

# 设施栽培中 CO<sub>2</sub> 施肥技术的应用

张颖<sup>1</sup>, 王金春<sup>2</sup>, 薛庆林<sup>3</sup>, 马德伟<sup>4</sup>, 冯蕾<sup>5</sup>, 孟静<sup>6</sup>

(1. 河北农业大学 农学院, 河北 保定 071001; 2. 河北农业大学 科教兴农中心, 河北 保定 071001;  
3. 河北农业大学 农村发展学院, 河北 保定 071001; 4. 河北农业大学 生命科学学院, 河北 保定 071001;  
5. 衡水学院 生物系, 河北 衡水 053000; 6. 保定市气象局, 河北 保定 071001)

**摘要:** 本文对国内外设施中 CO<sub>2</sub> 施肥技术的研究结果进行了综述。总结了设施栽培中 CO<sub>2</sub> 浓度的变化规律, 重点介绍 CO<sub>2</sub> 施肥的适宜时期、具体时间、施肥技术, 以及温度、光照、矿质营养等环境因素对 CO<sub>2</sub> 施肥效果的影响。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 施肥; 技术; 环境因素

中图分类号: S161.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2006)增刊-0109-05

## The Application of CO<sub>2</sub> Fertilizer Technology in Equipped Environment

ZHANG Ying<sup>1</sup>, WANG Jin\_chun<sup>2</sup>, XUE Qing\_lin<sup>3</sup>, MA De\_wei<sup>4</sup>,  
FENG Lei<sup>5</sup>, MENG Jing<sup>6</sup>

(1. Agronomy College of Agriculture University of Hebei, Baoding 071001, China;  
2. Center of Prospering Rural Areas by Science& Education, AUH 071001 China;  
3. College of Country Development, AUH 071001 China; 4. College of Biology Science,  
AUH 071001 China; 5. Department of Biology Science, Hengshui University,  
HengShui 053000, China; 6. Baoding Meteorological; Baoding 071001, China)

**Abstract:** This article gives the general description of research results of CO<sub>2</sub> fertilizer technology application in domestic and foreign countries. In the meantime, the changing rule of CO<sub>2</sub> concentration in equipped environment is summarized in this article. Three focal problems are emphasized in the article including the decent time in CO<sub>2</sub> fertilizer, the specific time of CO<sub>2</sub> fertilizer, and CO<sub>2</sub> fertilizer technology. In the course of CO<sub>2</sub> fertilizer, CO<sub>2</sub> fertilizer results are affected by several factors such as temperature, sunlight, mineral fertilizer nutrition and so on.

**Key words:** CO<sub>2</sub> fertilizer; Technology; Environmental factors

1804 年, DeSaussure 对豌豆进行了高浓度 CO<sub>2</sub> 的处理试验; 20 世纪 20 年代, 荷兰、丹麦开始将 CO<sub>2</sub> 施肥技术用于温室黄瓜、蕃茄生产; 20 世纪 60 年代初, 日本、美国等国家, 先后开始了温室蔬菜 CO<sub>2</sub> 施肥实用技术的研究; 20 世纪 70 年代以来, 国外在设施栽培的 CO<sub>2</sub> 施肥方面达到研究和应用高潮, 挪威有 75%、荷兰有 65% 的温室施用 CO<sub>2</sub>, 其他如丹麦、日本、英国、美国等在温室中施用 CO<sub>2</sub> 也相当普遍。

20 世纪 80 年代以来, 我国以节能式日光温室为代表的温棚农业在各地迅猛发展, 这类主要靠日光增温的温室, 大多用于超时令、反季节的蔬菜栽

培, 在“菜篮子工程”中起到重要作用。随着设施栽培生产的不断发展, 生产中也暴露出了一些问题, 其中突出的就是由于设施栽培条件下, 由于相对封闭的条件所导致的 CO<sub>2</sub> 匮乏, 进而引起作物光合效率降低, 产量不高、品质下降、病虫害易发生等一系列问题, 成为设施栽培中的限制因子, CO<sub>2</sub> 施肥技术成为解决这些问题的有效途径。

### 1 高浓度 CO<sub>2</sub> 对植物光合速率的影响

高浓度 CO<sub>2</sub> 可以增加 RuBP 羧化的底物, 提高 RuBP 羧化酶的活性, 减少 O<sub>2</sub> 对 RuBP 的竞争氧化,

