

CO₂ 浓度升高对龙血树和春羽生长 及光合生理的影响

欧英娟^{1,2}, 彭晓春^{1,2}, 董家华^{2*}, 陈志良², 赵述华², 雷国建², 周鼎^{1,2}

(1 湖南农业大学 资源与环境学院, 长沙 410128; 2 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 采用开顶式气室(OTC)控制模拟环境, 研究了二氧化碳(CO₂)浓度升高对龙血树和春羽叶片光合生理及叶绿素荧光参数的影响。结果表明: (1) 随着 CO₂ 浓度增加, 龙血树和春羽幼苗叶面积和株高均呈显著增加趋势。(2) 龙血树和春羽幼苗叶片净光合速率随着 CO₂ 浓度的升高均呈先增加后降低的趋势, 而同期蒸腾速率和气孔导度显著降低。(3) 随着 CO₂ 浓度的增加, 龙血树和春羽幼苗叶片最大光量子产量、实际光能转化效率均呈先升后降的趋势, 而同期非光化学猝灭系数呈先降低后升高的趋势; 光化学猝灭系数总体上也呈先升高后降低的趋势, 但差异不显著。研究表明, 一定时间的高浓度 CO₂ 处理提高了龙血树和春羽的净光合速率, 促进了植物的生长, 但随着处理时间的延长, 这种促进作用逐渐降低进而消失, 并以春羽幼苗表现得更突出; 即高浓度 CO₂ 可能破坏了龙血树及春羽生长后期光系统 II 反应中心结构, 导致叶片光合能力降低。

关键词: 龙血树; 春羽; CO₂ 浓度升高; 开顶式气室; 光合作用; 叶绿素荧光参数

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Elevated CO₂ Concentration on the Growth and Photosynthetic Physiology of *Dracaena angustifolia* and *Philodendron selloum*

OU Yingjuan^{1,2}, PENG Xiaochun^{1,2}, DONG Jiahua^{2*}, CHEN Zhiliang²,
ZHAO Shuhua², LEI Guojian², ZHOU Ding^{1,2}

(1 Institute of Agro-Environmental Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2 South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environment Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: To study the effects of elevated CO₂ concentration (CO₂) on the leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters in *Dracaena angustifolia* and *Philodendron selloum*, we exposed the seedlings of *D. angustifolia* and *P. selloum* to either ambient CO₂ [CK, (390 ± 30) μmol · mol⁻¹] or elevated CO₂ [T₁, (780 ± 30) μmol · mol⁻¹; T₂, (1 560 ± 30) μmol · mol⁻¹] in an open top chamber. The results showed that: (1) Leaf area and plant height of seedlings significantly raised with the increase of CO₂ concentration. (2) Under the high CO₂ concentration, the net photosynthetic rate (P_n) was higher earlier and lower later, but their stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r) significantly reduced. (3) The ratio of variable fluorescence to maximal fluorescence (F_v/F_m) and the actual photochemical efficiency (Φ_{PSII}) tend to increased and then decreased with the CO₂ concentration raised. Photochemical quenching coefficient (q_p) also had the same trend, but the difference was not significant. On the contrary, non photochemical quenching coefficient (NPQ) tends to decrease earlier and increased later. The increasing CO₂ concentration in a certain extent might be beneficial for increasing net photosynthetic rate and the vegetative growth, but the

收稿日期: 2013-07-09; 修改稿收到日期: 2013-09-04

基金项目: 《长株潭城市群生态环境十年变化调查与评估》(STSN-12-04); 环保公益性行业科研专项(201309037)

作者简介: 欧英娟(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究城市与区域环境的规划与管理。E-mail: oyj0805@126.com

* 通信作者: 董家华, 副研究员, 主要从事城市过程与生态危险的研究。E-mail: djiahua@scies.com.cn

promotion decreased slowly and then disappear if CO₂ enrichment prolonged. The performance of *P. selloum* seedling was more outstanding. It suggested that the higher CO₂ concentration could injure the structure of leaf photosystem II and consequently decreased the leaf photosynthetic capacity in the late growth phase of *D. angustifolia* and *P. selloum*.

Key words: *Dracaena angustifolia*; *Philodendron selloum*; higher CO₂ concentration; open top chamber; photosynthesis; chlorophyll II fluorescence parameter

工业时代以来,随着人类生产活动增强,尤其是化石燃料的快速增加和土地利用的急剧变化,大气中的 CO₂ 含量正逐步上升,从工业革命前的 280 μmol · mol⁻¹ 增加到现在的 390 μmol · mol⁻¹,有关专家预测到本世纪末将会上升到 1 260 μmol · mol⁻¹[1-2]。CO₂ 作为温室气体的主要成分,也是光合作用的底物,因此 CO₂ 浓度升高会影响植物光合作用和物质生产,以及与之相关的生理生化代谢过程。

由于生物学过程对 CO₂ 浓度升高和气候变暖具有一定的适应性^[3],无论是光合作用还是蒸腾作用,都会受到 CO₂ 浓度升高的影响^[4-7]。周玉梅等发现红松幼树在 CO₂ 浓度为 500 μmol · L⁻¹ 的条件下培养 6 个生长季后,其最大净光合速率比对照增加了 94%,说明高浓度 CO₂ 气体显著增强了红松针叶树对光的利用效率^[8];毕玉伟等^[9]认为经高浓度 CO₂ 气体处理后,盆栽香樟的光合速率有显著提高,生物量明显增加。前人研究表明,植物在高浓度 CO₂ 环境下生长较长一段时间后会导导致最初的促进作用不断弱化进而消失^[10-11]。这种因为长期生活在高浓度 CO₂ 环境中而导致植物光合能力不断减弱的现象称为光合适应。有关光合适应的机理目前尚不清楚,有研究表明可能是因为高浓度的 CO₂ 环境会降低植物细胞光合作用对于无机碳的亲合力,进而导致其利用 HCO₃⁻ 的能力受到影响^[12]。

