应用生态学报 2017年6月 第28卷 第6期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Jun. 2017, **28**(6): 1941-1947 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201706.021

日光温室冬季增施 CO_2 对切花红掌光合作用及生长发育的影响

杨克彬 孟凡志 郭先锋*
(山东农业大学林学院, 山东泰安 271018)

摘 要 针对切花红掌日光温室冬季生产时 CO_2 亏缺严重的现象,以不增施 CO_2 为对照,研究了增施 700、1000、1300 μmol·mol^{-1}浓度 CO_2 对切花红掌'火焰'光合特性和生长发育的影响.结果表明:增施 60 d CO_2,红掌叶片的净光合速率、胞间 CO_2 浓度和水分利用效率均显著提高,且以 1000 μmol·mol^{-1}处理的增幅最大;而气孔导度则较对照显著下降.增施 CO_2 后,红掌叶片的可溶性糖、淀粉和可溶性蛋白含量均较对照显著增加,佛焰苞大小、色泽、花茎长度等切花品质参数,以及叶片发育质量参数和花茎生长速率均有不同程度的提高,且均以 1000 μmol·mol^{-1}浓度最佳.增施 1000 μmol·mol^{-1}的 CO_2 可以有效促进日光温室切花红掌的冬季生产.

关键词 红掌; CO_2 施肥; 切花; 生长发育; 品质

Effects of CO_2 fertilization on photosynthesis and growth of cut *Anthurium andraeanum* in solar greenhouse in winter. YANG Ke-bin, MENG Fan-zhi, GUO Xian-feng* (*Colloge of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *Shandong, China*).

Abstract: Aiming at the problem of the acute shortage of CO_2 in winter production of cut *Anthurium andraeanum* in solar greenhouse, the effect of CO_2 fertilization on photosynthetic characteristics and growth performance of *A. andraeanum* 'Fire' was investigated. Three treatments with different concentrations of CO_2 were designed, *i.e.*, 700, 1000 and 1300 μmol·mol^{-1}, with receiving no extra CO_2 as the control. The results showed that for the CO_2-fertilized plants, the photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration and water use efficiency were significantly greater than those in the control plants after CO_2 fertilization for 60 days, and the largest increase range was observed in the 1000 μmol·mol^{-1} CO_2 treatment, whereas the stomata conductance was significantly reduced compared with the control. Meanwhile, the contents of soluble sugar, starch and soluble protein in CO_2-fertilized plants were significantly higher than those in control plants. Moreover, the quality of cut flowers with CO_2 fertilization was remarkably superior to control flowers in term of the parameters including spathe size, spathe color, peduncle length, leaf growth performance and peduncle growth rate. The most superior improvement was observed in the 1000 μmol·mol^{-1} CO_2 treatment. It was therefore concluded that CO_2 fertilization of 1000 μmol·mol^{-1} could effectively improve the winter production of cut *A. andraeanum* in solar greenhouse.

Key words: *Anthurium andraeanum*; CO_2 fertilization; cut flower; growth and development; quality.

CO_2 是植物光合作用的主要原料,参与植物体内一系列的生理代谢反应,而光合作用为植株的生长发育提供必要的营养物质,因此,CO_2 浓度是植株生长发育的重要限制因素[1].然而,在设施栽培中,由于设施的相对封闭性以及植物光合作用的消耗,导致设施内 CO_2 匮乏,在冬季其浓度甚至低于大气 CO_2 浓度,严重限制了植株的正常光合作用.因此,在生产上造成光合作用受限、产量和品质难以提高以及病虫害频发等一系列问题.目前,对菊花、玫瑰、观赏凤梨、向日葵和非洲菊[2-6]等花卉的研究发现,增施 CO_2 能明显促进温室花卉的优质高产,因此被

本文由国家林业局“948”项目(2012-4-57)资助 This work was supported by the 948 Project from the State Forestry Administration (2012-4-57).
2016-10-31 Received, 2017-03-20 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoxf@sdau.edu.cn

广泛应用于花卉的设施生产[7].

红掌(*Anthurium adndraeanum*)为天南星科安祖花属的多年生草本植物,原产于南美洲热带雨林,其花色鲜艳,花形奇特,观赏价值高,既可盆栽观赏,又广泛应用于高档切花生产,目前已成为国际市场上产值仅次于热带兰的第二大宗热带花卉[8-9].目前,关于红掌的研究主要针对幼苗期的盆栽红掌品种,而设施生产中增施 CO_2 的研究较少,并且设施类型多为南方的开顶式塑料薄膜温室[1,10-14].关于日光温室条件下增施 CO_2 对切花红掌光合作用及生长发育的影响,尚未见报道.

