

不同 CO₂ 浓度对豇豆光合特性和若干生理生化指标的影响

林碧英¹, 张瑜², 林义章¹, 肖钊¹

(1 福建农林大学园艺学院, 福建福州 350002; 2 福建省农业区划研究所, 福建福州 350003)

摘要: 在南方温室栽培环境下, 研究不同 CO₂ 浓度对矮生豇豆幼苗叶片光合特性和生理生化指标的影响。结果表明, 不同 CO₂ 浓度下, 豇豆叶片光合色素、可溶性糖和可溶性蛋白质含量随 CO₂ 浓度的升高均有不同程度的提高。高 CO₂ 浓度还明显提高叶片的光合速率, 但蒸腾速率则较对照有所下降。在不同 CO₂ 浓度下, 超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性变化较大, 且均以 CO₂ 浓度为 1200 mL/m³ 时活性最高。高浓度 CO₂ 使得豇豆叶片中的丙二醛含量明显降低。

关键词: 豇豆; CO₂ 浓度; 光合特性; 生理生化指标

中图分类号: S643.4.601

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)04-0964-06

Effects of CO₂ concentration on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical indices of cowpea

LIN Bi-ying¹, ZHANG Yu², LIN Yi-zhang¹, XIAO Zhao¹

(1 College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2 Institute of Agriculture Regional Planning of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The effects of CO₂ concentrations on photosynthetic characteristic and biochemical indices at the dwarf cowpea seedlings were studied in greenhouse of south China. The results show that, under different CO₂ concentrations, the photosynthetic pigment content, soluble sugar content and soluble protein content increased to a different extent with the increase of CO₂ concentrations. High CO₂ concentrations could prominently increase the photosynthetic rate of cowpea, while decrease the transpiration rate compared with the control. Superoxide dismutase (SOD), peroxidase(POD), and catalase(CAT) varied remarkably under different CO₂ concentrations. The maximum enzyme activities were observed at CO₂ concentration 1200 mL/m³. The malondialdehyde(MDA) content decreased significantly in cowpea leaves at the higher concentrations of CO₂.

Key words: cowpea; CO₂ concentration; photosynthetic characteristics; physiology and biochemistry indices

CO₂ 是植物的主要碳源, 是光合作用的物质基础, 也是产生能量、积累营养不可或缺的原料。随着设施栽培技术的推广应用, 在带给人们良好经济效益的同时, 也出现了一些新的问题。如设施相对封闭的条件导致内环境 CO₂ 匮乏, 作物光合效率降低, 产量与品质提高受限, 病虫害发生频繁等。目前, CO₂ 浓度变化对植物的生长发育等方面的影响已越来越受到人们的重视。在不同 CO₂ 浓度对植物生长发育和光合作用等方面^[1-4]进行了许多研究, 但有关豇豆 CO₂ 施肥方面的研究还少见报道。本研究通过测定不同 CO₂ 浓度下豇豆叶片光合有

关指标和可溶性糖、可溶性蛋白质、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)等生理生化指标, 来阐明 CO₂ 对豇豆幼苗生长过程中光合特性和生理生化过程的影响, 旨在为豇豆的温室大棚的生产寻求科学的 CO₂ 施肥技术, 为数字化管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2010 年 3 月至 2010 年 5 月在福建农林大学园艺学院设施专业现代温室和蔬菜生理生化实

收稿日期: 2010-06-08

接受日期: 2011-03-24

基金项目: 福建省科技重大专项(2008NZ002-1); 福建省重点项目(2009N1003)资助。

作者简介: 林碧英(1963—), 女, 福建福州人, 副教授, 主要从事蔬菜学与设施园艺方面研究。Tel: 0591-83789379; E-mail: lby3675878@163.com

实验室进行。供试豇豆 (*Vigna unguiculata*) 品种为美国原种无架豆,种子由福州闽皇种业公司提供。

试验设 CO₂ 浓度为 800、1200 和 1600 mL/m³ 3 个处理,以面积为 240 m² 的生产常用塑料大棚中的 CO₂ 浓度为对照(CK)。用聚乙烯无滴膜扣 3 个塑料小方棚,每个小方棚长 2 m,宽和高各 1 m。根据小方棚的体积及 CO₂ 罐出气速率计算每个浓度所对应小方棚施用 CO₂ 的时间(以秒计),不定期用 TES-1370 二氧化碳测定仪(台湾产)对各棚内的 CO₂ 浓度进行测定核实。肥源采用钢瓶液态 CO₂,从福州市宏升达机电设备有限公司购得。