植物在高 CO₂ 浓度下的光合响应特性研究已成为了国内外一个较为重要和热点的研究课题。而城市的快速发展,导致 CO₂ 等温室气体浓度居高不下,酸雨和光化学事件频繁,污染问题愈加突出。绿化观赏植物在改善和缓解城市大气污染方面发挥着重要的积极作用,但也经常是环境污染最直接的接触者,研究污染物对绿化植物的影响和绿化植物对污染物的反映,可为污染治理和选择抗逆性强的绿化植物提供直接依据。

龙血树(*Dracaena angustifolia*)为优良的观叶植物,株型极为健美,叶片色彩斑斓,鲜艳美丽,园林用途很高,同时也可用于抗细菌等医学作用。春羽

(*Philodendron selloum*)为多年生常绿草本植物,叶片巨大,浓绿色,且富有光泽,叶柄粗壮,株型优美,是极好的绿化观赏植物。目前这两种植物在中国的栽培量很大,但大气 CO₂ 浓度升高对龙血树和春羽生长及光合生理的影响尚未见报道。本研究利用广州珠三角城市生态野外观测站南沙分站的开顶式气室(open top chamber,简称 OTC)平台,探讨了 CO₂ 浓度升高对龙血树及春羽两种绿化观赏植物光合作用和叶绿素荧光参数的影响,旨在了解这两种绿化植物对高浓度 CO₂ 的生理适应机制,为进一步明确植物对 CO₂ 浓度升高的响应机理提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

龙血树为常绿小灌木,性喜高温多湿,喜光,主要分布在中国南部及亚洲热带地区;春羽是常绿草本观叶植物,喜温暖、湿润半阴环境,主要适应于华南南亚热带常绿阔叶林区。实验用的盆栽龙血树与春羽植株(苗期,株高 15~16 cm)购自广州农业科技开发研究基地。所用 CO₂ 购自广州世源气体公司,纯度 99.5%。

1.2 试验方法

试验于 2012 年在珠三角生态野外观测站南沙分站(22.13°N,113.34°E)进行,该区域属于南亚热带季风区海洋性气候,具有气候适宜、雨量充沛、光照充足、全年无霜等气候资源丰富的特点。年平均气温 30.12℃,平均年降雨量 1 647.5 mm。实验装置开顶式气室为高 1.5 m、边长 1 m 的正六面体结构,由铝合金和玻璃构建而成,主要包括通风、过滤及布气系统。供试 CO₂ 用钢瓶装,CO₂ 经流量计定量控制后由风机送入气室,室内 CO₂ 浓度由 CO₂ 分析仪(QD6330,河南中安科技)定期监测调控。气室内温度通过顶部气体流通和换气扇气体交换控制在外界温度±2℃内。OTCs 系统内 CO₂ 通气时间为 11 月 13 日~12 月 24 日,每日通气时间为 8:30~16:30,夜间不通气。

本研究选取长势基本一致的盆栽(盆高 20 cm,

直径 26 cm)龙血树及春羽植株 45 株(每盆 1 株),于试验前 1 周移入 OTCs 中,以适应 OTCs 中的光照、温度等环境。试验设 3 个处理:对照(CK,环境背景大气),CO₂ 浓度平均为(390±30) μmol·mol⁻¹;中浓度(T₁,倍增 2 倍),CO₂ 浓度平均为(780±30) μmol·mol⁻¹;高浓度(T₂,倍增 4 倍),CO₂ 浓度平均为(1 560±30) μmol·mol⁻¹,每个处理设 3 次重复,每重复 5 盆。试验过程中,每 15 d 施 1 次复合肥,每隔 1 d 浇灌 1 次清水,对植物的管理与原来的生长地基本相同,水肥不成为限制因子。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标 在开顶箱开始通气后的第 2 周到第 7 周,每隔 1 周在每个 OTC 中植物上取上数第 2~3 位(顶部最新展开的为第 1 位)、生长健康的功能叶片利用叶面积仪(YMJ-B,浙江托普)于植株上测定叶面积,同时测定株高(冠层高度)。

1.3.2 光合速率 在开顶箱开始通气后的第 14 天,每隔 1 周使用便携式光合作用测量系统(GFS-3000, Waltz, Germany)进行光合气体交换参数测定,测定时间为 9:00~11:30,每株选取从上到下第 3 片完全展开的成熟叶片 2~3 片,测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s),每个处理测定 5 个重复,测定时使用外置红蓝光源,光合有效辐射为 1 000 mol·m⁻²·s⁻¹,CO₂ 浓度为 400 μmol·mol⁻¹,叶室温度设置为 25 °C。

1.3.3 叶绿素荧光参数 在开顶箱开始通气后的第 14 天,每隔 1 周选取每棵植株的倒数第 1 片完全展开叶片,用暗适应夹夹住叶片 30 min 后,使用基础型调制叶绿素荧光仪(Junior-Pam, Waltz, Germany)测定叶绿素最大量子产量(F_v/F_m)、实际光