收稿日期: 2006-08-26

基金项目: 河北省科技厅技术研究与发展计划项目(04547001D-8)

作者简介: 张颖(1977-), 女, 河北石家庄人, 在读硕士, 主要从事作物栽培与耕作研究; 王金春为通信作者。

从而增加叶片的光合活性,当  $\text{CO}_2$  浓度从 300  $\mu\text{L/L}$  增加到 900  $\mu\text{L/L}$  时,黄瓜叶片的光合速率几乎呈直线上升<sup>[1]</sup>。大白菜  $\text{CO}_2$  浓度在 350  $\mu\text{L/L}$  和 700  $\mu\text{L/L}$  时,  $\text{CO}_2$  倍增使净光合速率增加 68%, 且光合时间延长, 光补偿点下降<sup>[2]</sup>, 于国华等<sup>[3]</sup> 的试验结果表明黄瓜在增施  $\text{CO}_2$  以后可提高光合速率 50%。

施定基等<sup>[4]</sup> 的试验结果指出, 1 500  $\mu\text{L/L}$   $\text{CO}_2$  使黄瓜带瓜叶和不带瓜叶的叶绿体光化学活性比大气中生长的对照提高 23.2% 和 34.0%; 郁昭<sup>[5]</sup> 报道, 900, 1200, 1500  $\mu\text{L/L}$   $\text{CO}_2$  可使黄瓜叶片光合速率分别比对照提高 14.3%, 15.0%, 15.5%, 光合生产率分别比对照提高 66.0%, 81.5%, 85.7%。

## 2 高 $\text{CO}_2$ 浓度对呼吸作用的影响

作物光呼吸过程始于 RuBP 的加氧反应, 加氧活性的大小又与叶绿体中  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  值有关。 $\text{CO}_2$  施肥使  $\text{CO}_2$  竞争 RuBP 的能力加强, 从而抑制了光呼吸, 王忠等<sup>[6]</sup> 测定黄瓜叶片在不同  $\text{CO}_2$  浓度下断光后  $\text{CO}_2$  的猝发(光呼吸的可靠指标), 表明 890 和 1 250  $\mu\text{L/L}$   $\text{CO}_2$  比 330  $\mu\text{L/L}$  分别降低了 66.7% 和 73.6%。有资料<sup>[7]</sup> 表明, 高  $\text{CO}_2$  下生长的植物  $\text{CO}_2$  补偿点和光呼吸速率降低; 当高  $\text{CO}_2$  下生长的植株返回到对照条件下时, 其氧吸收速率与对照一样。然而, 也有高  $\text{CO}_2$  引起光呼吸途径中一些酶活性降低的报道。

高  $\text{CO}_2$  可以引起糖的积累和生长的加快。因此, 人们有理由预期高  $\text{CO}_2$  会加强暗呼吸, 而且确实有一些这样的研究报道<sup>[8]</sup>。然而, 也有一些研究表明暗呼吸受高  $\text{CO}_2$  的抑制<sup>[9, 10]</sup>。可能有多种原因引起这种相互矛盾的结果。第一, 呼吸速率的表示方法不同。有的研究表明, 以单位叶面积表示时, 高  $\text{CO}_2$  下生长的植物呼吸速率高 16%, 而以单位叶片重量表示时则呼吸速率低 14%<sup>[11]</sup>。第二, 与叶片的发育阶段有关。例如, 高  $\text{CO}_2$  下生长的大豆仅其幼叶的呼吸速率比普通空气下生长的叶片高<sup>[8]</sup>。

一般说来, 随着  $\text{CO}_2$  的增加, 虽然呼吸速率略有提高, 但与光合速率的增高相比, 呼吸消耗要比光合积累小得多<sup>[12]</sup>。

## 3 设施环境中 $\text{CO}_2$ 浓度的变化规律

设施环境中  $\text{CO}_2$  浓度因设施的结构、管理方法、栽培的作物、土壤有机质是如情况及季节等因素的不同而有所差异, 但变化的规律大致相同。夜间作