将温汤消毒后的豇豆种子直播于盛有细沙(已消毒)的营养钵(直径 12 cm,高度 10 cm)中,每营养钵播 2 粒种子。待豆苗长至两叶一心期,分别选取长势一致的幼苗 50 钵,移入塑料小方棚中进行不同浓度 CO₂ 施肥处理。每天上午 8:30~10:30 施肥(阴雨天不施肥),其余时间依常规栽培管理,每天浇 1 次水,每 3 d 浇 1 次营养液,每次 100 mL。营养液配方(mg/L): Ca(NO₃)₂·4H₂O 945、KNO₃ 607、NH₄H₂PO₄ 115、FeSO₄·7H₂O 2.86、H₃BO₃ 2.13、ZnSO₄·7H₂O 0.22、MnSO₄·7H₂O 0.22、CuSO₄·7H₂O 0.08、(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 0.02。

1.2 测定项目与方法

CO₂ 施肥后 15、25、35 d,每处理分别随机选取 3 株,每株取 1 片功能叶进行光合指标和生理生化

指标的测定,每项指标 3 次重复。

生理生化指标的测定:光合色素的测定采用混合液提取法^[5];可溶性糖含量的测定采用蒽酮-硫酸法^[6];可溶性蛋白质含量的测定采用考马斯亮兰 G-250 法^[7];SOD 活性的测定采用 NBT 光还原法^[7];POD 活性的测定采用华东师大的愈创木酚法^[8];CAT 活性的测定参考 Aebi 的方法^[9];MDA 含量的测定参照陈建勋等的方法^[10]。

光合特性的测定:光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)和水分利用率(WUE)于处理 15、25 和 35 d 上午 11:30 用 GXH-3051C 型光合仪测定,选取照光一致的平展的新鲜叶片,置于叶室(面积为 2.55 cm²)内,合上叶室保证密封状态,使阳光垂直照射,当电脑屏幕所显示的 CO₂ 开始稳态下降时,进行数据采集和测量。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度对豇豆光合特性的影响

2.1.1 对豇豆叶片光合色素含量的影响 不同 CO₂ 浓度处理的豇豆叶片的叶绿素 a (Chl. a)、叶绿素 b (Chl. b)、叶绿素 Chl. (a+b)、类胡萝卜素(Car)含量,除 1600 mL/m³ 下处理 15 和 35 d 的 Chl. b,800 mL/m³ 和 1600 mL/m³ 下处理 35 d 的 Car 外,其余处理与对照 CK 相比差异均达到显著或极显著水平;相同 CO₂ 浓度下,以处理 25 d 时增加效果最显著(表 1)。表明 CO₂ 施肥利于光合色素含量的增加和光合作用的进行。

表 1 不同 CO₂ 浓度对光合色素含量的影响

Table 1 The effects of different CO₂ concentrations on photosynthetic pigment contents

处理天数 Treatment days (d)	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration (mL/m ³)	叶绿素 a Chl. a (mg/g, FW)	叶绿素 b Chl. b (mg/g, FW)	叶绿素 Chl. (a+b) (mg/g, FW)	类胡萝卜素 Car. (mg/g, FW)
15	CK	10.17 ± 0.529 bB	3.37 ± 0.240 bA	13.54 ± 0.769 bB	4.69 ± 0.246 bB
	800	13.64 ± 0.542 aA	4.10 ± 0.422 aA	17.73 ± 0.822 aA	6.11 ± 0.384 aA
	1200	13.85 ± 0.816 aA	4.18 ± 0.376 aA	18.03 ± 1.157 aA	5.95 ± 0.272 aA
	1600	13.52 ± 0.874 aA	3.81 ± 0.078 abA	17.33 ± 0.953 aA	5.81 ± 0.216 aA
25	CK	18.64 ± 0.170 dB	6.62 ± 0.097 dD	25.26 ± 0.089 dD	5.38 ± 0.528 bB
	800	19.60 ± 0.202 cB	7.40 ± 0.189 cC	27.01 ± 0.384 cC	6.47 ± 0.090 aA
	1200	21.90 ± 0.534 aA	9.40 ± 0.223 aA	31.30 ± 0.412 aA	6.49 ± 0.129 aA
	1600	21.17 ± 0.439 bA	7.99 ± 0.240 bB	29.16 ± 0.202 bB	6.86 ± 0.344 aA
35	CK	18.79 ± 0.391 cC	6.69 ± 0.329 cB	25.49 ± 0.066 cC	6.83 ± 0.191 bB
	800	21.33 ± 0.420 bB	7.69 ± 0.359 bAB	29.01 ± 0.761 bB	7.09 ± 0.161 bAB
	1200	23.91 ± 0.354 aA	8.48 ± 0.486 aA	32.39 ± 0.747 aA	7.50 ± 0.131 aA
	1600	21.62 ± 0.129 bB	7.15 ± 0.255 bcB	28.77 ± 0.169 bB	7.07 ± 0.218 bAB