化学效率(Φ_{PSII})、非光化学猝灭系数(NPQ)、光化学猝灭系数(q_p)等叶绿素荧光参数。

1.4 数据处理

采用 Origin 8 软件进行数据处理和图表绘制,采用 SPSS 17 统计软件进行处理间的差异显著性分析, $P<0.05$ 为显著差异。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度升高对龙血树、春羽生长的影响

2.1.1 叶面积 从图 1 可以看出两种植物的叶面积在 CO₂ 浓度升高条件下均有不同程度提高,但各植物和处理的升幅表现不同。其中,龙血树在处理 14 d 时,各处理间叶面积均无显著差异;处理 21 d 和 28 d 后,T₂ 处理叶面积开始显著增加,而 T₁ 无明显变化;处理 35 d 后,T₁ 和 T₂ 的叶面积都显著增加,它们分别比同期对照增加了 8.8% 和 12.4%,而 T₁ 与 T₂ 之间差异不显著。春羽幼苗叶面积在处理 14 d 后均显著增加,T₁、T₂ 的叶面积分别比对照增加 19.1%、45.1%,且各处理间差异显著;幼苗处理 21 d 的表现与处理 14 d 相似;处理 28 d 和 35 d 后 T₁ 和 T₂ 处理间叶面积差异不显著,但都比同期对照显著增加,在处理 28 d 时增加幅度分别为 20.2% 和 25.7%,处理 35 d 时比对照分别增加 27.2% 与 28%。可见,在实验条件下环境 CO₂ 浓度升高有利于两种植物幼苗叶面积增加,且处理时间越长效应越显著,并以春羽幼苗表现得更突出。

2.1.2 株高 从图 2 可以看出 CO₂ 浓度升高有利于两种植物幼苗株高的增长。其中,龙血树熏气处理 14 d 时,T₁、T₂ 的株高开始显著增加,它们均比同期对照增加了 15.6%,而 T₁ 与 T₂ 之间差异不显著;

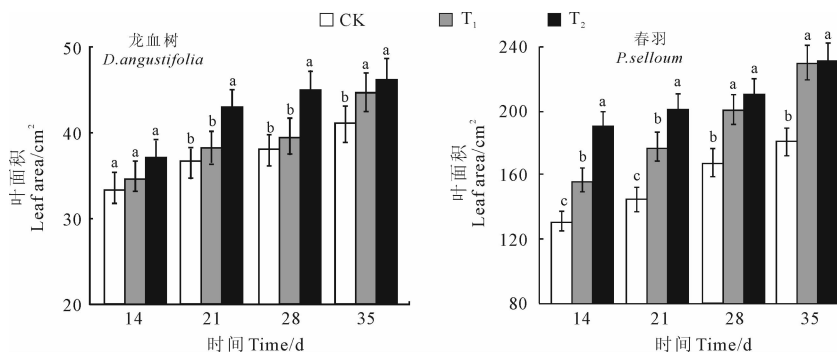


图 1 不同 CO₂ 浓度条件下龙血树和春羽的叶面积的变化

不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著差异;下同

Fig. 1 Changes of plant leaf area for *D. angustifolia* and *P. selloum* with different CO₂ concentrations

Different normal letters indicated significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below

处理 21 d 和 28 d 后,各处理间株高均显著增加,且差异显著;处理 35 d 后, T_1 和 T_2 的株高都显著增加,它们均比同期对照增加了 14.3%,而 T_1 与 T_2 间差异不显著。春羽幼苗株高在处理 14 d 后均显著增加, T_1 、 T_2 的株高分别比对照增加 29.0%、32.3%,且各处理间差异显著;处理 21 d 时, T_1 与 T_2 处理间差异不显著,但都比同期对照显著增加;处理 28 d 后,植物株高均有增加, T_1 、 T_2 的株高分别比对照增加 13.2%和 18.4%,且各处理间差异显著;处理 35 d 时, T_1 、 T_2 的株高均显著增加,它们分别比同期对照增加 12.2%与 14.6%,而 T_1 、 T_2 之间差异不显著。可见,在实验条件的环境 CO_2 浓度升高有利于植物幼苗的生长,且处理时间越长升幅越明显,春羽对 CO_2 浓度的改变更加敏感。

2.2 CO_2 浓度升高对龙血树和春羽幼苗光合气体交换参数的影响

2.2.1 净光合速率

由图 3 可以看出,在 CO_2 浓度升高条件下,两种植物的净光合速率在处理后的前期均有不同程度的提高,但后期有所降低且明显低于同期对照。其中,龙血树在处理 14 d 时, T_1 、 T_2 的净光合速率均显著增加,它们分别比同期对照增加了 60.9%和 65.3%,且各处理间差异显著;处理

21 d 后, T_1 、 T_2 的净光合速率都显著增加,但 T_1 的增长幅度大于 T_2 ;处理 28 d 时, T_1 、 T_2 的净光合速率分别比同期对照增加 51.2%和 55.9%,且各处理间差异显著;但处理 35 d 后, T_1 、 T_2 的净光合速率显著降低,分别比同期对照降低了 8.1%和 12.7%,而 T_1 与 T_2 之间差异不显著。春羽幼苗净光合速率在处理 14 d 后均显著增加, T_1 、 T_2 的净光合速率分别比对照增加 63.2%和 71.8%,且各处理间差异显著;幼苗处理 21 d 和 28 d 后, T_1 、 T_2 处理间净光合速率差异不显著,但均比同期对照显著增加;处理 35 d 时 T_1 、 T_2 的净光合速率开始显著降低,它们分别比同期对照降低 1.8%和 5.8%,而 T_1 与 T_2 之间差异不显著。可见,在试验处理 28 d 内,环境 CO_2 浓度的升高有利于两种植物幼苗的光合作用,但随着处理时间延长到 35 d 时,其光合作用开始低于对照,以龙血树幼苗表现得更为突出。

