

文章编号: 100226819(2001)0320010205

## 几种主要 CO<sub>2</sub> 施肥肥源性能的比较与评价

魏 珉<sup>1</sup>, 王秀峰<sup>1</sup>, 邢禹贤<sup>1</sup>, 张衍鹏<sup>1</sup>, 王纪银<sup>2</sup>

(1. 山东农业大学园艺学院, 泰安 271018; 2 山东省肥城市农业局, 肥城 271000)

**摘 要:** 在空闲拱棚和黄瓜日光温室内, 分别研究了化学反应法(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>)、煤球燃烧法和颗粒 CO<sub>2</sub> 气肥 3 种肥源的性能, 并与液体 CO<sub>2</sub> 进行成本比较, 结果表明: 化学反应法产气迅速, 设备折旧成本较低; 煤球燃烧法产气速度中等, 原料成本最低; 颗粒 CO<sub>2</sub> 气肥产气速度较慢且不易调控, 原料成本最高。考虑化学反应产物的再利用因素, 化学反应法、煤球燃烧法和液体 CO<sub>2</sub> 3 种肥源总成本接近, 但从生态、节能、成本和效果等方面综合评价, 煤球燃烧法原料丰富、成本低廉, 较符合我国目前的设施、经济、资源和技术条件。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 肥源; 化学反应法; 煤球燃烧法; CO<sub>2</sub> 颗粒气肥; 液体 CO<sub>2</sub>

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup> **文献标识码:** A

国内外学者在肯定 CO<sub>2</sub> 施肥增产效果的同时, 一致认为解决 CO<sub>2</sub> 来源问题是关键。发达国家设施栽培发展较早, CO<sub>2</sub> 施肥技术相对成熟和完善, 经过多年探索均确定了各自条件下的肥源类型, 如荷兰 98% 加温温室以天然气为燃料, 采用中央锅炉燃气作肥源<sup>[1,2]</sup>; 日本则主要利用以煤油为燃料的 CO<sub>2</sub> 发生器<sup>[3]</sup>。我国目前生产中 CO<sub>2</sub> 施肥方法有多种, 但对其性能缺乏综合评价。本试验对常见肥源进行比较研究, 以期为合理选择肥源和进行有目的改进提供依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 肥源类型及工作原理

化学反应法采用铸友牌平衡式 BZ72<sup>o</sup> 型 CO<sub>2</sub> 气肥发生器(山东淄博高新技术开发区铸友新技术发展公司生产), 硫酸和碳铵反应产生 CO<sub>2</sub>, 经水吸收过滤输出纯净气体; 燃料燃烧法采用长缨牌福气号气肥机(北京长缨机电设备厂制造), 将蜂窝煤炉的燃气由烟囱吸入压缩机内, 在高速旋转叶轮作用下与药液反应, 去除其中有害成分后输出纯净 CO<sub>2</sub>; CO<sub>2</sub> 颗粒气肥从山东商河省农科院原子能所高新技术实验厂购进, 该产品以碳酸钙为原料, 与无机酸为载体, 工艺调理剂按科学配比组合加工而成, 施入土壤后在适宜条件下缓慢释放 CO<sub>2</sub>; 钢瓶液体 CO<sub>2</sub> 为化工副产品, 纯度 99.9%, 购自泰安市氧气厂。

#### 1.2 试验方法

##### 1.2.1 空棚测定

###### 1) 化学反应法和煤球燃烧法

2000 年 4 月 12~14 日在山东农业大学教学基地拱圆大棚内测定。大棚高 3 m, 跨度 8 m, 长度 50 m, 其中施肥区长 30 m, 对照区长 20 m, 中间用塑料薄膜隔离。导气管长 30 m, 安装在距地面 2.2 m、与棚两侧等距处。施肥器安装在棚体一端, 由其向另一端沿导气管每隔 5 m 作一标记, 每处标记设 3 个测试点(距地面 1.2 m, 距棚中轴面 0.15、3 m), 共 21 个测试点。化学反应法导气管孔距 1.5 m, 煤球燃烧法导气管孔距 2.0 m。开始施肥后化学反应法每 5 min 测定一次, 煤球燃烧法每 15 min 测定一次, 每次测定 21 个点的 CO<sub>2</sub> 浓度, 重复 2 次。对照区同时测定。每种肥源重复试验 3 次。

