CO_2 摩尔分数倍增对 5 树种气孔导度、蒸腾速率和瞬时水分利用效率的影响

气孔导度是反映植物进行 CO_2 和水汽交换能力的一个非常重要的指标。表 2 表明, CO_2 摩尔分数倍增,5 种植物气孔导度均降低,其中红木荷降低幅度最大,为 70%,大叶白颜树降幅最小,为 25%。降低幅度的平均值与生长在生物圈 2 号的 5 种热带雨林树种((蝶豆(*Clitoriaracemosa*)、花叶万年青(*Dieffenbachia picta*)、麒麟叶(*Epipremnum pinnatum*)、牵牛

(*Ipomuricata muricata*)、胡椒(*Piper nigrum*))因 CO_2 摩尔分数倍增引起气孔导度降低的幅度值(52%)接近^[10]。

蒸腾速率对 CO_2 倍增的响应与气孔导度基本一致。5 种乔木无论是气孔密度的降低还是气孔的部分关闭引起的气孔导度的降低,其结果都会导致蒸腾速率的下降(表 2)。

水分利用效率(W_{UE})是指植物蒸腾消耗单位质量的水分所同化的 CO_2 的量,常用净光合速率和蒸腾速率的比值表

示。表 2 中还显示, CO₂ 摩尔分数为 720 μmol · mol⁻¹ 时 5 种乔木的 W_{UE} 明显提高, 其中红木荷提高幅度最大, 为 367%, 千果榄仁最小, 为 77%。

表 2 不同 CO₂ 摩尔分数下 5 种树种气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)、水分利用效率 (W_{UE}) 的比较

树 种	360 μmol · mol ⁻¹			720 μmol · mol ⁻¹		
	G _s /μmol · m ⁻² · s ⁻¹	T _r /mmol · mol ⁻¹	W _{UE} /μmol · mol ⁻¹	G _s /μmol · m ⁻² · s ⁻¹	T _r /mmol · mol ⁻¹	W _{UE} /μmol · mol ⁻¹
	云南玉蕊	0.080	1.33	0.003 5	0.088	1.12
千果榄仁	0.057	1.78	0.006 9	0.082	1.74	0.012 2
大叶白颜树	0.041	0.57	0.006 4	0.032	0.48	0.014 2
红木荷	0.090	1.14	0.004 1	0.027	0.31	0.018 7
华南石栎	0.110	1.79	0.003 6	0.041	0.97	0.008 7

2.3 CO₂ 摩尔分数倍增对暗呼吸速率的影响

在相近的环境温度下 5 种树种暗呼吸速率均降低 (表 3), 红木荷降低幅度最大为 68%, 千果榄仁最小, 仅为 2%。与在生物圈 2 号所做的 5 种热带植物研究结果^[10] 不尽相同, 在生物圈 2 号内热带植物长期生长在高摩尔分数 CO₂ (> 1 500 μmol · mol⁻¹) 中, 光合作用增强, 碳水化合物含量增加, 呼吸作用的底物增加, 呼吸增强, 同时高摩尔分数 CO₂ 引起其他呼吸途径和生长加快需要更多的 ATP (三磷酸腺苷) 和 NADPH (辅酶 II) 等间接原因引起。而本实验是对生长在自然环境中的植物对人为控制 CO₂ 摩尔分数倍增的短期响应研究, 可能是由于胞间 CO₂ 摩尔分数瞬时升高, 固定 CO₂ 作用加强等直接原因造成。

表 3 不同 CO₂ 摩尔分数下 5 种树种暗呼吸速率 (R_d) 的比较

树 种	360 μmol · mol ⁻¹		720 μmol · mol ⁻¹	
	测定温度 T/°C	暗呼吸 R _d /μmol · m ⁻² · s ⁻¹	测定温度 T/°C	暗呼吸 R _d /μmol · m ⁻² · s ⁻¹
	云南玉蕊	24.8	0.304	25.7
千果榄仁	27.7	1.651	29.7	1.615
大叶白颜树	29.1	0.528	29.0	0.291
红木荷	27.5	1.041	26.7	0.351
华南石栎	27.2	0.642	26.9	0.436

植物暗呼吸作用释放的能量是植物其他生命过程的能源, 一些中间产物又是合成生物体内重要物质如蛋白质、脂类、色素等重要的原料。因此需要更多实验来研究暗呼吸作用对 CO₂ 摩尔分数升高的响应, 以达到如光合作用那样相对一致的结论。