2.2.2 蒸腾速率

由图 4 可以看出两种植物的蒸腾速率在 CO_2 浓度升高条件下均有不同程度的降低,但各植物和处理的降幅表现不同。其中,龙血树幼苗在处理 14 d 后就显著降低, T_1 、 T_2 的蒸腾速率分别比对照降低了 6.3%和 13.5%,且各处理间差异显著;幼苗处理 21 d 和 28 d 后的表现与处理 14 d

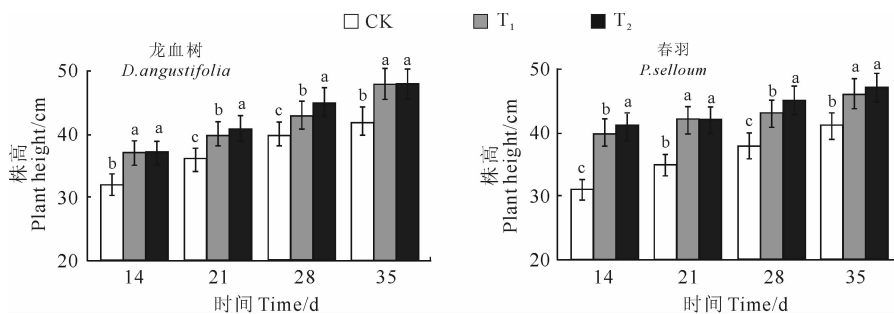


图 2 不同 CO_2 浓度条件下龙血树和春羽株高的变化

Fig. 2 Changes of plant height for *D. angustifolia* and *P. selloum* with different CO_2 concentrations

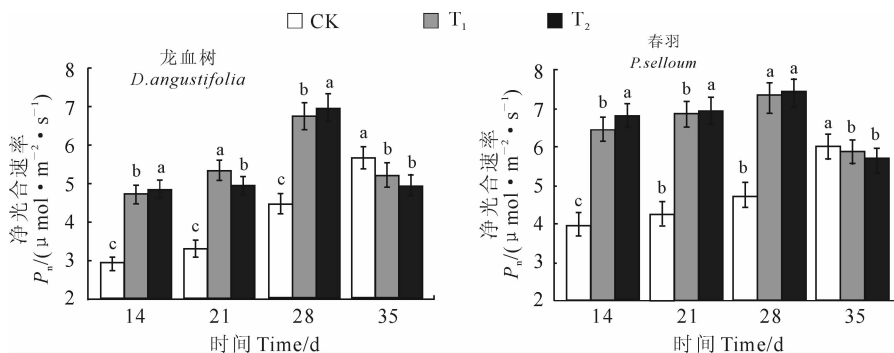


图 3 不同 CO_2 浓度条件下龙血树和春羽净光合速率的变化

Fig. 3 Changes of P_n for *D. angustifolia* and *P. selloum* with different CO_2 concentrations

相似;处理 35 d 后, T₁ 和 T₂ 处理间蒸腾速率差异不显著,但都比同期对照显著降低,降低幅度为 25.5% 与 29.6%。春羽幼苗蒸腾速率在处理 14 d 后就显著降低, T₁、T₂ 的蒸腾速率分别比对照降低 7.0% 和 9.6%,且各处理间差异显著;幼苗处理 21 d、28 d 和 35 d 的表现均与处理 14 d 相似,都比同期对照显著降低,处理 35 d 时比对照分别降低 35.9% 与 46.1%。可见,在实验条件下环境 CO₂ 浓度升高会导致两种植物幼苗的蒸腾速率降低,且处理时间越长效应越显著,并以春羽幼苗表现得更突出。

2.2.3 气孔导度 由图 5 可以看出 CO₂ 浓度升高使得两种植物的气孔导度都有不同程度的降低,但各植物随处理的不同其降幅表现不一样。其中,龙血树幼苗在处理 14 d 后气孔导度均显著降低, T₁、T₂ 的气孔导度分别比对照降低 13.6% 和 23.5%,且各处理间差异显著;幼苗在试验处理期间的表现与处理 14 d 相似,均比同期对照显著降低,处理 35 d 时降低幅度为 18.3% 与 25.1%。春羽幼苗在处理 14 d 时,其气孔导度就显著降低, T₁、T₂ 的气孔导度分别比对照降低 10.2% 和 12.2%;处理 21 d 后 T₁ 和 T₂ 处理间气孔导度差异不显著,但比同期对照显著降低,降低幅度分别为 12.2% 和 13.1%;处理 28 d 和 35 d 后各处理间差异显著,在处理 28 d

时降低幅度为 12.3% 和 18.7%,处理 35 d 时比对照分别降低 12.8% 和 18.0%。可见,两种植物幼苗的气孔导度在环境 CO₂ 浓度升高的实验条件下降低,且随着处理时间的延长效应越显著,且以龙血树幼苗表现得更突出。