###### 2) CO<sub>2</sub> 颗粒气肥

2000 年 4~6 月在山东农业大学校本部进行。同时扣置两个小拱棚, 高度 0.6 m, 宽度 0.9 m, 长度 1.5 m。一棚于 4 月 11 日按产品说明施入 0.5 kg 颗粒气肥, 覆土厚度 1 cm; 另一棚作对照。此后每隔 3~4 d 测定一次, 每次测定 8:00~9:00, 10:00~11:00, 13:00~14:00, 15:00~16:00, 17:00~18:00 和 18:00~翌日 8:00 CO<sub>2</sub> 释放量。试验期间保持土壤湿润疏松。

##### 1.2.2 黄瓜群体测定

###### 1) 化学反应法和煤球燃烧法

2000 年 1~2 月在肥城农业高新技术示范区日光温室内配合 CO<sub>2</sub> 施肥生产试验测定。日光温室长

收稿日期: 2001-02-20

魏 珉, 博士, 副教授, 山东泰安市岱宗大街 61 号 山东农业大学园艺学院, 271018

95 m, 跨度 8.5 m, 脊高 3.6 m, 用塑料薄膜分隔为 3 部分: 对照区长 18 m; 化学反应法施肥区长 45 m, 施肥器安装在小区中央向两端延伸; 煤球燃烧法施肥区长 32 m, 施肥器安装在小区一端。导气管安装在距地面 2 m、距后墙 4 m 处, 东西延伸, 孔距同化学反应法。从施肥器开始, 每 5 m 作一标记, 每处标记设 3 个测试点(高度同黄瓜冠层高度 1.3 m, 距导气管垂直面 0.15、3 m)。黄瓜品种山农 5 号, 结果盛期测定。

2) CO<sub>2</sub> 颗粒气肥

1998 年 12 月~ 1999 年 3 月在泰安市省庄日光温室测定。日光温室长 50 m、跨度 8.0 m、脊高 2.8 m, 施肥区和对照区用塑料薄膜隔离。12 月 13 日黄瓜开始结果后按 40 kg/667m<sup>2</sup> 用量将颗粒气肥撒施于地膜下, 12 月 20 日和 30 日分别测定施肥区和对照区 CO<sub>2</sub> 浓度日变化。定测温室前、中、后不同位置和近地面、1.5 m 高处 CO<sub>2</sub> 浓度。黄瓜品种津春 3 号, 冠层高 1.1 m。

采用 GXH 2305 型红外线 CO<sub>2</sub> 分析仪(北京分析仪器厂)测定, PP systems 红外线 CO<sub>2</sub> 分析仪(英国)辅助测定。

2 结果与分析

2.1 产气量和产气速度

2.1.1 产气量

根据空棚测定结果并计算得出: 1 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> 硫酸(62%)与碳铵反应持续 12~ 16 min, 产生 CO<sub>2</sub> 0.355 m<sup>3</sup>; 一块煤球(重量燃前 0.563 kg, 燃后 0.238 kg)燃烧持续 70~ 90 min, 产生 CO<sub>2</sub> 0.146 m<sup>3</sup>; 1 kg 颗粒气肥施入土壤后 50 d 累计释放 CO<sub>2</sub> 0.257 m<sup>3</sup>。