3 讨论

CO₂ 摩尔分数倍增对 5 种植物光合速率都有明显提高趋势, 但提高幅度不同。云南玉蕊和大叶白颜树是热带季节雨林典型的耐荫树种, P_n 提高分别为 118.5% 和 81.4%, 而华南石栎、红木荷和千果榄仁是喜光植物, P_n 提高幅度较小, 这与 Bazzaz 等^[11] 研究结果一致, 即高浓度 CO₂ 引起光合速率的提高耐荫树种比喜光树种高得多。Lovelock 等^[12] 在巴拿马热带森林林缘对 10 种热带树种进行开顶式 CO₂ 倍增实验表明: 演替后期树种的响应程度小于顶极树种和演替前期树种。本实验与该结论一致, 雨林顶极树种 (云南玉蕊、大叶白颜树和千果榄仁) 在 CO₂ 倍增条件下净光合速率提高幅度明显高于演替后期的红木荷和华南石栎, 显示了顶极与演替前期树种对环境因子的响应更加敏感, 容易在新的生境下定居。

CO₂ 倍增条件下 5 种植物气孔导度均降低, 其中红木荷降低幅度最大, 为 70%, 大叶白颜树降幅最小, 为 25%。W_{UE} 均明显提高, 其中红木荷提高幅度最大, 植物 W_{UE} 的提高与

CO₂ 摩尔分数提高导致净光合速率提高和气孔导度下降有关。这是由于气孔在高 CO₂ 摩尔分数下变窄或关闭, 细胞内的水分向外扩散的阻力比 CO₂ 由气孔外向里运动的阻力大, 这样植物可以在细胞间隙内保持一定的水分和 CO₂ 进行光合作用, 而消耗单位质量的水 (蒸腾作用) 所固定的 CO₂ 数量增多, 即 W_{UE} 提高。多数研究表明, CO₂ 摩尔分数升高使 W_{UE} 提高是 P_n 提高和蒸腾作用降低共同作用的结果。但 Rogers 等^[13] 发现一些植物随 CO₂ 的增长 P_n 并未提高, 他们认为 W_{UE} 的提高仅仅是由于蒸腾下降所引起; Gunderson 等^[14] 发现 CO₂ 增加引起的 W_{UE} 提高是由于 P_n 的单独增加所致。

本研究中华南石栎、红木荷和大叶白颜树均发生光抑制 (表 4)。Ishida^[2] 研究表明: 马来西亚龙脑香属树种 (*Dryobalanops aromatica*) 冠层幼叶当 V_{PD} (水汽压差) 超过 2.5 kPa, 叶温超过 34 °C 时, 光合速率才会下降, 而老叶要在 V_{PD} 超过 3.5 kPa, 叶温超过 36 °C 时才会发生。非洲低地雨林的 *Dialium pachyphyllum* 要在 V_{PD} 超过 2.5 kPa, 叶温超过 36 °C 时气孔导度才会降低^[1]。台湾南仁山热带低地雨林白榕树 (*Ficus benjamina*) 在 3 月干季时, 发生抑制时的平均叶温为 31.9 °C, V_{PD} 为 2.5 kPa。光合速率的降低主要是气孔导度降低所致, 而气孔导度的降低又是由于叶温和水汽压差的升高而间接引起的。与之相比, 本研究中 3 种植物发生光抑制时的叶温较低, V_{PD} 较小, 这可能与本地区的自然环境有关。西双版纳地处热带的北缘, 终年受西南季风控制, 并且雾日数达半年之久, 植物长期生长在这种特殊环境中, 可能形成了一些与典型热带雨林有所差异的特征。这需要更进一步的探讨和论证。

表 4 不同树种叶片产生光抑制时环境因子值

树 种	360 μmol · mol ⁻¹		720 μmol · mol ⁻¹	
	叶温/°C	水汽压差/kPa	叶温/°C	水汽压差/kPa
	大叶白颜树	29.5	1.3	29.1
红木荷	29.0	1.3	26.0	1.1
华南石栎	33.2	1.8	35.3	2.2

目前, 对热带雨林成树在多种环境因子 (如光、高低温、旱涝、营养元素、空气污染、UV-B 等) 共同胁迫下的研究几乎没有^[15]。植物对 CO₂ 摩尔分数的升高在生化水平、器官水平、叶片水平及整个生态系统水平响应机理均存在差异, 高 CO₂ 摩尔分数下植物生理生态指标的变化究竟是光合适应还是光合驯化的结果还有待于进一步研究, 树种在多种环境因子共同作用下会做出怎样的响应等问题, 需要在更大空间和时间尺度上探讨和揭示。

