

高 CO₂ 浓度对温带三种针叶树光合光响应特性的影响*

王 森^{1,2} 郝占庆¹ 姬兰柱¹ 周广胜²

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ² 中国科学院植物研究所植被数量生态学开放实验室, 北京 100093)

【摘要】 将长白山地区阔叶红松林中主要针叶树种红松、红皮云杉和长白落叶松的幼苗, 盆栽于模拟自然光照和人工调节 CO₂ 浓度为 700 和 400 μmol·mol⁻¹ 的气室内两个生长季, 在各自的生长环境条件下, 利用 CI-301PS 便携式 CO₂ 分析系统测定针叶的光合光响应曲线。结果表明, 不同树种及同一树种的不同 CO₂ 浓度处理间差异明显。比较饱和净光合速率、暗呼吸、光补偿点、光饱和点、及光能利用率(QUE)的变化可见, 长白落叶松为阳性树种, 其光合作用对高 CO₂ 浓度的适应能力较好, 红松树种次之, 阴性树种红皮云杉光合作用对高 CO₂ 浓度适应能力最差。并初步探讨了供试树种光合生理特性及其演替状况间的联系

关键词 光合作用 高 CO₂ 浓度 光合特性

文章编号 1001-9332(2002)06-0646-05 **中图分类号** Q945.1 **文献标识码** A

Effect of elevated atmospheric CO₂ concentrations on photosynthesis light response characteristics of three coniferous tree species seedlings. WAN¹, Mi¹, HAO Zhanqing¹, Ji Lanzhu¹, ZHOU Guangsheng² (¹Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; ²Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, 13 (6): 646-650.

Potted seedlings of *Pinus koraiensis*, *Picea koraiensis*, and *Larix olgensis*, the dominant coniferous tree species in Changbai Mountain, were grown under elevated CO₂ concentration (700 μmol·mol⁻¹) and ambient CO₂ concentration (400 μmol·mol⁻¹) for two year, and their photosynthesis light response curves were determined with CI-301PS CO₂ gas analysis system under a series of light intensity from 0 to 2500 μmol·quanta·m⁻²·s⁻¹. The comparison of dark respiration rate (DRR), maximum net photosynthetic rate (A_{max}), quantum use efficiency (QUE), light compensation point (LCP), light saturation point (LSP) and photo inhibition point (PP) for the seedlings of these coniferous tree species under different CO₂ concentration showed that *Larix olgensis*, which had better adaptation of photosynthesis to elevated CO₂ concentration, was heliophilous species. The shade-tolerant species *Picea koraiensis* showed the least adaptation of photosynthesis to elevated CO₂ concentration. Furthermore, the relationship between photosynthetic physiological character of tree species and their succession status was also discussed in this paper.

Key words Photosynthesis, Elevated CO₂ concentration, Photosynthetic characteristics.

1 引 言

大气 CO₂ 浓度在工业革命前约为 26 μmol·mol⁻¹, 20 世纪 60 年代约为 314 μmol·mol⁻¹, 90 年代全球大气中 CO₂ 浓度达到 353 μmol·mol⁻¹, 并以平均每年 1.8 μmol·mol⁻¹ 的速率增加^[4]。近年研究表明, 大气中 CO₂ 增加的主要原因为矿物质燃料的消费及人类活动等, 按此趋势发展, 到 2030 年大气中 CO₂ 浓度将倍增。CO₂ 是植物光合作用的底物。它的升高对植物生长、繁殖和分布等的影响已引起普遍关注, 我国近年也开展了大气 CO₂ 浓度升高对植物生长的影响研究, 并取得了初步成果, 但多为对农作物方面的研究, 对自然环境条件下的植物特别是林木的研究较少, 本文以长白山阔叶红松林主要

针叶树种红松、红皮云杉、长白落叶松为研究对象, 对其光合光响应特性进行对比研究, 旨在了解长白山阔叶红松林主要针叶树在未来全球变化大气 CO₂ 浓度倍增时树木光合特性的差异, 及其对高 CO₂ 浓度的适应性, 为探讨阔叶红松林森林生态系统演替的内在机制提供科学依据。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

试验地设置在吉林省二道白河镇中国科学院长白山森

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-406-3)、国家自然科学基金重点项目(39730119)和国家重点基础研究发展规划项目(G1999043407)资助