2.1.2 产气速度

1) 化学反应法

经测试, 0.85 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> 硫酸(62%)持续反应 10~ 15 min, 1.6 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> 硫酸反应 20~ 25 min。图 1 是 0.85 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> 硫酸与碳铵反应时 CO<sub>2</sub> 释放速率的变化。0~ 5 min 反应最剧烈, CO<sub>2</sub> 释放量最多, 平均释放速率 0.036~ 0.042 m<sup>3</sup>/min; 5~ 10 min 反应减弱, 平均释放速率为前者 1/2, 约 0.017~ 0.025 m<sup>3</sup>/min; 10~ 15 min 反应近完成, 只有少量气泡冒出, 平均产气速率 0~ 0.003 m<sup>3</sup>/min。

2) 煤球燃烧法

煤球燃烧时间长短与煤球质量、煤炉种类及燃烧条件有关, 50~ 90 min 不等。煤球燃烧过程中

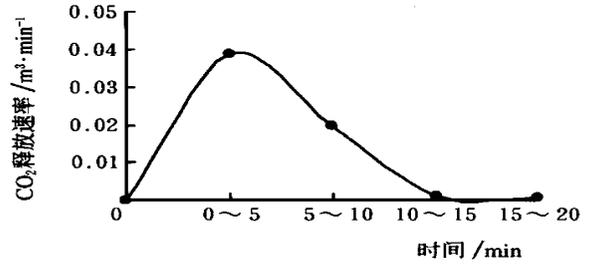


图 1 化学反应法 CO<sub>2</sub> 释放速率变化(基地, 2000204)  
Fig. 1 CO<sub>2</sub> releasing velocity of chemical reaction (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+ NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>) (Base, 2000204)

CO<sub>2</sub> 释放速率呈单峰曲线, 最大产气速率出现于燃烧近一半时。空棚测定表明, 一块煤球持续燃烧 70~ 90 min, 30~ 45 min 时 CO<sub>2</sub> 释放速率最大, 平均 7.02 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/min。在此之前煤球尚未完全引燃, 在此之后燃烧殆尽, 释放速率均明显降低(图 2)。

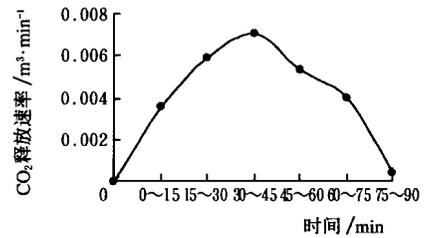


图 2 煤球燃烧法 CO<sub>2</sub> 释放速率变化(基地, 2000204)  
Fig. 2 CO<sub>2</sub> releasing velocity of honeycomb briquet combustion (Base, 2000204)

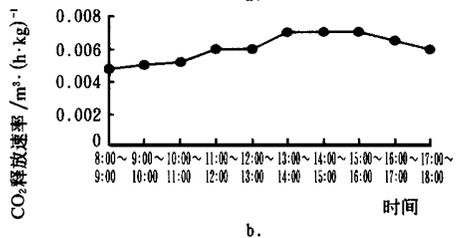
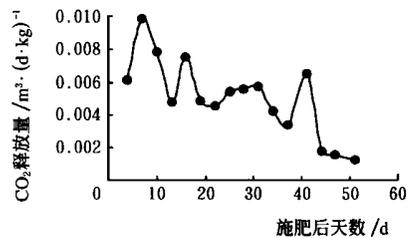


图 3 颗粒气肥 CO<sub>2</sub> 日释放量随施肥时间的变化(a)、释放速率的日变化(b)(校本部, 2000204205)  
Fig. 3 Diurnal changes of total CO<sub>2</sub> daily released(a) and the daily changes of CO<sub>2</sub> released by granular fertilizer (Campus, 2000204205)

### 3) CO<sub>2</sub> 颗粒气肥

颗粒气肥施入土壤后缓慢释放 CO<sub>2</sub>。施肥后 51 d 内 CO<sub>2</sub> 日释放总量的变化见图 3a。施肥后 7 d 左右释放量最大, 约  $9.81 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ö(d} \cdot \text{kg)}$ , 此后逐渐减少。第 28 d 的释放量只为最高值的 57.14%; 第 51 d 释放量仅为最高值的 12.94%。