注(Notes): 数值后不同大、小写字母分别表示差异达 1% 和 5% 显著水平 Values followed by different capital and small letters mean significant at 1% and 5% levels, respectively.

2.1.2 对豇豆光合速率、蒸腾速率和水分利用率的影响 不同 CO₂ 浓度处理 15、25 和 35 d 时,豇豆叶片的 Pn 与对照 CK 相比均有明显提高,差异达极显著水平;且均以 CO₂ 浓度 1200 mL/m³ 时为最高;除 800 mL/m³ 下处理 35 d 外,不同 CO₂ 浓度处理叶片的 Tr 均极显著低于对照 CK,其顺序为 CK > 800

mL/m³ > 1200 mL/m³ ≈ 1600 mL/m³。不同处理叶片的 WUE 依次为 1200 mL/m³ > 1600 mL/m³ > 800 mL/m³ > CK,相互间的差异达极显著水平(表 2)。可见,增施 CO₂ 有利于 Pn 的增大和 Tr 的降低,对豇豆幼苗生长比较有利。

表 2 不同 CO₂ 浓度对光合速率、水分利用率和蒸腾速率的影响
Table 2 The effects of different CO₂ concentrations on Pn, WUE and Tr

处理天数 (d) Treatment days	CO ₂ 浓度 (mL/m ³) CO ₂ concentration	光合速率 Pn [mg/(dm ² · h)]	水分利用率 WUE (mg/g)	蒸腾速率 Tr [g/(m ² · h)]
15	CK	10.86 ± 0.166 dD	54.63 ± 1.662 dD	19.89 ± 0.302 aA
	800	12.77 ± 0.315 cC	74.67 ± 1.002 cC	17.10 ± 0.201 bB
	1200	17.78 ± 0.309 aA	123.30 ± 1.345 aA	14.42 ± 0.093 cC
	1600	16.50 ± 0.110 bB	114.23 ± 0.351 bB	14.44 ± 0.059 cC
25	CK	15.86 ± 0.166 dD	76.10 ± 0.300 dD	20.84 ± 0.133 aA
	800	20.77 ± 0.315 cC	104.10 ± 0.200 cC	19.95 ± 0.339 bB
	1200	29.78 ± 0.309 aA	174.77 ± 0.252 aA	17.04 ± 0.187 cC
	1600	26.17 ± 0.647 bB	154.00 ± 0.557 bB	16.99 ± 0.410 cC
35	CK	13.48 ± 0.293 dD	66.03 ± 0.404 dD	20.42 ± 0.355 aA
	800	17.97 ± 0.336 cC	90.87 ± 0.252 cC	19.78 ± 0.364 aA
	1200	25.04 ± 0.352 aA	140.67 ± 1.002 aA	17.80 ± 0.131 bB
	1600	21.78 ± 0.595 bB	125.13 ± 0.351 bB	17.40 ± 0.497 bB

注 (Note): 数值后不同大、小写字母分别表示差异达 1% 和 5% 显著水平 Values followed by different capital and small letters mean significant at 1% and 5% levels, respectively.