** 通讯联系人

2000-03-28 收稿, 2000-09-11 接受。

林生态系统开放实验站(41°24'N, 128°28'E)内。该站位于长白山北坡, 长白山自然保护区内, 海拔 736m, 土壤为山地暗棕色森林土, 气候属受夏季风影响的温带大陆性气候, 春季干旱多风, 夏季炎热多雨, 冬季干燥寒冷, 年均温 -7.3~4.9℃, 年平均降雨量 600~900mm, 主要集中在 6~8 月, 全年日照时数为 2271~2503h, 无霜期 109~141d, 大气 CO₂ 浓度平均 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$

2.2 研究方法

2.2.1 试验设计

试验在 3 个完全相同的开顶式气室中进行, 气室为圆锥体形, 由木框架套以透明聚酯薄膜做成, 柱体直径和高均为 1.8m, 气室底部铺设硬管, 分别利用两个 5m³ 的气袋作为气源, 将钢瓶里的纯 CO₂ 气体充入, 两个开顶式气室连接气泵及气体流量测量阀, 使 CO₂ 气体经按气路的长短所需比例的不同密度小孔进入气室内, 幼树冠层处的 CO₂ 浓度达到 700 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 另一气袋充入空气, 用 CO₂ 气体配制成 CO₂ 浓度为 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的气源, 作为对照组气体。四周有通气窗, 保证在自然光照条件下, 各处理的温度、湿度及叶面辐射量均无明显差异, 气室通气时间为每日 6:00~20:00。红松、红皮云杉、长白落叶松幼树均为二年生, 采用盆栽方法, 每盆定植 3 株, 各树种 1998 年 4 月 15 日盆栽, 5 月 30 日移入气室, 每个气室放置 30 盆, 6 月 1 日开始通气试验, 9 月 25 日停止供气, 当年实验组和对照组树苗均用雪覆盖越冬, 1999 年 5 月 1 日移入气室中, 6 月 1 日通气, 在两个生长期中各项管理措施相同, 水肥不是限制因子。

2.2.2 测定方法

在幼树生长季内, 利用美国 CID 公司生产的 CI-301PS 便携式光合作用测定系统, 测定前对仪器进行严格的标定, 选用标准 CO₂ 钢瓶气体(高于大气 CO₂ 浓度和低于大气 CO₂ 浓度两个浓度)进行仪器的标定。对不同处理的幼树分别在两种测试 CO₂ 浓度(400 和 700 $\pm 10\%$ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)下测定不同树种幼树的净光合速率、暗呼吸速率、蒸腾速率和气孔阻力, 测定光合作用时选用的是 CI-301LA 光合作用测定系统的人工冷光源, 按一定光合有效辐射强度梯度在 0~2500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围之间调节, 暗呼吸则在完全黑暗条件下 10min 后测定, 在整个测定过程中温度均控制在 25 ± 1 ℃。每个树种进行 3 次平行样品的测定, 同一树种选取的幼树针叶均为发育正常叶龄一致的针叶。将针叶粘贴在透明胶带上, 利用美国 LI-COR 公司生产的 LI-3000 叶面积仪测定针叶面积, 所得数据用以转换有关光合指标。

2.2.3 数据统计

用 Microsoft Excel 软件统计分析。

3 结果与分析

3.1 不同 CO₂ 浓度对针叶光合光响应曲线的比较

由图 1 可见, 不同树种间和同一树种不同 CO₂ 浓度处理之间的差异均十分明显, 在对照 CO₂ 浓度及 0~500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低光合有效辐射测定条件下, 红松、长白落叶松净光合速率表现出高 CO₂ 浓度(700 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)处理的幼树高于对照 CO₂ 浓

度(400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)处理的幼树的趋势, 两种 CO₂ 浓度处理的红皮云杉幼树净光合速率在对照 CO₂ 浓度及 0~500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低光合有效辐射测定条件下表现出高 CO₂ 浓度处理的幼树低于对照 CO₂ 浓度处理的幼树的趋势, 随着测定光合有效辐射的增大, 高 CO₂ 浓度条件下生长的红松、红皮云杉幼树净光合速率的增长速率缓慢, 直至达到饱和及下降, 长白落叶松的光合速率随光合有效辐射的增加而明显增高, 在低光合有效辐射条件下明显表现出光合优势, 但当光合有效辐射达到 1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右时, 幼树的净光合速率达到饱和而开始迅速下降, 表现出低 CO₂ 浓度处理的幼树较早地出现光饱和点及光合作用的光抑制现象, 不同树种出现光合作用抑制现象的先后顺序为长白落叶松、红皮云杉和红松。在植物光合活性辐射 800~1100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围处, 红松和红皮云杉对照 CO₂ 浓度处理的幼树针叶净光合速率分别比高 CO₂ 浓度组的幼树高 108.25% 和 124.14%。供试的 3 种树种高 CO₂ 浓度处理的幼树在对照 CO₂ 浓度下均表现出光合光抑制现象, 而 3 种对照 CO₂ 浓度处理的幼树针叶光合速率随着光合有效辐射的增大未表现出光抑制现象。