物的光合作用基本停止, 而土壤中有有机质分解及植物呼吸释放  $\text{CO}_2$ , 使设施内  $\text{CO}_2$  浓度升高, 一般在早晨日出前设施内  $\text{CO}_2$  浓度达最高值, 随着日出后光照强度及温度的增加, 植物的光合作用增强而大量消耗  $\text{CO}_2$ , 使设施内  $\text{CO}_2$  浓度迅速降低, 一般在 10 30 前后达到最低点, 且远远低于大气  $\text{CO}_2$  浓度的平均水平, 而此时设施内的温度、光照条件都比较适宜, 植物的光合作用应是一天中比较强的,  $\text{CO}_2$  浓度却远远不能满足需要, 成为提高植株光合作用的主要限制因子; 当保护地内温度升到至 30  $^{\circ}\text{C}$  以上时通风换气, 使内外温度和  $\text{CO}_2$  浓度逐渐达到平衡; 当气温降至 25  $^{\circ}\text{C}$  以下时关闭通风, 此时设施内仍有一定的光照, 温度也较适宜, 植株仍能进行光合作用, 从而又引起  $\text{CO}_2$  浓度下降, 但变化幅度较小; 日落后植株光合作用逐渐停止, 土壤微生物活动、植株呼吸作用继续进行, 设施内  $\text{CO}_2$  浓度在夜间又迅速升高<sup>[13]</sup>。

## 4 $\text{CO}_2$ 肥施用时期及时间

温室蔬菜人工增施  $\text{CO}_2$  的适宜始期依蔬菜种类、栽培方式和土壤肥力条件而定。一般作物生育初期施用  $\text{CO}_2$  效果好。蔬菜幼苗期施用  $\text{CO}_2$  可以促进秧苗发育, 使幼苗根系发达, 壮苗率增加, 对果菜类还可提早花芽分化, 对提高早期产量作用很大。从经济效益来讲, 以作物群体进入光合作用盛期,  $\text{CO}_2$  吸收量急剧增加时开始施用为佳, 具体因作物种类、栽培方式、作物长势和环境条件而定。一般叶菜、根菜类在前期施用较好, 果菜类宜在雌花着生、开花或结果初期施用, 而开花坐果前不宜施用, 以免营养生长过旺造成落花落果。林柯等<sup>[14]</sup> 报道, 茄果类蔬菜结果期为  $\text{CO}_2$  最佳施用期, 一般以连续施 30 d 左右为宜, 指出晴天日出揭苫后 1 h 左右是  $\text{CO}_2$  最佳施用时间。吴继忠<sup>[15]</sup> 报道, 黄瓜以幼苗 7~8 叶后增施  $\text{CO}_2$  为好, 秧苗过小, 吸收量少, 施用  $\text{CO}_2$  效果不明显, 且施用  $\text{CO}_2$  须每日进行, 不宜间断, 以满足黄瓜的适应能力, 减少病害发生, 阴雨天不施。

汪永钦<sup>[16]</sup> 认为, 日出后 1~1.5 h 至放风换气这段时间是温室内  $\text{CO}_2$  最匮乏的时段, 人工增施  $\text{CO}_2$  气肥宜在这段时间进行。张建新等<sup>[17]</sup> 研究结果表明, 在深秋和初冬季节(11月下旬~12月中旬), 蔬菜光合强度不太大, 上午温室内  $\text{CO}_2$  浓度较高不需要施放, 宜在下午收风后施放; 在隆冬季节(12月下旬~2月上旬), 温室不放风或放风时间很短, 宜在

11:00 左右施放, 因为此时温室内 CO<sub>2</sub> 浓度已降得很低(200 μmol/mol 以下), 蔬菜处于极度 CO<sub>2</sub> 饥饿状态, 此时施放可收到很好的效果; 在晚冬和初春季(2月中旬~3月下旬), 放风时间较长, 宜将一次施放改为2次施放, 放风前1h施放一次, 收风后再施放一次, 因为此阶段蔬菜正处于旺盛生长期, 且土壤释放的 CO<sub>2</sub> 已比较少, 放风前1h温室内 CO<sub>2</sub> 浓度已降得很低, 收风后由于光合作用仍然比较强, CO<sub>2</sub> 浓度仍会降得比较低。