切花红掌栽培密度较大,群体光合作用旺盛,但在其日光温室冬季生产中,尤其是每年 12 月至翌年 2 月,温室往往由于保温压力而很少通风,甚至全天封闭,导致温室内 CO_2 亏缺严重.本文以国内市场流行的切花红掌‘火焰’为研究对象,在 2015 年冬至前后(12 月 22 日为冬至)设计了为期 60 d 的增施 CO_2 处理,研究红掌对不同 CO_2 浓度的光合响应和生理及生长响应,分析冬季增施 CO_2 对切花红掌生长和生产的影响,筛选出最适的 CO_2 施肥浓度,为切花红掌的高效设施栽培提供科学依据和应用技术.

1 材料与方法

1.1 试验材料和试验设计

试验于 2015 年 11 月 28 日至 2016 年 1 月 25 日在山东农业大学林学试验站日光温室内进行.试验材料为‘火焰’(*A. andraeanum* ‘Fire’),于 2013 年 10 月从荷兰安祖公司引进,定植于 6 m×1.2 m×30 cm (长×宽×高)的 W 型种植槽中,基质为珍珠岩,定植株行距为 15 cm×30 cm.温室内温度维持在 25~29 ℃/17~20 ℃ (昼/夜),相对湿度为 60%~70%/80%~90% (昼/夜),白天午间光照强度控制在(650±100) μmol · m^{-2} · s^{-1}.肥料采用安祖公司推荐的 AB 营养液配方,其中含有大量硝酸盐.

增施 CO_2 试验于温室内临时搭建的环境条件相同的聚乙烯塑料膜(遮光率为 17.32%)长方形棚中进行,每个小方棚尺寸为 2.5 m×1.2 m×1.5 m (长×宽×高),其内有 70~80 株红掌.增施 CO_2 时间为每天保温被卷起 1 h 后.供气装置为 CO_2 钢瓶,CO_2 气体通过加热型 CO_2 减压器(YQT-341, CN)由均匀分布在红掌叶幕上方的 2 根透明塑料软管进行释放,软管上每 50 cm 扎有一个直径 0.2 cm 小圆孔.流量计控制 CO_2 气体,每天用光合气体测定系统(CIRAS-2, USA)定时监测棚内 CO_2 浓度,使棚内 CO_2 浓度变幅不超过 12%.

试验以不做处理的日常 CO_2 浓度(290±40) μmol · mol^{-1} 为对照(CK),设置 3 个处理:CO_2 浓度为(700±80) μmol · mol^{-1} (T_1)、(1000±100) μmol · mol^{-1} (T_2)、(1300±100) μmol · mol^{-1} (T_3).每处理 3 次重复,每重复随机选取长势基本一致的 10 株切花红掌,作为待测植株.每隔 15 d 在各处理中取生长健康的第 1 位功能叶(可采切佛焰苞下方的第 1 枚叶片)测定光合特性及生理生化指标;处理 60 d 后,取成熟可采切的切花(肉穗花序 2/3~3/4 变色时视为可成熟采切),测定切花品质和叶片发育指标.

1.2 测定项目与方法

1.2.1 光合特性的测定 利用 CIRAS-2 在各处理生长环境中于 10:00—11:00 测定净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i).光合有效辐射(PAR)约为 500 μmol · m^{-2} · s^{-1}.每次测定 5 次重复,取中间 3 个数值的平均值.叶片水分利用效率 $WUE = P_n/T_r$.式中,T_r 为蒸腾速率.

1.2.2 生理生化指标的测定 叶绿素含量采用乙醇法测定[15];可溶性糖和淀粉的含量采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定[16].

1.2.3 切花品质的测定 切花红掌的观赏品质主要取决于佛焰苞和花茎[17].观测指标包括:

1) 佛焰苞大小:佛焰苞大小由其长度及宽度总和的 1/2 来测算.长度指佛焰苞尖部至耳部的长度,宽度指佛焰苞最宽处的距离[17],均用直尺测量.

2) 佛焰苞色泽:由佛焰苞的颜色饱和度及花青素苷含量来衡量.前者的测定采用便携式色差仪(HP-2132, CN),在佛焰苞上均匀选取 4 点,测定其颜色饱和度值后取平均值.花青素苷的含量采用分光光度计法测定[18].