在高 CO₂ 浓度测定条件下, 两种 CO₂ 浓度处理的红松、长白落叶松幼树针叶净光合速率均表现出随测定光合有效辐射的增强而增大, 未出现光合光抑制现象, 相反, 红皮云杉的光合作用表现出明显的光合光抑制现象, 高 CO₂ 浓度处理的红皮云杉幼树的光饱和和净光合速率明显高于对照 CO₂ 浓度下生长的幼树, 红松、长白落叶松两种 CO₂ 浓度处理的苗木针叶光饱和和净光合速率差异不明显, 3 种幼树的光补偿点均存在明显差异, 红松幼树明显表现出光合驯化现象^[13], 但红皮云杉和长白落叶松情况较为复杂, 将高 CO₂ 浓度处理的红皮云杉幼树在对照 CO₂ 浓度下测定时, 其光合速率明显低于对照 CO₂ 浓度下生长的幼树, 呈现高 CO₂ 浓度下生长的幼树的光合作用失去了光合优势, 出现光合驯化现象。

3.2 不同 CO₂ 浓度对针叶光合生理特性的影响

3.2.1 不同 CO₂ 浓度对针叶暗呼吸作用的影响

由表 1 可见, 在对照 CO₂ 浓度下, 3 种针叶树暗呼吸速率为 -2.39~-1.04 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 以针叶面积最小的长白落叶松最低, 针叶面积最大的红松最高, 3 个针叶树种平均为 1.62 $\pm 0.56\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 在高 CO₂ 浓度下, 3 种树木的暗呼吸速率在 -2.35~

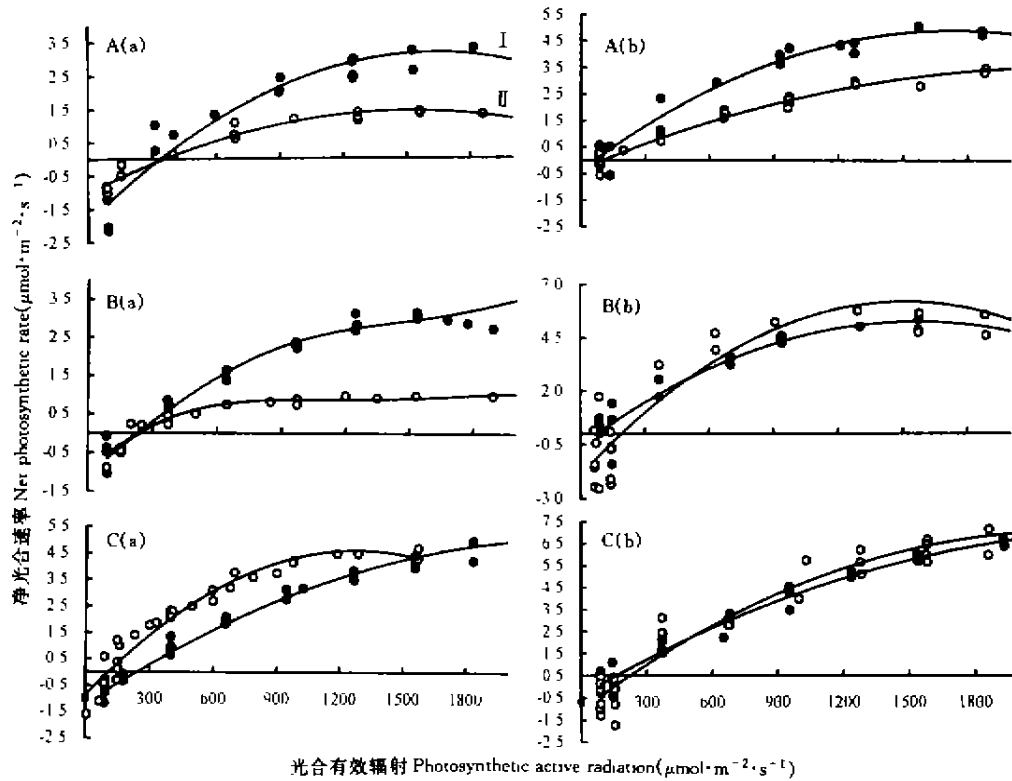


图1 不同CO₂浓度下生长的3种针叶树光合作用光响应曲线

Fig. 1 Photosynthesis-light response curves of leaves from three coniferous tree species seedlings under different CO₂ concentrations.