2.3 CO₂ 浓度升高对龙血树和春羽苗期叶绿素荧光参数的影响

利用最小显著性差异(LSD)法完成龙血树与春羽在 3 种不同 CO₂ 浓度下叶绿素荧光参数的差异性显著性检验,结果列于表 1。

由表 1 可知随着 CO₂ 浓度的升高,龙血树幼苗叶片最大量子产量(F_v/F_m)呈现出先增加后降低的趋势,而春羽幼苗叶片 F_v/F_m 值均呈降低趋势。其中,龙血树处理后的前 28 d, F_v/F_m 值比同期对照高,但无显著差异;处理 35 d 后, T₂ 处理 F_v/F_m 值比同期对照显著降低 14.3%, T₁ 也比同期对照降低 11.3%,但差异不显著。春羽幼苗在处理后的前 28 d, T₁、T₂ 的 F_v/F_m 值均比同期对照低,但无显著性差异;处理 35 d 后, T₂ 的 F_v/F_m 值比同期对照显著降低,降幅为 15.2%,而 T₁ 无明显变化。这说明环境 CO₂ 浓度升高对两种植物叶片 PS II 原初光能转化有抑制作用,特别是高浓度的 CO₂ 可能是在试验后期植物出现光适应的现象。

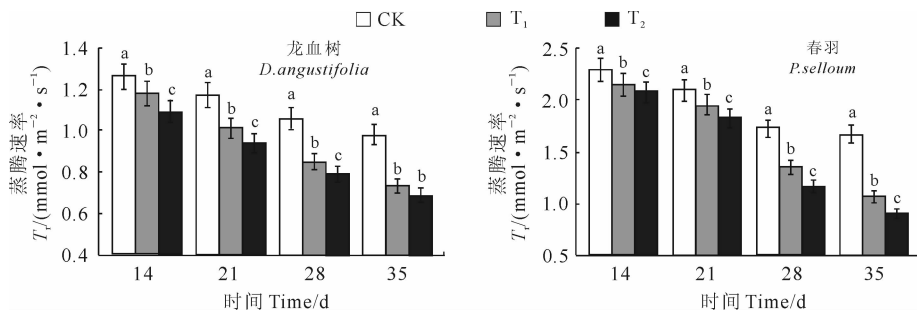


图 4 不同 CO₂ 浓度条件下龙血树和春羽蒸腾速率的变化

Fig. 4 Changes of T_r for *D. angustifolia* and *P. selloum* with different CO₂ concentrations

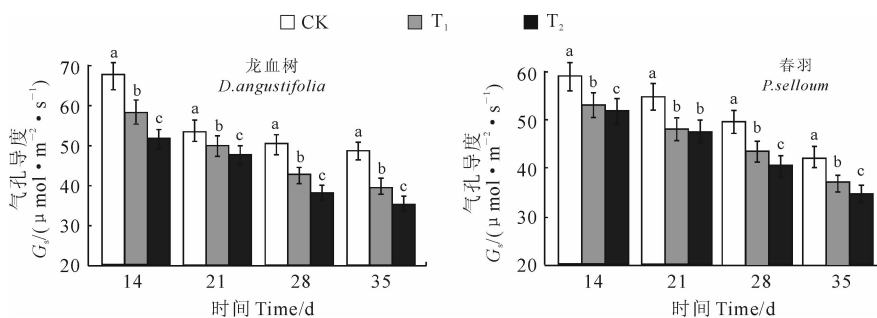


图 5 不同 CO₂ 浓度条件下龙血树和春羽气孔导度的变化

Fig. 5 Changes of G_s for *D. angustifolia* and *P. selloum* with different CO₂ concentrations

两种植物的实际光能转化效率(Φ_{PSII})在 CO_2 浓度升高条件下均先升高后下降,但其变化幅度不同。其中,龙血树幼苗 Φ_{PSII} 值在处理 14 d 后均显著增加, T_1 、 T_2 的 Φ_{PSII} 值分别比对照增加 11.6%、19.8%,且各处理间差异显著;处理 21 和 28 d 后 T_1 、 T_2 处理间 Φ_{PSII} 值差异不显著,但都比同期对照显著增加;处理 35 d 时, T_1 和 T_2 的 Φ_{PSII} 值均低于同期对照但无显著差异。春羽幼苗在处理 14 d 时, T_1 和 T_2 的 Φ_{PSII} 值均显著增加,分别比对照增加 6%、8.3%,而 T_1 、 T_2 之间差异不显著;幼苗处理 21 d 的表现与 14 d 相似;处理 28 d 时, T_1 、 T_2 的 Φ_{PSII} 值开始下降并低于同期对照,但各处理间差异不显著,处理 35 d 后, T_1 、 T_2 的 Φ_{PSII} 值开始显著下降,分别比对照降低 7.5%和 12.3%,而 T_1 与 T_2 之间差异不显著。可见,与背景大气 CO_2 浓度相比,长时间 CO_2 浓度升高不同程度地降低了两种植物的实