2.2 CO₂ 浓度对豇豆若干生理生化指标的影响

2.2.1 对豇豆叶片可溶性糖含量的影响 图 1 看出,豇豆叶片的可溶性糖含量在不同 CO₂ 浓度下有明显变化。不同 CO₂ 浓度处理 15、25 和 35 d 时,豇

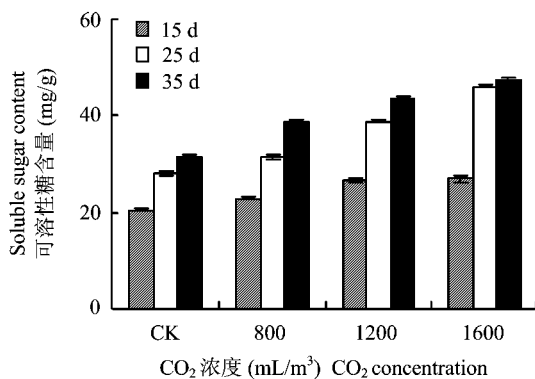
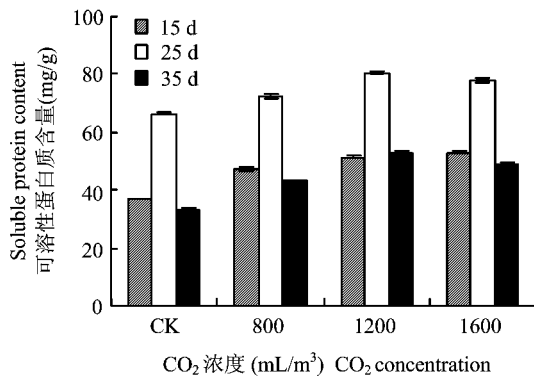


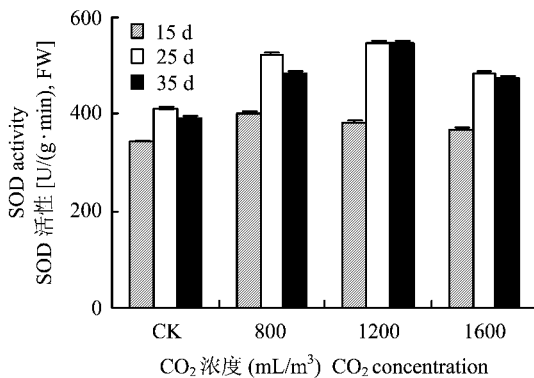
图 1 不同 CO₂ 浓度对可溶性糖含量的影响
Fig. 1 The effects of different CO₂ concentrations on soluble sugar content

豆叶片可溶性糖含量均随 CO₂ 浓度的升高而增大;相同 CO₂ 浓度下,叶片的可溶性糖含量则随处理时间的增加而升高。CO₂ 浓度为 1600 mL/m³ 处理 35 d 时可溶性糖含量达 47.63 mg/g,明显高于对照 CK。增施 CO₂ 有助于豇豆叶片可溶性糖含量的增加,且增施 CO₂ 时间越长可溶性糖含量越高。

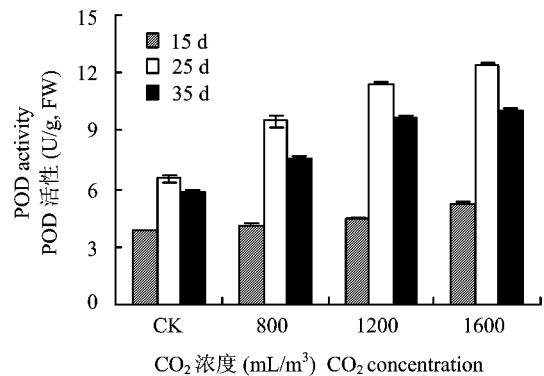
2.2.2 对豇豆叶片可溶性蛋白质含量的影响 图 2 可知,不同浓度 CO₂ 处理 15 d,豇豆叶片中可溶性蛋白质含量随 CO₂ 浓度的增大而增加。处理 25 和 35 d 时,可溶性蛋白质含量依次为 1200 mL/m³ > 1600 mL/m³ > 800 mL/m³ > CK。不同 CO₂ 浓度处理下,豇豆叶片可溶性蛋白质含量较对照 CK 均有不同程度的提高,且最大值均出现在处理 25 d 时,尤其是 1200 mL/m³ CO₂ 浓度下,可溶性蛋白质含量达到 80.03 mg/g,比对照 CK 提高了 20.45%。可见,增施 CO₂ 有利于豇豆叶片可溶性蛋白质积累。