I. 400 μmol·mol⁻¹ CO₂ 浓度处理 400 μmol·mol⁻¹ CO₂ treatment, II. 700 μmol·mol⁻¹ CO₂ 浓度处理 700 μmol·mol⁻¹ CO₂ treatment; a) 400 μmol·mol⁻¹ CO₂ 浓度下测定 Observing at 400 μmol·mol⁻¹ CO₂, b) 700 μmol·mol⁻¹ CO₂ 浓度下测定 Observing at 700 μmol·mol⁻¹ CO₂; A) 红松 *Pinus koraiensis*, B) 红皮云杉 *Picea koraiensis*, C) 长白落叶松 *Larix olgensis*. 下同 The same below.

表1 不同CO₂浓度下3种针叶树的光合生理特征比较

Table 1 Comparison of photosynthetic characteristics of three coniferous tree species growing at different CO₂ concentrations

树种 Species	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration (μmol·mol ⁻¹)	最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate (A _{max})		暗呼吸速率 (Dark respiratory rate (DRR))		A _{max} /DRR		光补偿点 Light compensation point(LCP)		光饱和点 Light saturation point(LSP)	
		400*	700	400	700	400	700	400	700	400	700
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	400	4.24 ± 1.13	5.65 ± 0.74	2.39 ± 0.71	0.97 ± 0.23	1.77	5.82	248	85	1550	970
	700	1.66 ± 0.24	4.54 ± 0.29	0.58 ± 0.18	1.05 ± 0.14	2.86	4.32	261	95	957	1350
红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	400	2.89 ± 0.30	4.39 ± 0.30	1.43 ± 0.89	1.16 ± 0.61	2.02	3.78	177	83	1250	1300
	700	1.92 ± 0.41	5.63 ± 1.69	0.93 ± 0.76	2.35 ± 1.10	2.06	2.40	200	135	850	1300
长白落叶松 <i>Larix olgensis</i>	400	5.05 ± 0.38	7.56 ± 0.84	1.04 ± 0.61	0.55 ± 0.14	4.85	13.75	166	104	1930	1950
	700	5.70 ± 0.73	6.87 ± 1.88	0.39 ± 0.06	1.11 ± 0.78	14.61	6.19	125	120	1150	1500

* 测定时 CO₂ 浓度 Observing CO₂ concentration

-1.05 μmol·m⁻²·s⁻¹ 之间, 平均为 1.50 ± 0.60 μmol·m⁻²·s⁻¹, 比对照 CO₂ 浓度下的暗呼吸速率降低 8%, 与对照相比, 高 CO₂ 浓度下生长的长白落叶松暗呼吸速率差异不大, 红松的暗呼吸却下降了 127.62%, 红皮云杉暗呼吸上升了 64.34%.

3.2.2 不同 CO₂ 浓度对针叶光补偿点、光饱和点及光抑制点的影响 由表 1 可见, 3 个针叶树种的 光补偿点、光饱和点存在高 CO₂ 浓度处理的幼树小于对照 CO₂ 浓度处理的幼树的趋势, 树种光补偿点的种间差异在两个 CO₂ 浓度不同处理中分别为红松 > 红皮云杉 > 长白落叶松 (400 μmol·mol⁻¹) 和红皮

云杉 > 长白落叶松 > 红松 (700 μmol·mol⁻¹). 而光饱和点的种间在两个 CO₂ 浓度不同处理中分别为长白落叶松 > 红松 > 红皮云杉 (400 μmol·mol⁻¹) 和长白落叶松 > 红松 > 红皮云杉 (700 μmol·mol⁻¹), 幼树的光抑制点在 3 个树种的种间差异则表现为红皮云杉 > 长白落叶松 > 红松 (400 μmol·mol⁻¹) 和长白落叶松 > 红松 > 红皮云杉 (700 μmol·mol⁻¹). 由此可见, 对于 CO₂ 浓度的改变, 不同树种有不同程度的响应, 比较不同树种光补偿点和光饱和点变化比率, 表现出长白落叶松对 CO₂ 浓度变化响应敏感, 其次为红松和红皮云杉. 高 CO₂ 浓度长期处理