将每天相同时段 CO<sub>2</sub> 释放速率计算平均值, 得到 CO<sub>2</sub> 释放速率日变化曲线(图 3b)。一日中 CO<sub>2</sub> 释放速率最大值出现在下午 13:00~14:00, 且下午释放速率高于上午。与 CO<sub>2</sub> 日释放总量的变化和天气条件综合分析, 说明颗粒气肥的 CO<sub>2</sub> 释放速率与土壤温度、湿度密切相关。

## 2.2 时空分布特性

### 2.2.1 化学反应法

空棚测定  $0.85 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  硫酸(62%)与碳铵反应时的 CO<sub>2</sub> 时空分布, 结果如图 4a。0~10 min, 距肥源不同距离点 CO<sub>2</sub> 浓度均迅速上升, 近肥源点增加更明显, 因而第 10 min 时, 与肥源距离越远的点, CO<sub>2</sub> 浓度越低。15 min 后近肥源点 CO<sub>2</sub> 浓度开始下降, 远肥源点 CO<sub>2</sub> 浓度继续上升, 这主要由于 CO<sub>2</sub> 浓度梯度所产生的扩散作用。作物群体测定结果表明, 0~5 m 各点 CO<sub>2</sub> 浓度均上升, 以 0 m 和 5 m 处上升幅度最大。第 5~10 min, 虽然反应继续进行, 但各位点浓度都开始减小, 且近肥源点的减小速度大于远肥源点(图 4b)。原因可能是: 5~10 min 时 CO<sub>2</sub> 释放速率减小, 此时黄瓜旺盛的群体光合消耗加上因浓度梯度产生的扩散作用, 导致各点 CO<sub>2</sub> 得

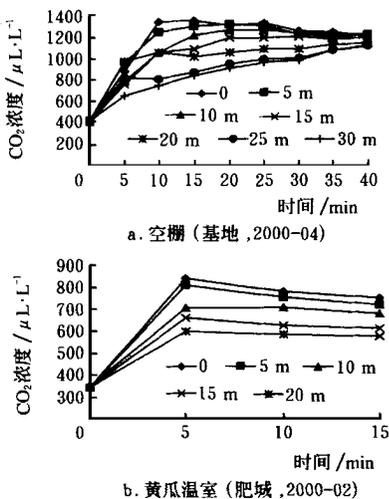


图 4 化学反应法 CO<sub>2</sub> 浓度的时空分布特性

Fig. 4 Space-time changes of CO<sub>2</sub> released by chemical reaction

不偿失, 浓度下降。近肥源点 CO<sub>2</sub> 浓度梯度大, 扩散速度快, 浓度降低也快。

### 2.2.2 煤球燃烧法

煤球燃烧过程中源源不断产生 CO<sub>2</sub>, 空棚内各点 CO<sub>2</sub> 浓度持续上升, 距肥源越近, 上升速度越快, CO<sub>2</sub> 浓度越高(图 5a)。延长施肥时间, 不同位点浓度梯度加大, 但低于化学反应法。

作物群体 CO<sub>2</sub> 分布特点表现为: 相同时间测定, 远距离点 CO<sub>2</sub> 浓度较低; 0~5 m 处 CO<sub>2</sub> 浓度 30 min 以前增加, 然后下降, 10~20 m 处 CO<sub>2</sub> 浓度持续下降(图 5b)。近肥源点 CO<sub>2</sub> 浓度上升说明 CO<sub>2</sub> 释放量大于群体光合消耗和扩散损失, 远肥源点 CO<sub>2</sub> 浓度下降则由于 CO<sub>2</sub> 释放量不足补偿光合消耗和扩散损失所致。后期不同位点 CO<sub>2</sub> 浓度均降低可能与煤球燃烧将尽 CO<sub>2</sub> 释放量减少有关。