3) 花茎品质:由花茎长度、粗度和硬度来衡量.花茎长度指从花茎基部到花茎顶端的长度[19],用卷尺测量;粗度指花茎自顶端往下起 15 cm 处茎的粗度,采用游标卡尺测量;硬度由质量指数表示,即单位花茎长度的鲜质量.

4) 花茎的鲜质量和干质量:分别指新鲜切花(带花茎的佛焰苞)的质量和 105 ℃杀青后于 80 ℃下烘至恒量后的质量,均采用万分之一天平测定.

1.2.4 生长发育指标的测定 切花红掌的生长参数由叶片发育指标和花茎生长速率表示,具体包括:

1）叶片发育指标：由叶面积、叶片鲜质量和干质量来衡量.叶面积由叶面积仪（Li-3000C，CN）测定.叶片鲜质量和干质量分别指新鲜成熟叶片的质量和 105 ℃杀青后于 80 ℃下烘至恒量后的质量，均采用万分之一天平测定.

2）花茎生长速率：由花茎长度的日平均变化量表示.每 2 d 测量一次花茎长度，直至切花成熟可采切（肉穗花 2/3~3/4 变色时视为可成熟采切）为止.使用 Excel 拟定曲线计算花茎的生长速率.

1.3　数据处理

采用 Excel 2013 软件对数据进行统计分析和作图，采用 SPSS 21.0 软件对数据进行差异显著性检验（LSD，$\alpha=0.05$）.

2　结果与分析

2.1　不同 CO_2 浓度对红掌叶片光合作用的影响

由图 1 可知，各处理红掌叶片 P_n 较 CK 均有显著提高，T_2 处理的提高幅度最大.处理 15 d 时，T_1、T_2、T_3 处理 P_n 提高量最大，分别提高 0.59、1.37 和 0.88 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.之后，各处理的 P_n 一直显著高于 CK 且在不断提高，但是提高的速率均下降.处理 60 d 后，T_1、T_2 和 T_3 处理较 CK 分别显著提高 26.8%、51.0%和 45.3%.这表明增施 CO_2 可以显著提高红掌叶片的 P_n，增强光合作用.

各处理叶片 g_s 显著低于 CK.处理 60 d 后，T_1、T_2 和 T_3 处理 g_s 分别较 CK 显著下降 31.8%、84.7%、127.4%.增施 CO_2 显著提高了 C_i 和 WUE.处理 60 d 后，各处理 C_i 的提高幅度均在 100%以上，T_2 和 T_3 处理最大，达到了 279.3%和 276.8%；各处理 WUE 提高到 CK 的 2~3 倍.

这说明增施一定浓度的 CO_2 有利于 P_n、C_i 和 WUE 的提高，以及 g_s 的降低，有利于红掌植株生长.

2.2　不同 CO_2 浓度对红掌叶片可溶性糖、淀粉和可溶性蛋白的影响

由表 1 可知，在整个试验过程中，各处理叶片的可溶性糖和淀粉含量较 CK 均显著增加.处理 60 d 后，T_1、T_2、T_3 处理可溶性糖含量较 CK 分别显著增加 103.8%、166.3%和 138.1%，淀粉含量分别显著增加 81.9%、125.2%和 111.9%.

各处理叶片的可溶性蛋白含量较 CK 显著增加，但是增加的幅度明显减小.整个处理过程中，叶片的可溶性蛋白含量随处理时间的延长呈先增加后下降的趋势，处理 45 d 时达到峰值.此时 T_1、T_2、T_3 处理叶片的可溶性蛋白含量较 CK 分别显著增加 61.7%、103.7%和 90.3%.

这说明在一定范围内，增施 CO_2 有助于红掌叶片有机营养物质的积累；一旦超过 CO_2 饱和点，CO_2 促进发育的效果便会受到抑制.