4 小结

CO₂ 摩尔分数倍增 5 种植物光合作用都明显提高, 但提高幅度不同。云南玉蕊 P_n 增加幅度最大, 为 118.5%, 其次是大叶白颜树 81.4%, 千果榄仁 73.1%, 华南石栎 32.5%, 红木荷 P_n 增加幅度最小, 为 25.3%。云南玉蕊和大叶白颜树表观量子效率增加幅度较大, 分别为 45.7% 和 34.7%, 其余 3 种提高幅度较小。华南石栎、红木荷和大叶白颜树均发生光抑制, 发生光抑制时的叶温和 V_{PD} 较其他热带地区小。

CO₂ 摩尔分数倍增 5 种植物气孔导度均降低, 其中红木荷降低幅度最大, 为 70%, 大叶白颜树降幅最小, 为 25%。5 种树种 W_{UE} 均明显提高, 其中红木荷提高幅度最大, 为 367%, 千果榄仁最小, 为 77%。

在相近的环境温度下, CO₂ 摩尔分数倍增 5 种树种暗呼吸速率均降低, 红木荷降低幅度最大为 68%, 千果榄仁最小, 仅

为2%。

致谢: 本研究得到了中国科学院西双版纳热带森林生态系统定位研究站的大力支持。中国科学院西双版纳热带植物园郑征副研究员对本文提出了修改意见, 张教林博士给予了建议, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] Zotz G, Winter K. Diel patterns of CO₂ exchange in rainforest canopy plants [M]. New York: Tropical Forest Plant Ecophysiology, 1996: 89-113.
- [2] Ishida A, Toma T, Matsumoto Y, et al. Diurnal changes in leaf gas exchange characteristics in the uppermost canopy of a rain forest tree, *dryobalanops aromatica gaertn* [J]. Tree Physiology, 1996, 16: 779-785.
- [3] Keller M, Lerdau M. Isoprene emission from tropical forest canopy leaves [J]. Global Biogeochem Cycles, 1999, 13: 19-29.
- [4] Lerdau M T, Throp H L. Isoprene emission and photosynthesis in a tropical forest canopy: implications for model development [J]. Ecological Application, 1999, 9: 1109-1117.
- [5] Salafsky N. Drought in the rain forest. Part II: an update based on the 1994 ENSO event [J]. Climate Change, 1998, 39: 601-603.
- [6] Fan S M, Wofsy S C, Bakwin P S, et al. Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon forest [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 16: 851-864.
- [7] Graham E A, Mulkey S S, Kitajima K, et al. Cloud cover limits net CO₂ uptake and growth of a rainforest tree during tropical rainy

seasons [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100: 572-576.

- [8] Lovelock C E, Virgo A, Popp M, et al. Effects of elevated CO₂ concentrations on photosynthesis, growth and reproduction of branches of the tropical canopy tree species (*Luehea seemannii*) [J]. Plant Cell Environment, 1999, 22: 49-59.
- [9] Wurth M K R, Winter K, Corner C H. In situ responses to elevated CO₂ in tropical forest understorey plants [J]. Functional Ecology, 1998, 12: 886-895.
- [10] 蒋高明, 林光辉, Bruno D V. 几种热带雨林与荒漠植物暗呼吸作用对高 CO₂ 摩尔分数的响应 [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(4): 519-522.
- [11] Bazzaz F A, Coleman J S, Morse S R. Growth responses of seven major co-occurring tree species of the north-eastern United States to elevated CO₂ [J]. Canadian Journal Forest Research, 1990, 20: 1479-1484.
- [12] Lovelock C E, Winter K, Mersits R, et al. Responses of communities of tropical tree species to elevated CO₂ in a forest clearing [J]. Oecologia, 1998, 116: 207-218.
- [13] Rogers H H. Responses of selected plant species to elevated carbon dioxide in the field [J]. Journal of Environmental Quality, 1985, 12: 569-574.
- [14] Gunderson C A, Wullschlegel S D. Photosynthetic acclimation in trees to rising atmospheric CO₂: a broader perspective [J]. Photosynthesis Research, 1994, 39: 369-88.
- [15] Deborah A. The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition [J]. The Royal Society, 2004, 2: 477-491.