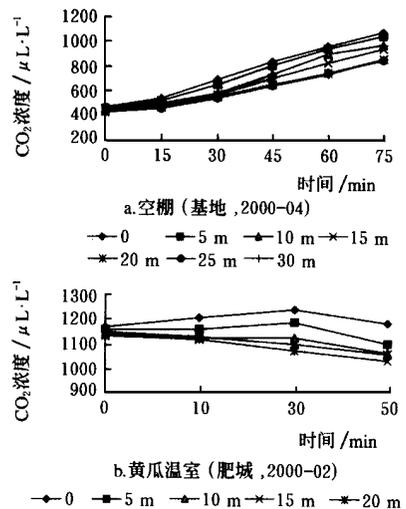


图 5 煤球燃烧法 CO<sub>2</sub> 浓度时空分布特性

Fig. 5 Space-time distribution of CO<sub>2</sub> released by honeycomb briquet combustion

### 2.2.3 CO<sub>2</sub> 颗粒气肥

由图 6 看出, 增施颗粒气肥对日光温室 CO<sub>2</sub> 浓度日变化曲线无显著影响。早晨揭苫之前, 施肥区与对照区 CO<sub>2</sub> 浓度相差最大, 约高出 70~100  $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ , 揭苫后由于群体光合作用, 彼此差异减小。13:30 前后施肥区 CO<sub>2</sub> 浓度仅比对照区高 20~30  $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ , 中午通风时相差更小。这说明颗粒气肥的 CO<sub>2</sub> 释放量和释放速度均较低, 40 kg  $\text{ö667 m}^2$  用量不能改善日光温室 CO<sub>2</sub> 环境。

## 2.3 成本比较

CO<sub>2</sub> 肥源成本至少包括原料成本和设备折旧成本两部分。根据产气量和原料消耗量计算产生 1 m<sup>3</sup>

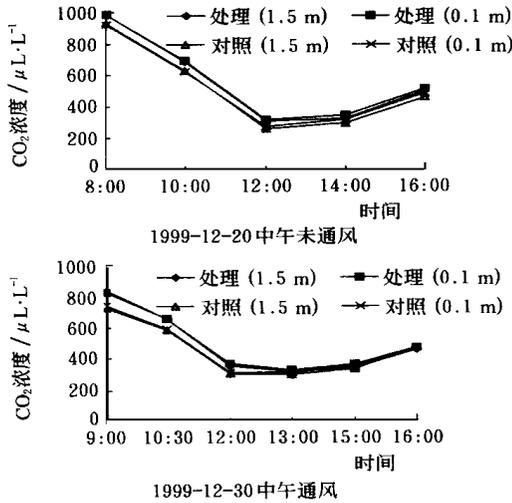


图 6 施用颗粒气肥后日光温室黄瓜群体中 CO<sub>2</sub> 浓度变化(省庄, 施肥日期 1999212213)

Fig 6 CO<sub>2</sub> concentration in cucumber canopy after application of granular CO<sub>2</sub> fertilizer (Shengzhuang, Fertilizing date 1999212213)

CO<sub>2</sub> 的原料成本, 化学反应法为 7.09 元, 煤球燃烧法为 0.89 元, CO<sub>2</sub> 颗粒气肥为 11.67 元, 钢瓶液体 CO<sub>2</sub> 为 3.93 元。

若以 1 年施肥 100 d, 采用煤球燃烧法每天施肥 3 h, 消耗煤球 3 块为标准计算年 CO<sub>2</sub> 消耗量:  $0.146 \times 3 \times 100 = 43.8 \text{ m}^3$ 。

同时假定各种肥源的设备投资和使用年限如下:

化学反应法: 铸友牌 CO<sub>2</sub> 发生器和导气管, 价格 218 元, 使用年限 5 年。

煤球燃烧法: 长缨牌福气号气肥机和导气管, 价格 480 元, 使用年限 5 年。

蜂窝煤炉具和烟囱, 价格 60 元, 使用年限 5 年。

钢瓶液化 CO<sub>2</sub>: 钢瓶, 价格 600 元, 使用年限 10 年。

减压阀和导气管, 价格 200 元, 使用年限 5 年。

由此计算产生 43.8 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> 各种肥源的成本如表 1。由表 1 看出, 煤球燃烧法原料成本最低, 只占化学反应法的 12.56%, CO<sub>2</sub> 颗粒气肥最高, 为化学反应法的 1.65 倍。煤球燃烧法折旧成本最高, 比化学反应法增加 147.71%, 其次是液化 CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 颗粒气肥最低。由于煤球燃烧法的燃气净化需要特殊试剂(10 元/袋, 使用期约 10 d), 同时需要消耗电力, 因此大大增加了运转成本。从年度总支出比较, 煤球燃烧法最低, 依次为液化 CO<sub>2</sub>、化学反应法、

CO<sub>2</sub> 颗粒气肥。煤球燃烧法比化学反应法每年节省支出 28.98%。

表 1 不同 CO<sub>2</sub> 施肥肥源的成本比较

Table 1 Cost of different methods for CO<sub>2</sub> enrichment

肥源类型	原料成本 元·a <sup>-1</sup>	折旧成本 元·a <sup>-1</sup>	其它费用 元·a <sup>-1</sup>	总计 元·a <sup>-1</sup>
化学反应法	310.54	43.60	0	354.14
煤球燃烧法	39.00	108.00	104.50 <sup>3</sup>	251.50
CO <sub>2</sub> 颗粒气肥	511.15	0	0	511.15
钢瓶液体 CO <sub>2</sub>	172.13	100.00	0	272.13

3 包括购买化学试剂和支付电费。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 化学反应法

化学反应法(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>)操作简便, 反应迅速, 产气量和产气速度大, 1×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> 硫酸(62%)与碳铵反应可在 12~16 min 内完成, 生成的 CO<sub>2</sub> 可使 600 m<sup>3</sup> (面积 300 m<sup>2</sup>, 平均高度 2 m) 设施空间浓度升高 500~600 μL/L。经测定, 上午 10:00 前后, 日光温室结果期黄瓜、番茄群体 CO<sub>2</sub> 浓度降低速度约每小时 200~300 μL/L。因此, 一次施肥可满足 2~3 h 的群体 CO<sub>2</sub> 消耗。由于距肥源 15~20 m 范围内 CO<sub>2</sub> 分布较均匀, 所以施肥器最好安装在棚室中部, 向两端延伸。

表 1 对化学反应法原料成本的计算未考虑反应产物(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的再利用。若将其作为肥料折算, 则该肥源的原料成本约 220.31 元/年, 总成本约 263.91 元/年, 与煤球燃烧法和瓶装液体 CO<sub>2</sub> 接近。大面积 CO<sub>2</sub> 施肥时工业硫酸的供求矛盾能否解决是该肥源应用中遇到的突出问题。

#### 3.2 煤球燃烧法

煤球燃烧法取材方便, 成本低廉, 并可在一定程度上实现温室供暖与 CO<sub>2</sub> 施肥的统一。CO<sub>2</sub> 发生速度受煤球质量和燃烧条件限制, 一块煤球通常可持续燃烧 45~90 min, 产生 0.146 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>。若以燃烧 60 min 计算, 产生的 CO<sub>2</sub> 可使 600 m<sup>3</sup> 设施空间浓度上升 240 μL/L, 与群体 CO<sub>2</sub> 降低速度相近。距肥源 20 m 以内 CO<sub>2</sub> 分布较均匀。

由表 1 明显看出, 煤球燃烧法原料成本最低, 但设备折旧成本最高, 一次性投入较大, 燃气处理所需化学试剂价格偏高, 限制了在生产中的应用, 因此如何降低设备和试剂成本是进一步研究重点。