2.3　不同 CO_2 浓度对切花品质的影响

CO_2 施肥60d后，各处理切花品质指标均有不

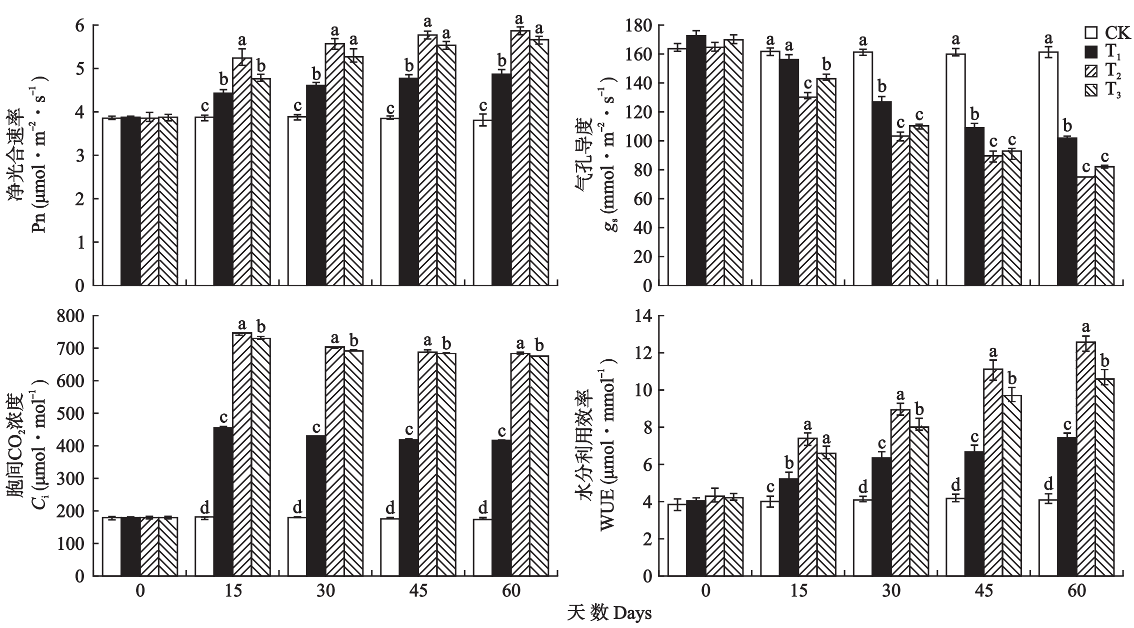

图 1　不同 CO_2 浓度对红掌叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和水分利用效率的影响

Fig.1　Effects of different CO_2 concentrations on P_n, g_s, C_i and WUE of *Anthurium andraeanum* leaves.

CK：（290±40）$\mu mol \cdot mol^{-1}$；T_1：（700±80）$\mu mol \cdot mol^{-1}$；T_2：（1000±100）$\mu mol \cdot mol^{-1}$；T_3：（1300±100）$\mu mol \cdot mol^{-1}$.

表 1 不同 CO_2 浓度对红掌叶片可溶性糖、淀粉和可溶性蛋白含量的影响

Table 1 Effects of different CO_2 concentrations on the content of soluble sugar, starch and soluble protein of *Anthurium andraeanum* ($mg \cdot g^{-1}$)

处理 Treatment	天数 Days	可溶性糖 Soluble sugar	淀粉 Starch	可溶性蛋白 Soluble protein
CK	15	8.69±0.25c	9.86±0.35c	6.84±0.25d
T_1		12.54±0.37b	12.61±0.28b	9.07±0.31c
T_2		15.38±0.72a	15.74±0.32a	13.42±0.59a
T_3		14.07±0.39a	14.71±0.44a	10.60±0.31b
CK	30	8.86±0.60c	9.67±0.20c	6.90±0.19d
T_1		15.04±0.52b	15.09±0.50b	15.19±0.34c
T_2		19.25±1.10a	19.62±0.43a	27.31±1.11a
T_3		17.90±0.17a	18.52±0.43a	22.75±0.97b
CK	45	9.00±0.59c	10.29±0.58c	6.58±0.04d
T_1		16.67±0.68b	16.62±0.17b	14.37±0.34c
T_2		21.53±0.68a	21.37±0.65a	25.26±0.53a
T_3		19.66±0.44a	20.16±0.45a	20.39±0.65b
CK	60	8.75±0.38d	9.80±0.40d	6.61±0.06d
T_1		17.79±0.45c	18.08±0.28c	11.68±0.65c
T_2		23.25±0.76a	22.38±0.35a	22.93±0.36a
T_3		20.79±0.49b	21.06±0.31b	17.87±0.62b

同列不同字母表示差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

同程度的提高,佛焰苞尺寸、花色和切花干质量同CK之间差异显著,而其他指标差异不显著(表 2).增施 CO_2 显著增加佛焰苞尺寸,但是 T_1、T_2 和 T_3 处理之间差异不显著;处理 60 d 后,相比较 CK 的 15.46 cm,T_1、T_2、T_3 处理分别增加了 6.0%、11.4%和 8.7%.增施 CO_2 显著提高了佛焰苞的颜色饱和度和花青素苷的积累,T_1、T_2 和 T_3 处理佛焰苞的颜色饱和度较 CK 别显著提高 6.0%、11.5%和 8.3%,花青素苷含量则分别显著增加 10.4%、31.2%和 15.3%.