图2 不同 CO₂ 浓度对可溶性蛋白质含量的影响Fig. 2 The effects of different CO₂ concentrations on soluble protein content

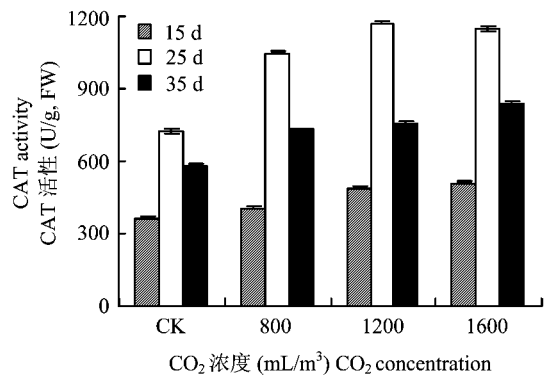
2.2.3 对豇豆叶片 SOD 活性的影响 图3看出,不同 CO₂ 浓度处理水平下,SOD 活性随处理天数的增长而呈现先增后微减的情况,即 SOD 活性大小为 25 > 35 > 15 d,对照 CK 的变化幅度最小。相同处理天数,不同 CO₂ 浓度水平下,SOD 活性变化稍有不同,但均高于对照 CK。处理 25 d 时,以 1200 mL/m³ 浓度下 SOD 活性最大,为 548.92 U/(g·min), FW。增施 CO₂ 可提高豇豆叶片中 SOD 的活性,尤以浓度为 1200 mL/m³ 处理 25 d 时增长效果最明显。

图3 不同 CO₂ 浓度对 SOD 活性的影响Fig. 3 The effects of different CO₂ concentrations on SOD activity

2.2.4 对豇豆叶片 POD 活性的影响 不同 CO₂ 浓度下,随着处理天数的增长 POD 活性呈现先升后降的趋势,即 POD 活性依次为 25 > 35 > 15 d; CO₂ 浓度为 1600 mL/m³,处理 25 d 时的 POD 活性比处理 15 d 时增长了 1.42 倍,而处理 35 d 时,POD 活性却比处理 25 d 时下降了 2.39 U/g, FW。在相同处理天数时,POD 活性均随着 CO₂ 浓度水平的增大而升高(图4)。

图4 不同 CO₂ 浓度对 POD 活性的影响Fig. 4 The effects of different CO₂ concentrations on POD activity

2.2.5 对豇豆叶片 CAT 活性的影响 不同 CO₂ 浓度处理下,豇豆叶片的 CAT 活性差异较大(图5)。不同 CO₂ 浓度在处理 15 和 25 d 时,CAT 活性依次为 1600 mL/m³ ≈ 1200 mL/m³ > 800 mL/m³ > CK; 而处理 35 d 时,CAT 活性大小为 1600 mL/m³ > 1200 mL/m³ ≈ 800 mL/m³ > CK。不同 CO₂ 浓度的不同处理天数时,CAT 活性依次为 25 > 35 > 15 d,其中 15 到 25 d 的增幅明显。

图5 不同 CO₂ 浓度对 CAT 活性的影响Fig. 5 The effects of different CO₂ concentrations on CAT activity

2.2.6 对豇豆叶片 MDA 含量的影响 不同 CO₂ 浓度对豇豆叶片 MDA 含量变化存在影响。图6可知,不同 CO₂ 浓度在处理 25 d 时,1200 mL/m³ 下豇豆叶片的 MDA 含量最低,仅为 23.89 μmol/g, FW, 比对照 CK 低了 9.7 μmol/g, FW, 而 800 mL/m³ 浓度与对照 CK 差别不大。不同 CO₂ 浓度处理下,以处理 25 d 时 MDA 含量最低,与处理 15 d 有较大差别,与处理 35 d 相差不大。