际光能转化效率,春羽幼苗表现得更突出。

在 CO_2 浓度升高条件下,两种植物幼苗的非光化学猝灭系数(NPQ)的变化跟实际光能转化效率的表现刚好相反,呈先降后升的趋势。龙血树在处理 14 d 时, T_1 、 T_2 的 NPQ 显著下降,分别比对照降低 2.1%和 5.1%,而 T_1 与 T_2 之间差异不显著;处理 21 d 时,各处理间无显著差异;处理 28 d 的表现与处理 14 d 相似;处理 35 d 时, T_2 的 NPQ 开始显著增加,比同期对照增加 10.1%,而 T_1 无明显变化。春羽幼苗处理 14 d 时, T_2 的 NPQ 值显著降低,而 T_1 无明显变化;处理 21 d 的表现与处理 14 d 相似;处理 28 d 时, T_1 、 T_2 的 NPQ 均比同期对照显著降低,降低幅度为 5%和 7.3%;处理 35 d 后, T_1 的 NPQ 显著增加,比同期对照增加 9.2%,而 T_1 无明显变化。这说明短期 CO_2 浓度升高有助于植物把所捕获的光能用于进行光合作用,但随着处理时

表 1 不同 CO_2 浓度条件下龙血树和春羽叶绿素荧光参数的变化

Table 1 Parameters of chlorophyll fluorescence of *D. angustifolia* and *P. selloum* with different CO_2 concentrations

荧光参数 Fluorescence parameter	处理 Treatment	时间 Time/d				
		14	21	28	35	
F_v/F_m	龙血树 <i>D. angustifolia</i>	CK	0.641±0.006a	0.634±0.015a	0.631±0.015a	0.638±0.021a
		T_1	0.653±0.021a	0.642±0.019a	0.639±0.014a	0.566±0.028a
		T_2	0.658±0.038a	0.669±0.039a	0.658±0.024a	0.547±0.059b
	春羽 <i>P. selloum</i>	CK	0.675±0.019a	0.680±0.033a	0.670±0.020a	0.660±0.040a
		T_1	0.667±0.030a	0.677±0.045a	0.659±0.098a	0.599±0.028a
		T_2	0.650±0.023a	0.668±0.092a	0.657±0.013a	0.560±0.057b
Φ_{PSII}	龙血树 <i>D. angustifolia</i>	CK	0.516±0.014c	0.577±0.028b	0.582±0.016b	0.568±0.024a
		T_1	0.576±0.016b	0.659±0.014a	0.679±0.025a	0.525±0.107a
		T_2	0.618±0.011a	0.675±0.014a	0.715±0.026a	0.503±0.004a
	春羽 <i>P. selloum</i>	CK	0.699±0.002b	0.720±0.017b	0.764±0.020a	0.738±0.016a
		T_1	0.741±0.018a	0.773±0.016a	0.751±0.003a	0.683±0.015b
		T_2	0.757±0.021a	0.798±0.012a	0.743±0.010a	0.647±0.044b
NPQ	龙血树 <i>D. angustifolia</i>	CK	0.746±0.006a	0.754±0.020a	0.763±0.012a	0.704±0.016b
		T_1	0.730±0.020b	0.706±0.100a	0.680±0.044b	0.721±0.011b
		T_2	0.708±0.023b	0.690±0.035a	0.671±0.019b	0.775±0.015a
	春羽 <i>P. selloum</i>	CK	0.778±0.030a	0.763±0.023a	0.749±0.013a	0.742±0.022b
		T_1	0.734±0.007a	0.724±0.032a	0.713±0.002b	0.780±0.019b
		T_2	0.703±0.031b	0.704±0.022b	0.694±0.024b	0.810±0.017a
q_p	龙血树 <i>D. angustifolia</i>	CK	0.876±0.019a	0.930±0.047a	0.916±0.129a	0.834±0.060a
		T_1	0.898±0.081a	0.952±0.011a	0.931±0.129a	0.810±0.064a
		T_2	0.904±0.028a	0.960±0.088a	0.940±0.042a	0.790±0.070a
	春羽 <i>P. selloum</i>	CK	0.856±0.074a	0.897±0.047a	0.879±0.106a	0.876±0.053a
		T_1	0.873±0.037a	0.914±0.053a	0.882±0.077a	0.856±0.043a
		T_2	0.891±0.083a	0.951±0.298a	0.893±0.188a	0.835±0.049a

注:同种同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异。

Note: Different letters indicated significant different in the same column at 0.05 level.

间的延长,这种效应会减弱,以春羽表现得更突出。

两种植物的光化学猝灭系数(q_p)在 CO₂ 浓度升高环境中均呈先上升后降低的趋势,但各处理间差异均不显著。其中,龙血树幼苗处理 14 d 时, T_1 、 T_2 的 q_p 均大于对照,但各处理间均无显著差异;幼苗处理 21 和 28 d 的表现跟处理 14 d 相似;处理 35 d 后, T_1 和 T_2 的 q_p 值开始低于同期对照,分别比对照降低 2.9% 和 5.3%,但各处理间差异不显著。龙血树幼苗处理 14 d 时, T_1 、 T_2 的 q_p 均大于对照,但各处理间均无显著差异;幼苗处理 21 和 28 d 的表现跟处理 14 d 相似;处理 35 d 后, T_1 和 T_2 的 q_p 值开始低于同期对照,降低幅度分别为 2.3% 和 4.7%,但各处理间差异不显著。可见,环境 CO₂ 浓度升高对植物光系统 II 的电子传递活性没有显著影响。

3 讨 论

本试验研究表明在高浓度 CO₂ 环境中龙血树及春羽的株高和叶面积在正常 CO₂ 浓度环境中植株的叶面积和株高有所增加,特别是春羽的增加幅度更加明显。这说明在现有 CO₂ 浓度下,植物体内叶绿体基质中 CO₂ 浓度较低,并没有达到 CO₂ 饱和点,而较高浓度 CO₂ 的环境有助于提高两种绿化植物的光合速率以及增强 CO₂ 的同化作用,从而导致植物的生物量增加。