增施 CO_2 后花茎品质均有不同程度的提高,但是与 CK 差异不显著.其中,T_2 处理的提高幅度最大,花茎的长度、粗度和硬度分别超过 93.00 cm、6.50 mm 和 0.41.处理 60 d 后,切花鲜质量和干质量也显著增加,T_1、T_2 和 T_3 处理分别较 CK 增加 10.5%、21.0%、16.7%和 19.8%、31.0%、26.5%.综上可知,各处理中,T_2 处理红掌切花品质的提高幅度最大.

2.4 不同 CO_2 浓度对叶片发育和花茎生长的影响

在整个处理过程中,各处理叶片发育程度均有不同程度的提高,但是与 CK 差异不显著,其中,T_2 处理增幅最大(表 3).处理 60 d 后,T_2 处理叶面积、叶片鲜质量和干质量比处理前增加 11.2%、47.6%和 57.5%.叶绿素是植物光合作用最重要的色素,也是叶片发育的重要指标.由表 3 可知,各处理红掌叶片的叶绿素总量较 CK 均显著增加,其增幅的大小顺序为 $T_2>T_3>T_1$.处理 60 d 后,T_1、T_2、T_3处理较 CK 分别显著增加 30.9%、76.4%和 47.2%.表明增施 CO_2 有利于光合色素的合成,从而促进光合作用的进行.

花茎生长速率在一定程度上可以代表切花红掌的产量.各处理花茎生长速率差异显著,其中 T_2 和 T_3处理较 CK 分别提高 18.3%和 10.7%,而 T_1 处理与 CK 之间无显著差异.说明在一定范围内增施 CO_2 可以提高花茎生长速率,从而提高切花产量.

表 2 不同 CO_2 浓度对切花品质的影响

Table 2 Effect of different CO_2 concentrations on quality of cut flowers

处理 Treatment	佛焰苞 Spathe			花茎 Peduncle			切花 Cut-flowers	
	大小 Size (cm)	饱和度 Saturation	花色素苷 Anthocyanins ($A \cdot g^{-1}$ FM)	长度 Length (cm)	粗度 Thickness (mm)	硬度 Hardness	鲜质量 Fresh mass (g)	干质量 Dry mass (g)
CK	15.46±0.32b	56.33±0.76c	1.83±0.05c	89.00±1.73	6.03±010	0.360±0.022	49.84±1.55	5.67±0.17b
T_1	16.38±0.29a	59.71±0.12b	2.02±0.02b	91.00±0.58	6.10±0.09	0.389±0.015	55.09±2.36	6.79±0.29a
T_2	17.23±0.09a	62.83±0.31a	2.40±0.02a	93.33±0.33	6.51±0.15	0.410±0.018	60.32±3.71	7.43±0.46a
T_3	16.80±0.34a	60.99±0.33b	2.11±0.02b	92.67±1.45	6.37±0.14	0.405±0.020	58.18±2.09	7.17±0.25a

表 3 不同 CO_2 浓度对红掌叶片和花茎生长的影响

Table 3 Effects of different CO_2 concentrations on leaf and peduncle growth of *Anthurium andraeanum*

处理 Treatment	叶片 Leaf				花茎生长速率 Peduncle growth rate ($cm \cdot d^{-1}$)
	面积 Area (cm^2)	鲜质量 Fresh mass (g)	干质量 Dry mass (g)	叶绿素含量 Chlorophyll content ($mg \cdot g^{-1}$)	
CK	561.17±34.98	19.12±0.38	3.86±0.08	1.26±0.031d	1.687±0.009c
T_1	602.38±26.18	25.09±2.18	5.40±0.47	1.61±0.043c	1.748±0.003c
T_2	628.57±41.73	28.27±3.60	6.07±0.78	2.17±0.089a	1.994±0.032a
T_3	610.61±28.47	27.31±3.98	5.87±0.86	1.81±0.012b	1.872±0.055b

3　讨　论

3.1　日光温室内切花红掌生产中增施 CO_2 的必要性及合理浓度

CO_2 浓度在补偿点和饱和点之间时植物才能进行有效光合作用[20-21].根据多年观测,严冬季节日光温室内 CO_2 浓度为 250~1400 μmol·mol^{-1},在卷起保温被前浓度最高,之后由于通风和光合作用而迅速降低,10:00—12:00 降至最低,并维持在低于大气水平直至日落.因此,为满足红掌植株正常生长,提高其切花品质和产量的需求,有必要增施 CO_2.本研究表明,通过增施 CO_2,不仅显著促进了切花红掌的光合作用,而且显著提高了叶片中光合产物及蛋白质含量的积累,进而提高了切花品质和产量.