能明显降低树木的光补偿点和光饱和点。

3.2.3 不同 CO₂ 浓度对针叶最大净光合速率的影响 最大净光合速率(A_{\max}) 在红松、红皮云杉和长白落叶松树种中存在高 CO₂ 浓度大于对照 CO₂ 浓度的趋势, 利用 CI-301LA 冷光源为光合有效辐射光源的测定结果表明, 针叶气孔开闭在不受叶表温度影响时, 即净光合速率不受水分亏缺影响的情况下, 生长环境 CO₂ 浓度增高能提高 3 种针叶树的净光合能力。以各树种在高 CO₂ 浓度环境生长下的 A_{\max} 为 100%, 分别计算各自对照 CO₂ 浓度下的 A_{\max} 所占的百分比(图 2), 红松树种对 CO₂ 浓度的升高未表现出明显的光合潜力, 红皮云杉的 A_{\max} 出现显著的差异, 长白落叶松次之, 表明红皮云杉树种对大气 CO₂ 浓度变化最为敏感, 高 CO₂ 浓度明显促进其同化能力。

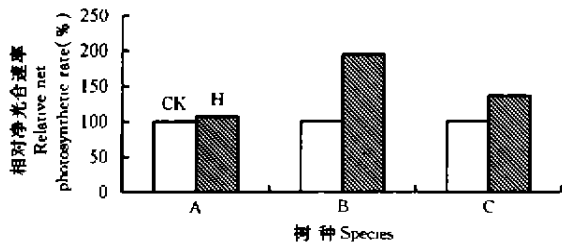


图 2 3 个针叶树种光饱和净光合速率的比较
Fig. 2 Comparison of light saturated of net photosynthesis of three coniferous tree species.

最大净光合速率与暗呼吸速率的比值在各树种间同样表现出高 CO₂ 浓度下生长的幼树高于对照 CO₂ 浓度下的幼树的趋势(表 1)。不同 CO₂ 浓度和树种间的差异表现为长白落叶松 > 红皮云杉 > 红松 (400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 树种和长白落叶松 > 红松 > 红皮云杉 (700 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。由此可见, 长白落叶松对高 CO₂ 浓度的适应性比其他两树种强。高 CO₂ 浓度更有利于其同化物的积累。

3.3 不同 CO₂ 浓度对树木光合作用光量子产量的影响

植物光量子产量是光合的光利用效率(Quantum use efficiency, QUE), 能反映植物对光能的利用情况。光响应曲线的初始斜率可视为表观最大量子产量, 表明光合作用严格受光限制时的光能利用率。计算 0~200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内(图 1) 各光合光响应曲线的起始斜率, 可粗略地得到各树种在不同 CO₂ 浓度生长条件下的 QUE(表 2)。显然, 红皮云杉和红松的 QUE 为高 CO₂ 浓度 > 对照 CO₂ 浓度, 而长白落叶松对照与高 CO₂ 浓度组差异不明

显。QUE 的种间差异在对照 CO₂ 浓度下为长白落叶松 > 红皮云杉 > 红松, 在高 CO₂ 浓度下为红皮云杉 > 长白落叶松 > 红松, 由此可见, 生长环境 CO₂ 浓度的升高能增强植物的光能利用率, 但不同树种之间存在种间差异。

表 2 光合光响应曲线的起始斜率及相应的回归方程
Table 2 Initial slopes of photosynthesis-light response curves and relevant regression equation

树种 Species	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	回归方程 Regression equation		起始斜率 Initial slope	
		400*	700	400	700
A	400	$Y = 0.0013X - 5.612$	$Y = 0.0020X - 0.897$	0.0013	0.0020
	700	$Y = 0.0021X - 0.897$	$Y = 0.0026X - 0.408$	0.0021	0.0026
B	400	$Y = 0.0047X - 1.553$	$Y = 0.0036X - 1.506$	0.0047	0.0036
	700	$Y = 0.0115X - 0.071$	$Y = 0.0204X - 4.524$	0.0115	0.0204
C	400	$Y = 0.0048X - 1.383$	$Y = 0.0096X - 0.661$	0.0048	0.0096
	700	$Y = 0.0046X - 0.213$	$Y = 0.0045X - 0.823$	0.0046	0.0045

* 测定时的 CO₂ 浓度 Measured in CO₂ concentration. A) 红松 *Pinus koraiensis*, B) 红皮云杉 *Picea koraiensis*, C) 长白落叶松 *Larix olgensis*.