夏季外界气温升高, 温室需要通风降温, 此时高浓度的 CO<sub>2</sub> 施肥似乎不再需要, 但通风不能避免 CO<sub>2</sub> 亏缺。据测定, 夏至前后全部通风的黄瓜温室内 CO<sub>2</sub> 亏缺仍达 5%~10%<sup>[18]</sup>。在 340 μL/L 以下, 光合速率随 CO<sub>2</sub> 浓度的降低呈直线下降; 另一方面, 当夏季通风维持设施内 CO<sub>2</sub> 浓度近于或略高于大气水平时, 蔬菜产量显著提高, CO<sub>2</sub> 浓度与最终产量呈线性相关<sup>[19]</sup>。因此, 夏季 CO<sub>2</sub> 施肥依然必要。夏季 CO<sub>2</sub> 施肥的浓度不宜过高, 维持近于大气水平的 CO<sub>2</sub> 可减少温室内外 CO<sub>2</sub> 浓度落差, 降低渗漏损失, 保证最大的吸收利用效率, 获得 5%~10% 的增产效果<sup>[19, 20]</sup>。

## 5 CO<sub>2</sub> 肥施用方法

### 5.1 化学反应法生产的 CO<sub>2</sub> 气肥及其使用方法

5.1.1 硫酸加碳酸氢铵产生 CO<sub>2</sub> 在温室内准备若干个非金属容器(可放在地上, 也可悬于空中, 须均匀分布在温室中), 将浓硫酸与水按 1:3 的比例混合(切记应将浓硫酸缓缓倒入水中并搅拌均匀)后平均倒入各个容器内, 然后加入适量碳酸氢铵(可先将碳酸氢铵装入塑料袋中放前扎 8~10 个小孔)。这样随着化学反应的进行, 可缓慢释放出 CO<sub>2</sub>。近年来, 许多厂家相继生产出了多种多样的具有调节设备的反应装置。其优点是成本低、技术简单、便于掌握, 而且反应后生成的残液可转变为碳酸铵继续作为肥料使用<sup>[21]</sup>。

5.1.2 石灰石加盐酸产生 CO<sub>2</sub> 在温室内准备若干个容器, 将石灰石砸成 3 cm 见方的碎块平均放入各个容器内, 盐酸和水按 1:1 的比例混合后倒入盛石灰石的容器内。随着化学反应的进行, CO<sub>2</sub> 会不断释放出来。注意稀释盐酸易挥发, 要随配随用。

### 5.2 燃烧法生产的 CO<sub>2</sub> 及其使用方法

沼气、天然气、液化石油气、无烟煤、煤油等碳氢化合物燃烧后会放出 CO<sub>2</sub>, 据此国内外生产出了许

多 CO<sub>2</sub> 发生器具。这些器具靠燃烧无烟煤等产生 CO<sub>2</sub>, 烟气通过气泵加压经过氧化铁和活性炭滤出有害气体后再施放到温室中, 燃烧法生产 CO<sub>2</sub> 气肥, 虽经过滤但仍会放出一氧化碳和硫化氢等有害气体。

### 5.3 瓶装液态 CO<sub>2</sub> 及其使用方法

瓶装液态 CO<sub>2</sub> 是化肥厂、酒精厂等企业的工业副产品, 汪永钦<sup>[16]</sup> 等认为, 它是最为理想的农用 CO<sub>2</sub> 气源, 它资源丰富、成本低廉、浓度容易控制、方便安全, 具有其他 CO<sub>2</sub> 气源所不具备的优点。在距温室顶 30 cm 处自东向西固定一根直径 2 cm 的塑料管, 一头与钢瓶放气口相接, 一头封闭, 在塑料管上每隔一定距离(约 1 m 左右)打一直径 2 mm 的小孔, 放气时将钢瓶开关打开, CO<sub>2</sub> 气体便会通过小孔均匀释放于温室中。

### 5.4 其他种类 CO<sub>2</sub> 气肥及其使用方法

5.4.1 增施腐熟的有机肥 增施有机肥是比较经济而又现实的补充 CO<sub>2</sub> 的方法。有机肥施入土壤后不断分解的同时能释放出大量 CO<sub>2</sub>。有资料报道, 一吨农家肥分解后能放出 1.5 m<sup>3</sup> 的 CO<sub>2</sub>。而纯圈粪发酵时产生的 CO<sub>2</sub> 比空气中的 CO<sub>2</sub> 高出 100 倍。在温室内增施有机肥, 提高土壤腐植质的含量, 促进蔬菜根系的呼吸作用和微生物的分解活动, 从而增加 CO<sub>2</sub> 的释放量。何启伟等<sup>[22]</sup> 报道, 黄瓜结果期定期冲施鸡粪可显著提高温室 CO<sub>2</sub> 浓度, 冲施鸡粪温室内 8:00, 10:00 和 12:00 的 CO<sub>2</sub> 浓度分别为 1200~1800, 580~1200, 230~350 μL/L, 而对照温室分别为 0~700, 240~320, 180~230 μL/L。吴翠兰等<sup>[23]</sup> 的试验结果表明, 在施足有机肥和秸秆堆肥并进行沟内铺草的情况下, 可维持甜瓜生育期温室 CO<sub>2</sub> 浓度高水平。由此可见, 增施有机肥可以延迟或避免通风前亏缺, 但此法有利于改良土壤, 成本低廉, 来源方便, 不足之处是产气缓慢, 产气量有限。