本研究中最适宜的 CO_2 浓度是 1000 μmol·mol^{-1};李永华等[14]研究表明,增施 700 μmol·mol^{-1}的 CO_2 有利于红掌生长.这种差异可能是由于李永华等[14]的研究主要针对苗期红掌,而本研究则针对定植 3 年后的开花大苗,其叶面积大、同化能力强,因此需要更高浓度的 CO_2 作为同化底物.本研究还表明,CO_2 浓度并非越高越好,略超过饱和点的 T_3处理的各指标较 T_2 处理均有明显下降,这符合在其他植物中得出的报酬递减规律[22].浓度过高不但不经济,而且会导致增施 CO_2 促进效果的下降.综上,日光温室中切花红掌开花苗于冬季生产时,推荐增施 CO_2,其适宜浓度为 1000 μmol·mol^{-1}.

3.2　未发生光合适应现象的原因分析

大量研究表明,对于大多数植物来说,短时间增施高浓度 CO_2 会提高其 P_n,促进植物的生长发育,从而提高作物产量和观赏植物的品质[23-24].但这种促进效果会随处理时间延长减弱或消失,甚至出现光合下调,这被称为光合适应现象[25-26].在生产过程中若出现光合适应会造成施肥效率的下降,以及成本的浪费,更甚者会导致植株生长发育不良,产量降低,品质下降.关于红掌生产过程中增施 CO_2,有研究以不同的盆栽红掌品种为对象,开展过短期(30 d)、较长期(90 d)和长期(150 d)的研究[10-13],结果表明,试验植株或早或晚均出现了光合适应现象.

本研究在增施 CO_2 的过程中(60 d),虽然 P_n的提高幅度明显下降,但是 P_n始终处于上升阶段,说明高 CO_2 浓度对光合作用的促进效果并没有减弱,即在试验期间并未出现光合适应现象.这可能是由于本试验 CO_2 处理在严冬季节进行,昼短夜长,虽然叶片内淀粉和可溶性糖等光合产物在白天有所积累,但是在夜间被迅速转移或由呼吸作用所消耗,因此不会在叶片过量积聚,避免了供大于求的情况,维持了植株的源库平衡,避免了导致光合适应主要诱因——反馈抑制[27]的出现.这也可能与 N 肥供应量有关.在 N 肥充足的条件下,无论是长期或短期试验,高 CO_2 浓度下生长的植株均可能不会出现光合适应现象[28].本试验使用的肥料 N 充足,使叶片内 N 能够满足光合作用需要,因此 P_n长时间保持在较高的水平,抑制了光合适应现象.

3.3　切花红掌生长发育响应 CO_2 浓度升高的生理机理

本研究中,增施 CO_2 促进红掌的营养生长,包括叶面积和叶鲜质量等.这同盆栽红掌的相关研究结果一致[10-14];本研究还进行了红掌生殖生长指标的测定,结果发现,增施 CO_2 同样促进了切花品质的提升,如佛焰苞增大和颜色饱和度升高等,同时也提高了花茎生长速率.该促进作用与非洲菊(*Gerbera jamesonii*)[6]和蝴蝶兰(*Phalaenopsis*)[24]等设施园艺植物的研究结果一致.本研究中,增施 CO_2 显著提高了红掌的碳水化合物含量,这与观赏凤梨[29]的研究结果一致.碳水化合物的积累会促进花色素苷的形成[30].CO_2 作为光合作用的底物,参与碳同化循环,因此外界环境中 CO_2 浓度升高后,细胞内外 CO_2 浓度也随之升高,并通过光合作用为细胞生长提供糖原,促进植物营养器官的生长发育[10],从而为生殖生长提供了物质基础.综上,切花红掌对于 CO_2 浓度升高的响应最终体现在其切花品质和产量的提高.

值得注意的是,本研究中,增施 CO_2 显著增加了可溶性蛋白的含量.该结果不同于非洲菊[6]和毛凤菊(*Saussurea kansuensis*)[31]的研究报道.有研究还认为,C/N 增大时有利于促进花芽分化,从而促进植物产量提高[32-33].而本研究中,增施 CO_2 处理 T_1、T_2 和 T_3的可溶性蛋白含量显著增加,可能导致 C/N 降低.这可能与红掌的“一叶一花”生长模式有关,“一叶”专为“一花”提供营养物质.此外,本研究采取的叶样为成熟可采切佛焰苞下方的第 1 枚叶片,即此时“一花”早已完成花芽分化,因此叶片中可溶性蛋白的含量规律同其他研究不同.