4 讨 论

植物的生理适应性与其生态分布、演替状态的关系是植物生态学的中心议题^[2,9], 地处温带的长白山自然保护区是我国最早建立的国家级自然保护区之一。有关这里的森林生态系统结构、功能与群落组成及演替已有长期系统的研究, 但对典型阔叶红松林主要针叶树种对未来大气 CO₂ 的升高的光合生理特性、光合光适应潜力及可能各自演替趋势的联系尚不清楚。本文对长白山阔叶红松林的主要 3 种针叶树的研究表明, 各树种在高 CO₂ 浓度下长期生长时其针叶的最大光合作速率均有所增加, 但存在树种间的差异, 红松、红皮云杉和长白落叶松的最大净光合速率分别升高 7%、93.7% 和 36%, 平均升高 45.6%。这一结果与 Eamus 等^[3] 发现 *Maranthus corymbosa* 幼树在高 CO₂ 浓度下光饱和净光合速率增加幅度相一致。其主要原因是光呼吸的降低。同时也说明, 供试的 3 个树种在生长旺季期间针叶净光合速率没有失去光合优势, 但将高 CO₂ 浓度处理的幼树与对照 CO₂ 浓度处理的幼树置于同样 CO₂ 浓度下测定, 则发现在高 CO₂ 浓度下长期生长的红松和长白落叶松幼树的净光合速率低于对照 CO₂ 浓度处理的幼树在高 CO₂ 浓度下测得的值。两种幼树均具有光合下调现象, 既光合驯化现象^[2,5,15]。红皮云杉的结果正好相反, 没有表现出光合驯化现象。这一结果与 Bunce^[1]、Gnuderson^[5] 和韦彩妙^[14] 的研究结果相一致。另外, 红皮云杉高 CO₂ 处理的幼树在对照 CO₂ 浓度条件下测定光合速率低于对照 CO₂

浓度处理的幼树,是由于植物叶片失去光合优势潜力的结果^[4,7,8,10,11]。也反映出植物对高 CO₂ 浓度响应的多样性可能与树种及实验条件和环境因子有关。这些研究结果有助于揭示不同树种对高 CO₂ 浓度的响应特性。

高 CO₂ 浓度下生长的幼苗暗呼吸存在明显的种间差异。随着 CO₂ 浓度的升高,红松幼苗的暗呼吸受到抑制而下降 56.07%,红皮云杉则升高 64.33%。这可能与该树种的水分生理特点有关。红皮云杉树种为阴性树种,为保持体内的水分,宁可增加呼吸强度失去已固定的碳水化合物,在此过程中有 O₂ 呼吸产生水分。从表 1 可见,与红松和长白落叶松相比,高 CO₂ 浓度的红皮云杉针叶饱和净光合速率异常高于对照 CO₂ 浓度下的幼苗,同化合成的非结构性碳水化合物的形式存在于叶肉中,增加了呼吸的底物,造成呼吸作用的提高。同时,由于树木生长的加快,为维护树木的正常生理活动所需物质和能量,表现出暗呼吸作用增强^[6,15]。作为先锋树种的长白落叶松由自身生理特性决定随生长环境 CO₂ 浓度的升高,长白落叶松的幼苗光合同化潜力的增强,而为维持正常代谢活动所需暗呼吸作用略有上升,得到在高 CO₂ 浓度下长白落叶松的 A_{max}/DRR 显著提高^[12],进而大大提高树种的生物量。这一结果与长白落叶松野外实际生态特征相一致。