5.4.2 固体 CO<sub>2</sub> 颗粒气肥 用固体 CO<sub>2</sub> 颗粒气肥, 埋在土中能缓慢向棚内释放 CO<sub>2</sub>。如利用秸秆、米糠、油饼和动物粪便等为主要原料, 经酶解和微生物生化处理后生产出的缓释颗粒剂产品和固体颗粒状的双微 CO<sub>2</sub> 生物气肥, 这种缓慢释放 CO<sub>2</sub> 的产品具有操作方法简便易行的特点。

另外目前在我国市场上出售的 CO<sub>2</sub> 颗粒肥, 还有用碳酸钙和硫酸铵为主要原料制成一般每 0.067 hm<sup>2</sup> 施 40~50 kg, 一次施用可连续 40~50 d 释放 CO<sub>2</sub>, 使用方便安全, 不足之处是成本高, 产气少。

5.4.3 施放固体  $\text{CO}_2$  固体  $\text{CO}_2$  纯度高, 释放大, 使用方便, 但成本过高, 还有降温效应, 目前难以大面积推广。

5.4.4 发展养殖业提供  $\text{CO}_2$  在“四位一体”日光温室内, 利用养畜(猪)、禽的热量和粪便入沼气池形成沼气。沼气燃烧可提供能源, 同时产生的  $\text{CO}_2$  可供作物进行光合作用; 而植物光合作用过程中放出的氧气可供动物呼吸。沼液、沼渣也是蔬菜种植中的上好肥料, 同时为设施内的作物和养殖的动物创造了良好的生态环境, 一举多得。

## 6 影响 $\text{CO}_2$ 施肥效果的因素

虽然棚室中增施  $\text{CO}_2$  能提高作物的光合速率, 但如果没有光照、温度、水分、肥料等条件的配合, 也难以达到理想的效果。

### 6.1 光照

研究表明, 温室作物在正常大气  $\text{CO}_2$  浓度下的光能转换效率为  $5 \sim 8 \mu\text{g}/\text{J}$ , 光能利用率为  $6\% \sim 10\%$ , 在  $1\ 200 \mu\text{L}/\text{L}$   $\text{CO}_2$  浓度的光能转换效率  $7 \sim 10 \mu\text{g} \text{ CO}_2/\text{J}$ , 光能利用率  $12\% \sim 13\%$ <sup>[24]</sup>。Cammi<sup>[25]</sup> 研究表明, 温室番茄在遮荫 50% 条件下, 与对照 ( $300 \sim 330 \text{ g}/\text{m}^3$ ) 相比,  $\text{CO}_2$  施肥 ( $1400 \sim 1500 \text{ g}/\text{m}^3$ ) 植株的叶片光合速率、地上部干重和前 7 穗果产量分别增加 62.71%, 69.36%, 78.13%; 不遮荫、 $\text{CO}_2$  施肥又比遮荫 50%  $\text{CO}_2$  条件下的  $\text{CO}_2$  施肥分别增加 58.33%, 45.72%, 19.30%。

### 6.2 温度

当光强为非限制因子时, 增加  $\text{CO}_2$  浓度提高光合作用的程度与温度有关, 高  $\text{CO}_2$  浓度下的光合适温升高。蔬菜  $\text{CO}_2$  施肥效果与生长期平均气温有关, 在较高气温下施肥才能增产<sup>[26]</sup>, 并且依据光强大小进行变温管理的施肥效果优于恒温管理<sup>[27]</sup>; 温度不仅影响光合速率, 而且制约光合产物的分配利用, 低  $\text{CO}_2$  环境下的生长适温不适于高  $\text{CO}_2$  环境<sup>[28]</sup>。所以在  $\text{CO}_2$  施肥的同时一定要考虑温度的因素, 确定  $\text{CO}_2$  施肥浓度, 使其达到最好的效果。