参考文献

[1]　Li Y-H (李永华), Wang X (王　献), Kong D-Z (孔

德政), *et al*. Effects of long-term CO_2 enrichment on photosynthesis and plant growth in *Anthurium andraeanum* L. seedlings. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(5): 1852-1857 (in Chinese)

[2] Carvalho S, Heuvelink E. Influence of greenhouse climate and plant density on external quality of chrysanthemum [*Dendranthema grandiflorum* (Ramat.) Kitamura]: First steps towards a quality model. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2001, **76**: 249-258

[3] Pan H, Zhang Q, Liu Q, *et al*. Effects of different CO_2 enrichment programs during the day on production of cut roses. *Acta Horticulture*, 2006, **766**: 59-64

[4] Hui J-A (惠俊爱), Ye Q-S (叶庆生). Effects of elevated CO_2 concentration on photosynthesis, growth and development of the *Bromeliad guzmantia*. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(2): 424-430 (in Chinese)

[5] Lourdes DML, Purificacion C, Purificacion DLH, *et al*. Growth under elevated atmospheric CO_2 concentration accelerates leaf senescence in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. *Journal of Plant Physiology*, 2012, **169**: 1392-1400

[6] Xu SP, Zhu XS, Li C, *et al*. Effects of CO_2 enrichment on photosynthesis and growth in *Gerbera jamesonii*. *Scientia Horticulture*, 2014, **177**: 77-84

[7] McGrath JM, Lobell DB. Regional disparities in the CO_2 fertilization effect and implications for crop yields. *Environmental Research Letters*, 2013, **8**: 1880-1885

[8] Khawlhring N, Thanga J. Plant performance of *Anthurium andreanum* as affected by shade conditions and different conventional nutrient sources. *International Journal of Horticulture and Floriculture*, 2012, **4**: 22-26

[9] Elibox W, Umaharan P. Genetic basis for productivity in *Anthurium andraeanum* Hort. *HortScience*, 2014, **49**: 859-863

[10] Liu L-N (刘丽娜). Effects of Elevated CO_2 Concentration on Photosynthesis and Growth in *Anthurium andraeanum*. Master Thesis. Guangzhou: South China Normal University, 2004 (in Chinese)

[11] Wang J-M (王精明), Li Y-H (李永华), Huang S-Q (黄胜琴), *et al*. Effects of elevated CO_2 concentration on photosynthetic rate, growth and development in *Anthurium andraeanum* Lind. leaves. *Acta Horticulture Sinica* (园艺学报), 2005, **32**(2): 335-338 (in Chinese)

[12] Li Y-H (李永华), Liu L-N (刘丽娜), Ye Q-S (叶庆生). Effects of elevated CO_2 on the growth photosynthesis of *Anthurium andraeanum*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2005, **13**(4): 343-346 (in Chinese)

[13] Li Y-H (李永华), Wu R-H (武荣花), Yang Q-S (杨秋生), *et al*. Effects of short-term CO_2 enrichment on photosynthetic rate and growth in *Anthurium andraeanum* L. seedlings. *Journal of Henan Agricultural University* (河南农业大学学报), 2006, **40**(6): 607-610 (in Chinese)

[14] Li Y-H (李永华), Su Z-G (苏志国), Yang Q-S (杨秋生), *et al*. Effects of long-term CO_2 enrichment on photosynthetic parameters and biomass of *Anthurium andraeanum* Lind. *Henan Science* (河南科学), 2008, **26**(4): 430-433 (in Chinese)

[15] Liang X-Y (梁晓艳), Guo F (郭　峰), Zhang J-L (张佳蕾), *et al*. Effects of single-seed sowing on canopy microenvironment, photosynthetic characteristics and pod yield of peanut. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(12): 3700-3706 (in Chinese)

[16] Ali MB, Hahn EJ, Paek KY. Effects of temperature on oxidative stress defense systems, lipid peroxidation and lipoxygenase activity in *Phalaenopsis*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2005, **43**: 213-223

[17] Dufour L, Guérin V. Growth, developmental features and flower production of *Anthurium andreanum* Lind. in tropical conditions. *Scientia Horticulture*, 2003, **98**: 25-35

[18] Huang ZG, Liang MT, Peng JZ, *et al*. Exogenous ammonium inhibits petal pigmentation and expansion in *Gerbera hybrida*. *Physiology Plant*, 2008, **133**: 254-265