本项研究表明,树木的光合特性受到长期高 CO₂ 浓度的影响。所研究的供试树种的光饱和点表现出高 CO₂ 浓度 > 对照 CO₂ 浓度,光补偿点对照 CO₂ 浓度 < 高 CO₂ 浓度的趋势,高 CO₂ 浓度处理还能使这些树种的光能利用率提高。各种树种对高 CO₂ 浓度下生长的光合适应潜力的差异较大。红皮云杉对高光强的光合适应能力极为有限,而长白落叶松和红松正相反,具有很好的光合适应性。作为红松阔叶林主要针叶树种长白落叶松(阳性树种)在今后高 CO₂ 浓度环境条件下,其喜光性和高光合速率使之在生态系统演替过程初期极易生存和发展;其次为红松树种,阴性树种红皮云杉在强光条件下光能利用率低,其光合同化能力明显受到抑制,适应在具有一定郁闭度环境条件生存。但与对照 CO₂ 浓度条件下相比,红皮云杉对高 CO₂ 浓度环境的响应最为敏感,而长白落叶松(阳性树种)反映最小。这在温带森林生态系统中,势必影响未来树种间的竞争而

影响群落的组成和物种的多样性。

参考文献

- Bunce JA. 1992. Stomatal conductance, photosynthesis and respiration of temperate deciduous tree seedlings grown outdoor at elevated concentration of carbon dioxide. *Plant Cell Environ.* 15: 541-549
- Chazdon RL. 1992. Photosynthetic plasticity of two rain forest shrubs cross natural gas transects. *Oecology*, 92: 586-595
- Eamus D, Berryman CA, Duff GA. 1993. Assimilation, stomatal conductance, specific leaf area and chlorophyll responses to elevated CO₂ of *Marantthes corymbosa*, a tropical monsoon rain forest species. *Aust J Plant Physiol.* 20: 741-755
- Gentson C, Barnola JM, Raynaud D, et al. 1987. Vostok ice core: Climatic response to CO₂ and orbital forcing changes over the last climatic cycle. *Nature*, 329: 414-418
- Gruderson CA, Norby RJ, Wullschlegel SD. 1993. Foliar gas exchange responses of two deciduous hardwoods during 3 years of growth in elevated CO₂ no loss of photosynthetic enhancement. *Plant Cell Environ.* 16: 797-807
- Jiang G-M(蒋高明), Lin G-H(林光辉), Bruno DVM. 1999. The response on dark respiration of some tropical rain forest and coastal desert plant species to the elevation of CO₂ concentration. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 19(4): 519-523(in Chinese)
- Jurik TW, Weber JQ, Gates DM, et al. 1984. Short-term effects of CO₂ on gas exchange of leaves of Bigtooth aspen (*Picea grandidentata*) in the field. *Plant Physiol.* 75: 1022-1026
- Kimball BA. 1983. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 330 prior observations. *Agron J.* 75: 779-788
- Liang C(梁春), Lin Z-F(林植芳), Kong G-H(孔国辉). 1997. Photosynthesis-light responses characteristics of subtropical tree species seedlings under different irradiances. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 8(2): 7-11(in Chinese)
- Lin F-P(林丰平), Chen Z-H(陈章和), Chen Z-P(陈兆平), et al. 1999. Physiological and biochemical responses of the seedlings of four legume tree species to high CO₂ concentration. *Acta Phytocool Sin(植物生态学报)*, 23(3): 220-227(in Chinese)
- Long SP, Baker NR, Rames CA. 1993. Analysing the responses of photosynthetic CO₂ assimilation to long-term elevated of atmospheric CO₂ concentration. *Vegetatio*, 104/105: 33-45
- Poorter H, Gifford RM, Kniedemann PE, et al. 1992. A quantitative analysis of dark respiration and carbon content as factors in the growth response of plants to elevated CO₂. *Austr J Bot.* 40: 501-513
- Wang D-L(王德利), Wang Z-W(王正文), Zhang X-J(张喜军). 1999. The comparison of photosynthetic physiological characteristics between the two divergent *Aneurolepidium chinense* types. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 19(6): 837-843(in Chinese)
- Wei C-M(韦彩妙), Lin Z-F(林植芳), Kong G-H(孔国辉). 1996. Effect of elevated CO₂ on seedlings photosynthesis of two tropical tree species. *Acta Bot Sin(植物学报)*, 38(2): 123-130(in Chinese)
- Xu D-Q(许大全). 1994. Responses of photosynthesis and related processes to long-term high CO₂ concentration. *Plant Physiol Commun(植物生理学通讯)*, 30(2): 81-87(in Chinese)

作者简介 王淼, 1964年生, 副研究员, 主要从事树木生理生态学研究, 发表论文 25 篇。E-mail: wangmiaoc@iae.ac.cn