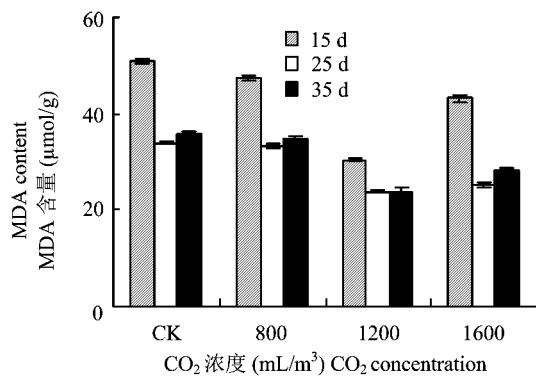


图6 不同CO₂浓度对MDA含量的影响

Fig. 6 The effects of different CO₂ concentrations on MDA content

3 讨论

试验结果表明,高浓度CO₂能显著提高豇豆叶片光合色素含量,尤其以25 d处理增加效果最佳。Pn在不同CO₂浓度下明显高于对照CK,其中以处理25 d提高效果最明显,说明高浓度CO₂可有效提高植物的Pn,这与许多前人研究的结果一致^[11-13]。高CO₂浓度下,豇豆叶片的光合色素含量提高,满足了对CO₂进行充分同化的需求。短期内,增加环境中CO₂浓度,可以增加Rubisco羧化活性,抑制光呼吸,提高光合速率^[14];但时间久了,光合作用的这种效果便逐渐消失甚至下降。有研究表明,这可能是光合速率提高超过了光合产物合成、运输和利用能力,形成光合产物的反馈抑制所致^[15]。本试验结果也表明,并非CO₂施肥时间越长效果越好,其中,以施肥25 d时光合效果最佳。Tr的变化规律与Pn的变化规律相反,这与Mortensen^[16]的提高CO₂浓度可降低作物20%~40%的蒸腾,提高30%水分利用率的试验结果相一致。张彤等^[17]在研究中指出,CO₂浓度升高和适度光照,会引起气孔关闭,蒸腾速率降低。

本试验表明,高浓度CO₂可提高豇豆叶片可溶性糖和可溶性蛋白质的含量。CO₂施肥后,光合速率提高,光合产物积累,碳水化合物含量改变,生理生化过程受到影响。林丰平等^[18]认为,高浓度CO₂引起蔗糖等碳水化合物合成量的增加,影响光合产物的运输和分配。CO₂与营养液中养分的交互作用可能是引起豇豆叶片苗期可溶性蛋白质含量提高的主要原因。

SOD、POD、CAT活性在不同的CO₂浓度下变化

较大,以不同CO₂浓度处理25 d时酶活性最高。高浓度CO₂导致豇豆正常调节功能的紊乱而引起伤害可能是处理25 d后保护酶活性表现出降低趋势的主要原因。CO₂施肥在降低豇豆MDA含量方面起着积极的作用,且以施肥25 d时降低效果最优,说明高CO₂浓度使得自由基的产生和清除的平衡体系得以巩固,自由基减少,减缓膜脂过氧化。究其原因,可能在于CO₂施肥增进碳同化,使植物体内糖分积累,叶片可溶性糖含量增高,从而在一定程度上提高了作物抗逆能力。

综上所述,本试验条件下,豇豆苗期CO₂施肥以1200 mL/m³,施肥时间25 d时效果最佳。但是,植物在不同发育阶段对CO₂的需求量和敏感性是不同的,而且各种环境因子(光、温、水、土等)又制约或促进着CO₂的吸收。因此,设施大棚豇豆生产的最优施肥方案尚待进一步研究完善。

参考文献:

- [1] 魏珉,邢禹贤,于贤昌,等. CO₂施肥对黄瓜幼苗抗冷性及后期生育的作用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2001,32(2): 157-161.
Wei M, Xing Y X, Yu X C et al. Effects of CO₂ enrichment at seedling stage of cucumber on chilling tolerance of seedlings and its growth and development at later stage [J]. J. Shandong Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2001, 32(2): 157-161.
- [2] 邹春蕾,吴凤芝,刘守伟. 高浓度CO₂对番茄生长发育及光合作用的影响[J]. 中国蔬菜,2008,(11): 14-17.
Zou C L, Wu F Z, Liu S W. Effects of elevated CO₂ concentration on growth, development and photosynthesis of tomato [J]. China Veget., 2008, (11): 14-17.
- [3] 王冬良,王洪礼,吕国华. 节能日光温室CO₂浓度对西葫芦生理代谢的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2005,5(1): 11-14.
Wang D L, Wang H L, Lü G H. Studies on pumpkin's physiology under CO₂ concentrations in energy-saving sunlight greenhouse [J]. J. Shihezi Univ. (Nat. Sci.), 2005, 5(1): 11-14.
- [4] 崔庆法,王静. 补施CO₂对日光温室黄瓜生长的影响[J]. 西北植物学报,2003,23(1): 39-43.
Cui Q F, Wang J. Effects of applied CO₂ in the solar greenhouse on characters of *Cucumis sativus*'s growth [J]. Acta Bot. Bor.-Occid. Sin, 2003, 23 (1): 39-43.
- [5] 陈福明,陈顺伟. 混合液法测定叶绿素的总量的研究[J]. 林业科学通讯,1984,(2): 4-8.
Chen F M, Chen S W. The study of mixture method for determination of chlorophyll content [J]. Chin. Bull. For. Sci., 1984, (2): 4-8.
- [6] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社,2000. 195-196.
Li H S. Experiment principle and technology of physiological and