### 6.3 水分

空气湿度影响蒸腾作用, 进而影响矿质吸收。在低营养供给水平下, 若  $\text{CO}_2$  施肥的同时空气湿度过高会大幅度降低蒸腾速率。导致作物营养匮乏生长不良, 丧失  $\text{CO}_2$  施肥效果。Sriharan 等<sup>[29]</sup> 研究证明,  $\text{CO}_2$  施肥虽可在一定程度上弥补由根系干旱造成的对球茎甘蓝生长的负效应, 但只有在满足其正

常生理水分需求的条件下, 施肥才能获得理想增产效果, 并明显降低产品中  $\text{NO}_3^-$  含量。

### 6.4 矿质营养

$\text{CO}_2$  施肥促进蔬菜生长发育, 增加矿质营养吸收。 $\text{CO}_2$  施肥中, 适当提高肥料水平对作物生物量的积累和产量增长有很大促进作用, 生长于  $800 \mu\text{L}/\text{L}$  环境中的番茄 N, K 吸收量分别比对照 ( $330 \mu\text{L}/\text{L}$ ) 增加 58% 和 45%<sup>[30]</sup>; 盆栽蚕豆在 N, P, K 营养匮乏时  $\text{CO}_2$  施肥的增产作用丧失<sup>[31]</sup>。因此,  $\text{CO}_2$  施肥的同时必须增加矿质营养供给, 尤其在高温环境中。另外, 从  $\text{CO}_2$  施肥后, 叶绿素含量下降<sup>[8, 11, 17]</sup> 结合增加氮肥用量可能会更好地发挥增产作用。试验证明, 提高  $\text{CO}_2$  浓度和增施氮肥均有利于改善大豆叶片的光合作用, 并且增施氮肥可以增强  $\text{CO}_2$  施肥对光合功能的改善, 原因在于氮是光合碳循环酶系和电子传递体的重要组成成分<sup>[32]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 王修兰, 徐师华, 李佑祥. 大白菜对  $\text{CO}_2$  浓度倍增的生理生态反应[J]. 园艺学报, 1994, 21 (3): 245-250.
- [2] 卢育华, 申玉梅, 陈利平. 黄瓜单个叶片光合特性研究[J]. 园艺学报, 1994, (1): 54-58.
- [3] 于国华, 宫本堂. 大棚黄瓜增施  $\text{CO}_2$  对光和速率的影响[J]. 莱阳农学院学报, 1996, 13(1): 5-10.
- [4] 施定基, 马桂芝, 李桐柱, 等. 增施  $\text{CO}_2$  生理效应的初步研究[J]. 植物生理学通讯, 1983, (3): 30-32.
- [5] 郁昭. 大棚黄瓜  $\text{CO}_2$  施肥的研究[J]. 土壤肥料, 1988, (5): 47-48.
- [6] 王忠, 蔡恒, 高煜珠, 等.  $\text{CO}_2$  加富对黄瓜的增产效应及其原因分析[J]. 江苏农学院学报, 1993, (2): 37-44.
- [7] Imai K, Murata Y. Effect of carbon dioxide concentration on growth and dry matter production of crop plants. V. Analysis of after effect of carbon dioxide treatment on apparent photosynthesis[J]. Jay J Crop Sci, 1978, 47: 587.
- [8] Hrubec T C, Robinson J M, Donaldson R P. Effects of  $\text{CO}_2$  enrichment and carbohydrate content on the dark respiration soybeans[J]. Plant Physiol, 1985, 79: 684.
- [9] Bunce J A. Short and long-term inhibition of respiratory carbon dioxide efflux by elevated carbon dioxide[J]. Ann Bot, 1990, 65: 637.
- [10] Idso S B, Kimball B A. Effects of atmospheric  $\text{CO}_2$  enrichment on photosynthesis, respiration, and growth of sour orange trees[J]. Plant Physiol, 1992, 99: 341.
- [11] 许大全. 光合作用及有关过程对长期高  $\text{CO}_2$  浓度的响应[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(2): 81-87.