#### 3.3 CO<sub>2</sub> 颗粒气肥

颗粒气肥的最大特点是使用方便, 省时省力。缺

点是可控性差。于国华等<sup>[4]</sup>、吴德芳等<sup>[5]</sup>研究表明, 颗粒气肥施入土壤后可缓慢释放 CO<sub>2</sub>, 并显著提高上午棚室内 CO<sub>2</sub> 浓度, 具有明显增产效果。但在本试验中, 无论群体和空棚测定, 颗粒气肥的 CO<sub>2</sub> 释放速度和释放量均很低, 其原因尚待进一步探讨。由于产气量低, 表 1 中计算的肥料成本可能偏高。此外, 施用颗粒气肥对土壤结构、理化性状和微生物组成有无影响也需研究。

### 3.4 钢瓶液体 CO<sub>2</sub>

液体 CO<sub>2</sub> 纯度高, 使用安全, 全年投入仅比煤球燃烧法高 8~20%, 具有较大推广价值, 尤其在近郊菜区。目前在农村的主要应用障碍在于 CO<sub>2</sub> 来源受限、换气不便。北欧的瑞典、挪威等国家均有专门从事 CO<sub>2</sub> 运销的公司和企业<sup>[6]</sup>。我国近期尚难形成一种产业。

### [参 考 文 献]

- [1] Berkel N Van. CO<sub>2</sub> enrichment in the Netherlands [J]. Act Hort, 1984, 162: 197~ 205
- [2] Kooiman A J. GMEG approval requirements for hot air guns suited for CO<sub>2</sub> enrichment [J]. Act Hort, 1990, 268: 121~ 125
- [3] 邓纯宝. 日本保护地蔬菜栽培技术简介(°)——CO<sub>2</sub> 施肥[J]. 辽宁农业科学, 1979, 2: 38~ 42
- [4] 于国华, 宫本堂, 何忠诚. 大棚黄瓜增施 CO<sub>2</sub> 对光合速率的影响[J]. 莱阳农学院学报, 1996, 13(1): 5~ 10
- [5] 吴德芳, 刘益同, 王志芬等. 大棚蔬菜增施二氧化碳颗粒气肥农艺效应分析[J]. 化肥工业, 1996, 23(6): 30~ 32
- [6] Moe R. CO<sub>2</sub> enrichment in Scandinavia [J]. Act Hort, 1984, 162: 217~ 225

## Comparison and Appraisal of Four Different Methods for CO<sub>2</sub> Enrichment

Wei Min<sup>1</sup>, Wang Xiufeng<sup>1</sup>, Xing Yuxian<sup>1</sup>, Zhang Yanpeng<sup>1</sup>, Wang Jiyin<sup>2</sup>

(1. Horticultural College of Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Feicheng Agricultural Bureau of Shandong Province, Feicheng 271000, China)

**Abstract:** Three methods for CO<sub>2</sub> enrichment—chemical reaction (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>), briquet combustion, granular CO<sub>2</sub> fertilizer were comparatively studied in free tunnels and solar greenhouses for cucumber cultivation, and the yearly total cost of different methods (including pure liquid CO<sub>2</sub>) were compared. Chemical reaction had higher CO<sub>2</sub> releasing velocity and relatively lower equipment depreciation charge; honeycomb briquet combustion produced CO<sub>2</sub> at moderate rate, and the raw material cost was the least; granular CO<sub>2</sub> fertilizer having highest raw material cost released CO<sub>2</sub> slowest. When the reuse of by-product of chemical reaction was concerned, annual cost of chemical reaction was similar with that of briquet combustion and liquid CO<sub>2</sub>. Comprehensively evaluated from viewpoints of ecology, energy saving, cost and effect, briquet combustion was in more accordance with the present situations in China including facility type, economic situation, resource condition and technique level, and so on.

**Key words:** CO<sub>2</sub> sources; chemical reaction; briquet combustion; granular CO<sub>2</sub> fertilizer; liquid CO<sub>2</sub>