- biochemical in plant [M]. Beijing: High Education Press, 2000. 195-196.
- [7] 王晶英,敖红,张杰,等. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨:东北农业大学出版社,2003. 22-25,108-111.
Wang J Y, Ao H, Zhang J *et al.* Experiment technology and principle of physiological and biochemical in plant [M]. Haerbing: Northeast Agricultural University Press, 2003. 22-25, 108-111.
- [8] 华东师范大学生物系. 植物生理学实验指导[M]. 北京:人民教育出版社,1980. 143-144.
Biological Department of East China Normal University. The experiment instruction of plant physiology [M]. Beijing: People Education Press, 1980. 143-144.
- [9] Aebi H. Catalase *in vitro*[J]. Meth. Enzymol., 1984,105: 121-126.
- [10] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社,2002. 124-125.
Chen J X, Wang X F. The experiment instruction of plant physiology [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002. 124-125.
- [11] 蒋高明,林光辉. 生物圈二号内生长在很高二氧化碳浓度下的几种植物光合能力的变化[J]. 科学通报,1997, 42(4): 434-438.
Jiang G M, Lin G H. Photosynthetic capacity changes of several species experienced in high CO₂ concentrations in biosphere 2 [J]. Chin. Sci. Bull., 1997, 42(4): 434-438.
- [12] 王春乙,郭建平,王修兰,等. CO₂ 浓度增加对 C₃、C₄ 作物生理特性影响的实验研究[J]. 作物学报,2000,26(6): 813-817.
Wang C Y, Guo J P, Wang X L *et al.* The experimental study of the effects of CO₂ concentration enrichment on physiological feature of C₃ and C₄ crops [J]. Acta Agron. Sin., 2000, 26(6): 813-817.
- [13] Cure H D, Acock B. Crop responses to carbon dioxide doubling. A literature survey [J]. Agric. For. Meteorol., 1986, 38: 127-145.
- [14] Peet M M, Huber S C, Patterson D T. Acclimation to high CO₂ in monoecious cucumbers [J]. Plant Physiol., 1986, 80: 63-67.
- [15] 张其德,卢从明,匡廷云. 大气 CO₂ 浓度升高对光合作用的影响[J]. 植物学通讯,1992,9(4): 18-23.
Zhang Q D, Lu C M, Kuang T Y. Effects of the rising CO₂ levels on photosynthesis [J]. Chin. Bull. Bot., 1992, 9(4): 18-23.
- [16] Mortensen L M. Review: CO₂ enrichment in greenhouse crop responses [J]. Sci. Hort., 1987, 33: 1-25.
- [17] 张彤,王磊,杨俊兴. CO₂ 倍增对干旱胁迫下大豆光合效应的影响[J]. 河南农业科学,2005,(8): 47-50.
Zhang T, Wang L, Yang J X. Effect of elevated CO₂ concentration on photosynthetic efficiency soybean under drought stress [J]. J. Henan Agric. Sci., 2005, (8): 47-50.
- [18] 林丰平,陈章和,陈兆平,等. 高 CO₂ 浓度下豆科 4 种乔木幼苗的生理生化研究[J]. 植物生态学报,1999,23(3): 220-227.
Lin F P, Chen Z H, Chen Z P *et al.* Physiological and biochemical responses of the seedlings of four legume tree species to high CO₂ concentration [J]. Acta Phytoecol. Sin., 1999, 23(3): 220-227.