- [ 12] Vu C V, Allen L H J, Bowes G. Leaf ultrastructure, carbohydrates and protein of soybeans grown under CO<sub>2</sub> enrichment[ J]. *Environ Exp Bot*, 1989, 29: 141.
- [ 13] 李晓东, 于 燕. 二氧化碳肥料在蔬菜保护地中应用研究[ J]. *北方园艺*, 1997, (4): 1– 5.
- [ 14] 林 柯, 孔吉萍. 日光温室二氧化碳施肥技术[ J]. *西北园艺*, 1997, (1): 34– 35.
- [ 15] 吴继忠. 蔬菜温室内增施二氧化碳增产效果显著[ J]. *中国农业气象*, 1997, 18(1): 52, 49.
- [ 16] 汪永钦. 日光温室蔬菜栽培中人工增施 CO<sub>2</sub> 技术[ J]. *应用气象学报*, 1997, 4.
- [ 17] 张建新. 日光温室 CO<sub>2</sub> 施肥技术研究[ J]. *中国农业气象*, 2000, 3.
- [ 18] Hand D W. Crop responses to winter and summer CO<sub>2</sub> enrichment [ J]. *Act. Hort.*, 1984, 162: 45– 63.
- [ 19] Slack G, Hand D W. The effect of winter and summer CO<sub>2</sub> enrichment on the growth and fruit yield of glasshouse cucumber [ J]. *J. Hort. Sci.*, 1985, 60(4): 507– 516.
- [ 20] Slack G, Fenlon J S, Hand D W. The effects of summer CO<sub>2</sub> enrichment and ventilation temperature on the yield, quality and value of glasshouse tomatoes[ J]. *J Hort Sci*, 1988, 63(1): 119– 129.
- [ 21] 张建新, 赵锦霞, 李 芬, 等. 温室蔬菜人工增施 CO<sub>2</sub> 气肥技术综述[ J]. *内蒙古气象*, 2001, 28– 31.
- [ 22] 何启伟. 日光温室黄瓜高产栽培技术与光合特性的初步研究[ J]. *中国蔬菜*, 2000, (5): 5– 9.
- [ 23] 吴翠兰, 孙述俊. 甜瓜不同生育期日光温室 CO<sub>2</sub> 浓度的变化[ J]. *中国蔬菜*, 2000, (6): 14– 17.
- [ 24] Willits D H, Peet M M. Predicting yield responses to different greenhouse CO<sub>2</sub> enrichment schemes: cucumbers and tomatoes (I) [ J]. *Agric and Forest Meteorology*, 1989, 44: 275– 293.
- [ 25] Carmi A. Effects of shading and CO<sub>2</sub> enrichment on photosynthesis and yield of winter grown tomatoes in subtropical regions[ J]. *Photosynthetica*, 1993, 28(3): 455– 463.
- [ 26] Idso S B, Kimball B A, Anderson H G, *et al.* Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on plant growth: The interactive role of air temperature [ J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1987, 20: 1– 10.
- [ 27] Hand D W, Soffe R W. Light– modulated temperature control and the response of greenhouse tomatoes to different temperature control and the response of greenhouse tomatoes to different CO<sub>2</sub> regimes[ J]. *Hort Sci*, 1971, 46: 381– 396.
- [ 28] Acock B, Acock M C, Pasternak D. Interactions of CO<sub>2</sub>, enrichment and temperature on carbohydrate production and accumulation in muskmelon leaves[ J]. *J Amer Soc Hort Sci*, 1990, 115(4): 525– 529.
- [ 29] Sritharan R, Lenz F. The effect of CO<sub>2</sub> concentration and water supply on photosynthesis, dry matter production and nitrate concentrations of kohlrabi[ J]. *Act Hort*, 1990, 268: 43– 54.
- [ 30] Yelle S, Gosselin A, Trudel M L. Effect of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and root — zone temperature on growth, mineral nutrition and nitrate reductase activity of greenhouse tomato(7) [ J]. *Amer Soc Hort Sci*, 1987, 112(6): 1036– 1040.
- [ 31] Wolf J. Effects of nutrient (N, P, K) supply of faba bean response to elevated atmospheric carbon dioxide[ J]. *Netherlands J Agric Sci*, 1996, 44(3): 163– 178.
- [ 32] 张其德, 卢从明, 张 群, 等. 不同氮素水平下 CO<sub>2</sub> 倍增对大豆叶片荧光诱导动力学参数的影响[ J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(1): 24– 30.