(上接12页) 段上诱导产生的芽体在生长速率上具有明显的优势。鞍杂杨生根与移栽较容易, 生根培养基以 1/2 MS + IBA 0.5 mg/L 为宜, 生根率可达 96.67%, 生根苗移栽至腐殖土栽培成活率 90% 以上, 无需使用蛭石与珍珠岩, 这对于规

模化生产而言, 省略了再次移栽至土壤的劳力与采购基质的成本, 在移栽初期应特别注意保湿。该研究为鞍杂杨的工厂化快繁提供了科学依据。

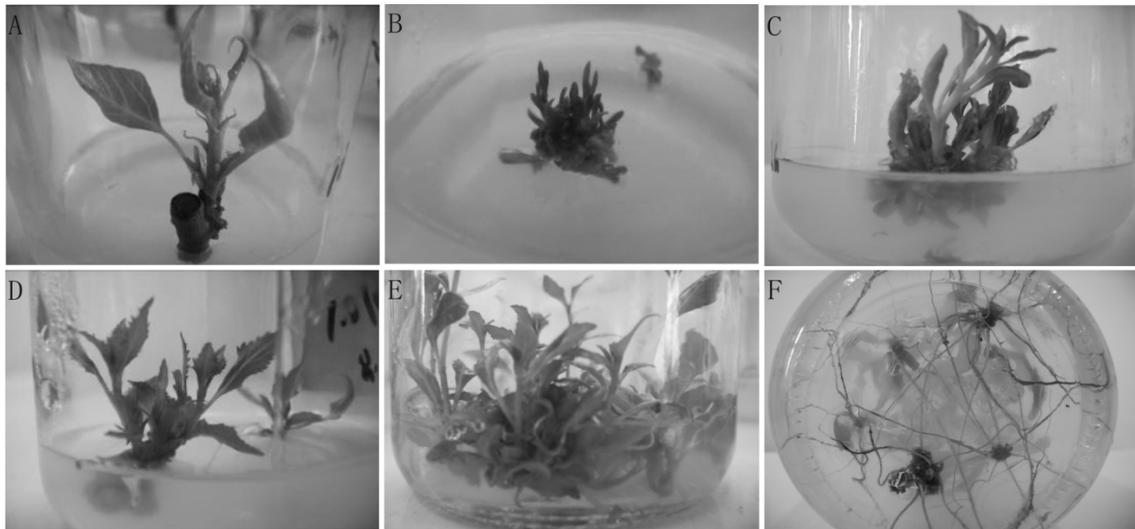


图1 鞍杂杨再生体系建立

A. 茎段上的休眠芽萌发并迅速伸长; B. 叶片上产生的丛芽, 出芽比例低, 生长缓慢; C. 茎段产生的丛芽, 出芽率高, 生长迅速; D. 茎段上腋芽萌发情况; E. 继代后的试管苗生长迅速; F. 试管苗生根。

参考文献

- [1] 赵好, 陈金林, 于彬, 等. 杨树速生丰产配方施肥试验 [J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(11): 26-28.
- [2] 兰宝存, 刘晓, 王成龙. 杨树扦插育苗造林技术 [J]. 林业勘查设计, 2009, 29(3): 86-87.
- [3] 刘明义, 王跃邦, 房淑琴. 吉林省西部荒漠化成因及防治对策 [J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 159-162.
- [4] 刘文萍, 韩玉琴, 南相日, 等. 山新杨组织培养快繁技术研究 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 101-103.
- [5] 张建华, 庄天明, 何林, 等. 欧美速生杨的离体繁殖体系 [J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2004, 22(4): 378-380.

- [6] 周俊国, 李桂荣. 欧美杂交杨 110 品种组培快繁试验简报 [J]. 山东林业科技, 2004, 34(3): 24-25.
- [7] 季东发, 杜长军, 刘泽龙, 等. 杨树芽浸提液在林木扦插上的应用 [J]. 林业科技, 2000, 25(1): 12-13.
- [8] 阎庆崇, 陈秀崇, 张宜清, 等. 杨树地膜覆盖育苗技术试验 [J]. 河北林业科技, 2008, 36(1): 10-11.
- [9] 王庆斌, 邹威, 李淑玲. 杨树秋季扦插育苗技术 [J]. 林业科技, 2003, 28(1): 1-3.
- [10] 蒙敏, 蒋衡, 何江成, 等. 俄罗斯杨组培快繁技术研究 [J]. 新疆农业科学, 2003, 40(2): 101-102.
- [11] 何晓兰, 王保松, 韩杰峰. 35 杨微繁殖与叶片不定芽再生研究 [J]. 江苏林业科技, 2009, 36(4): 1-5.