本试验中,在不同 CO₂ 浓度处理 28 d 时,龙血树和春羽的光合速率始终大于对照,这与许多前人的研究结果是一致^[13-14]。但在处理 35 d 时,高浓度 CO₂ 条件下测定的植株净光合速率处理组开始低于对照组(图 2),表现出了一些试验中可能出现的光合适应现象^[15-17],这可能是光合速率的提高超过了光合产物合成、运输和利用的能力,形成光合产物的反馈抑制所致。大气 CO₂ 浓度会影响植物气孔运动,低浓度 CO₂ 促进气孔的张开,CO₂ 浓度升高会使气孔迅速关闭。气孔关闭使气孔导度下降,会减少植物与大气之间的气体交换。本试验龙血树及春羽 T_1 、 T_2 处理组熏气处理 35 d,气孔导度降低幅度在 13.8%~25.1% 之间,这与 Ainsworth 等^[18] 发现提高 CO₂ 浓度可使植物叶片气孔导度平均下降 22% 的研究结果相一致。气孔关闭后植物蒸腾作用将减少, T_r 的变化规律与 G_s 的变化规律相同,这与张彤等^[19] 研究 CO₂ 浓度升高会引起气孔关闭,蒸腾速率降低的试验结果相一致。

叶绿素荧光动力学技术在测定叶片光合作用过

程中对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独特的作用^[20]。 F_v/F_m 表示的是 PS II 将吸收的光能转化成化学能的效率,该参数不受物种和生长环境的限制,非胁迫条件下变化极小,而胁迫条件下明显下降;叶片的 Φ_{PSII} 值代表了 PS II 反应中心在环境胁迫下的实际原初光能转化效率。 Φ_{PSII} 值升高表明植株同化(NADPH、ATP)形成得到促进,从而提高植物对碳的固定和同化^[21]。本研究中,CO₂ 浓度升高,两种植物的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 有相同的趋势,先增加,随着处理时间的延长,其又呈下降趋势,且均低于对照。这些都说明,处理初期 CO₂ 浓度升高有利于植物把所吸收的光能比较高效地转化为生物化学能,为碳同化作用提供更为充足的能量,有效提高了植物的净光合速率,这与 Cure 等^[22] 所报道的 CO₂ 浓度倍增使农作物的净光合速率平均提高 29% 相一致;处理后高浓度 CO₂ 已对植株造成胁迫,叶片 PS II 的原初光能转换效率下降,潜在活性中心受损,光合作用原初反应受到抑制。这可能是植株长期处于高浓度 CO₂ 环境下,其叶绿素光系统 II 的结构遭到破坏,导致植物叶片光合能力下降^[23-25]。 NPQ 和 q_p 反映植物叶片对激发能利用的情况,本研究中,两种植物在 CO₂ 浓度升高条件下,其 NPQ 值先降低后升高,表明在处理初期两种植物可以充分利用光能,减少热耗散,促进光合作用的进行;随着处理时间的延长,在 CO₂ 浓度为 $1\ 560\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 处理下的植株其 NPQ 值比同期对照显著升高,这说明高浓度的 CO₂ 引起 PS II 反应中心过剩的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉。而 q_p 值没有明显变化,说明 CO₂ 浓度升高对 q_p 影响不大。张绪成等^[26] 对小麦的研究发现,CO₂ 浓度升高,其 NPQ 值显著降低,而 q_p 无明显变化;廖飞勇等^[27] 以榉树为实验材料在短期 CO₂ 加倍处理下,研究发现其 NPQ 值增加而 q_p 值显著降低。可见,高浓度 CO₂ 对植物叶片叶绿素荧光参数的影响因不同的植物种类而异。

总之,本实验结果表明,龙血树和春羽的生长、光合气体交换参数和叶绿素荧光特性会受到 CO₂ 浓度的影响。短时间内 CO₂ 浓度升高更有利于两种植物的光合作用和生长,但随着处理时间的延长,这种优势会慢慢的消失,尤其是 CO₂ 浓度为 $1\ 560\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时,两种植物在处理后期的光合能力受到抑制。本文通过测定不同浓度($390\sim 1\ 560\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)对龙血树和春羽生长及光合生理的影响,从而为评价大气 CO₂ 浓度升高对城市绿化植

物的影响,以及绿化植物面临全球气候变化的响应 提供重要科学依据。

参考文献:

- [1] WANG W M(王为民), WANG CH(王 晨), LI CH J(李春俭), *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on growth of plants[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2000, **20**(4): 676-683(in Chinese).
- [2] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2007: Impacts, adaptations and vulnerability. Fourth assessment report of working group II [R]. Cambridge, UK: University Press, 2007.
- [3] LUO Y Q, WAN S Q, HUI D F, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 431: 622-625.
- [4] HOU J D(侯晶东), CAO B(曹 兵), *et al.* Effect of doubled CO₂ concentration on photosynthesis characteristics of *Lycium barbarum* seedling[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*(Nat. Sci. Edi.) (南京林业大学学报·自然科学版), 2012, **36**(5): 71-76(in Chinese).
- [5] HAO X Y(郝兴宇), HAN X(韩 雪), LI P(李 萍), *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on mung bean leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters[J]. *The Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2011, **22**(10): 2 776-2 780(in Chinese).
- [6] LIN B Y(林碧英), ZHANG Y(张 瑜), *et al.* Effects of CO₂ concentration on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical indices of cowpea[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*(植物营养与肥料学报), 2011, **17**(4): 964-969(in Chinese).
- [7] COUSINS A B, BLOOM A L. Influence of elevated CO₂ and nitrogen nutrition on photosynthesis and nitrate photo-assimilation in maize [J]. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26: 1 525-1 530.
- [8] ZHOU Y M(周玉梅), HAN SH J(韩士杰), HU Y L(胡艳玲), *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthetic parameters of *Pinus koraiensis* needles[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2008, **28**(1): 423-429(in Chinese).
- [9] BI Y W(毕玉伟), QIN J(秦 俊), *et al.* Effects of elevated carbon dioxide concentration on photosynthetic characteristics and growth of *Cinnamomum camphora* seedlings[J]. *Journal of Northeast Forestry University*(东北林业大学学报), 2011, **39**(5): 27-43(in Chinese).
- [10] HAN W J(韩文军), LIAO F Y(廖飞勇), HE P(何 平). The photosynthetic response of *Phoebe bournei* to doubled CO₂ concentration in air[J]. *Journal of Central South Forestry University*(中南林学院学报), 2003, **23**(2): 62-65(in Chinese).
- [11] CHEN G Y, YONG Z H, LIAO Y, *et al.* Photosynthetic acclimation in rice leaves to free-air CO₂ enrichment related to both ribulose-1,5-bisphosphat regeneration limitation[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2005, **46**(7): 1 036-1 044.
- [12] XIA J R(夏建荣), GAO K SH(高坤山), YE H B(叶海波). Response of growth and photosynthesis of *Anabena flos-aquae* to elevated atmospheric CO₂ concentration[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2002, **26**(6): 652-655(in Chinese).
- [13] JIANG G M(蒋高明), LIN G H(林光辉). Inside biosphere 2 several kinds of plant growth under high CO₂ concentration changes in photosynthetic capacity[J]. *Chinese Science Bulletin*(科学通报), 1997, **42**(4): 434-438(in Chinese).
- [14] WANG CH Y(王春乙), GUO J P(郭建平), WANG X L(王修兰), *et al.* The experimental study of the effects of CO₂ concentration enrichment on physiological feature of C₃ and C₄ crops[J]. *Acta Agronomica Sinica*(作物学报), 2000, **26**(6): 813-817(in Chinese).
- [15] SAWADA S, KUNINAKA M, WATANABE K, *et al.* The mechanism to suppress photosynthesis through end-product inhibition in single-rooted soybean leaves during acclimation to CO₂ enrichment[J]. *Plant and Cell Physical*, 2001, **42**(10): 1 093-1 102.
- [16] ZHANG D Y(张道允), XU D Q(许大全). The mechanisms of plant photosynthetic acclimation to elevated CO₂ concentration[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*(植物生理与分子生物学报), 2007, **33**(6): 463-470(in Chinese).
- [17] ZHAO T H(赵天宏), WANG M Y(王美玉), ZHANG W W(张巍巍), *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on plant photosynthesis[J]. *Ecology and Environment*(生态环境), 2006, **15**(5): 1 096-1 100(in Chinese).
- [18] AINSWORTH E A, ROGERS A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising (CO₂): mechanisms and environmental interactions[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2007, **30**(3): 258-270.
- [19] ZHANG T(张 彤), WANG L(王 磊), YANG J X(杨俊兴). Effect of elevated CO₂ concentration on photosynthetic efficiency soybean under drought stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*(河南农业科学), 2005, (8): 47-50(in Chinese).
- [20] SCHREIBER U. Pulse-amplitude-modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview[M]. Chlorophyll a Fluorescence. G. Papageorgiou and Govindjee, Springer Netherlands, 2004, 19: 279-319.
- [21] SHI Q H(史庆华), ZHU ZH J(朱祝军), Khalida AL-aghaby, *et al.* Effects of isosmotic Ca(NO₃)₂ and NaCl treatment on photosynthesis in leaves of tomato[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*(植物营养与肥料学报), 2004, **10**(2): 188-191(in Chinese).
- [22] CURE J D, ACOCK B. Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, **38**(1): 127-145.
- [23] CHEN G Y(陈根云), LIAO Y(廖 轶), CAI SH Q(蔡时青), *et al.* Leaf photosynthetic acclimation of *Echinochloa crusgalli* grown in rich field to free-air CO₂ enrichment (FACE)[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2002, (13): 1 201-1 204(in Chinese).
- [24] AINSWORTH EA, LONG SP. What we have learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂[J]. *New Phytologist*, 2005, 165: 351-372.
- [25] 刘汉峰. CO₂ 倍增对 3 种石斛光合特性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2012: 28-31.
- [26] ZHANG X CH(张绪成), YU X F(于显枫), *et al.* Effects of nitrogen application and elevated atmospheric CO₂ on electron transport and energy partitioning in flag leaf photosynthesis of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2011, **22**(3): 673-680(in Chinese).
- [27] LIAO F Y(廖飞勇), QIN SH N(覃事妮), XIE Y(谢 瑛). Effects of doubled CO₂ on the photoenergy transformation of *Zelkova schneideriana* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*(中南林业科技大学学报), 2008, **28**(3): 23-27(in Chinese).