[19] Elibox W, Umaharan P. Morphophysiological parameters characteristics associated with vase-life of cut flowers of *Anthurium*. *HortScience*, 2008, **43**: 825-831

[20] Mortensen LM. Review: CO_2 enrichment in greenhouse. Crop responses. *Scientia Horticulture*, 1987, **33**: 1-25

[21] Su P-X (苏培玺), Du M-W (杜明武), Zhang L-X (张立新), *et al*. Changes of photosynthetic characteristics and response to rising CO_2 concentration in strawberry in solar greenhouse. *Acta Horticulture Sinica* (园艺学报), 2002, **29**(5): 423-426 (in Chinese)

[22] Liu Y (刘　艳), Wang R (汪　仁), Xing Y-H (邢月华), *et al*. Effects of continuous nitrogen application on yield stability and potential of corn. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2016, **47**(2): 425-429 (in Chinese)

[23] Oliveira VF, Zaindan LBP, Braga MR, *et al*. Elevated CO_2 atmosphere promotes plants growth and inulin production in the cerrado species *Vernonia herbacea*. *Functional Plant Biology*, 2010, **37**: 223-231

[24] Xu S-P (许申平), Zeng L-T (曾兰婷), Ye Q-S (叶庆生). Effects of long-term elevated CO_2 on growth and flowering in *Phalaenopsis*. *Acta Horticulture Sinica* (园艺学报), 2015, **42**(8): 1599-1605 (in Chinese)

[25] Nieves G, Marouane B, Gorka E, *et al*. Increased photosynthetic acclimation in alfalfa associated with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and cultivated in greenhouse under elevated CO_2. *Journal of Plant Physiology*, 2014, **171**: 1774-1781

[26] Wang M (王　淼), Hao Z-Q (郝占庆), Ji L-Z (姬兰柱), *et al*. Effect of elevated atmospheric CO_2 concentrations on photosynthesis light response characteristics of three coniferous tree species seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(6): 646-650 (in Chinese)

[27] Sawada S, Kuninaka M, Watanable K, *et al*. The mechanism to suppress photosynthesis through end-product inhibition in single-rooted soybean leaves during acclimation to CO_2 enrichment. *Plant and Cell Physiology*, 2001, **42**: 1093-1102

[28] Shimono H, Suzuki K, Aoki K, *et al*. Effect of panicle removal on photosynthetic acclimation under elevated CO_2 in rice. *Photosynthetica*, 2010, **48**: 530-536

[29] Croonenborghs S, Ceusters J, Londers E, *et al*. Effects of elevated CO_2 on growth and morphological characteristics of ornamental bromeliads. *Scientia Horticulturae*, 2009, **2**: 192-198

[30] Zhang D, Qian MJ, Yu B, *et al*. Effect of fruit maturity on UV-B-induced post-harvest anthocyanin accumulation in red Chinese sand pear. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, **35**: 2857-2866

[31] Li X-J (李筱姣), Wang Y-F (王一峰), Cao J-H (曹家豪), *et al*. Interactive effects of CO_2 concentration and temperature on physiological parameters of *Saussurea kansuensis*. *Guihaia* (广西植物), 2016, **36**(4): 435-442 (in Chinese)

[32] Wei L (韦　莉), Peng F-R (彭方仁), Wang S-B (王世博), *et al*. Morphology and changes of several metabolites content during flower bud differentiation in *Phalaenopsis*. *Acta Horticulture Sinica* (园艺学报), 2010, **37**(8): 1303-1310 (in Chinese)

[33] Wan C-Y (万春雁), Mi L (糜　林), Huo H-Z (霍恒志), *et al*. Effect of two propagation systems on flower bud differentiation and development of strawberry fruit. *Journal of Fruit Science* (果树学报), 2015, **32**(6): 1179-1186 (in Chinese)

作者简介　杨克彬, 男, 1991 年生, 硕士研究生. 主要从事观赏植物栽培育种与生理研究. E-mail: 15621583297@163.com

责任编辑　孙　菊

杨克彬, 孟凡志, 郭先锋. 日光温室冬季增施 CO_2 对切花红掌光合作用及生长发育的影响. 应用生态学报, 2017, **28**(6): 1941-1947

Yang K-B, Meng F-Z, Guo X-F. Effects of CO_2 fertilization on photosynthesis and growth of cut *Anthurium andraeanum* in solar greenhouse in winter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(6): 1941-1947 (in Chinese)