

二氧化碳肥料在蔬菜保护地中应用研究

李 晓 东 于 燕

(天津市园艺工程研究所)



第一作者简介: 李晓东, 1991年7月毕业于西北农业大学园艺系蔬菜专业, 同年考取本校本专业硕士研究生, 师从陆帼一教授, 1994年7月获硕士学位, 分配至天津市园艺工程研究所。先后参加过国家自然科学基金课题和天津市市级课题, 发表过《黄瓜霜霉病发生与防治》、《多效农艺营养纸膜对小白菜生育和产量的影响》等多篇论文。

此, CO_2 浓度在补偿点和饱和点之间作物才能进行有效光合作用。一般而言, 多数蔬菜作物 CO_2 补偿点为 $30 \sim 90 (10^{-6})$, 饱和点为 $1000 \sim 2000 (10^{-6})$, 在有效的 CO_2 浓度范围内, 作物光合强度随 CO_2 浓度的升高而增大, 接近 CO_2 饱和点时出现最大值。1975年山东农学院在无籽西瓜上探讨了 CO_2 浓度与光合强度的关系, 结果表明一定范围内, 西瓜的光合强度随 CO_2 浓度的增加而提高, 相关系数为 0.94, 说明两者有明显的相关性。因此, 增加 CO_2 浓度对提高作物光合强度的作用是十分明显的。Gasstra 和 Brun; Cooper 分别于 1963 和 1967 年在茄子和大豆的试验上也得出了相似的结论。在一定的条件下, 作物叶绿体内的 CO_2 浓度与大气中 CO_2 浓度成正比例, 大气中 CO_2 浓度平均约为 $300 (10^{-6})$, 扩散到叶内的 CO_2 量很少, 成为作物增产的限制因子, CO_2 浓度下降, 光合作用必然减弱, 再加上水分供应不足, 作物就会出现常见的“午休”现象, 如果空气中 CO_2 始终保持作物所需的适宜浓度, 那么“午休”现象就会大大减轻甚至不会出现。所以, 有必要进行 CO_2 施肥。

2. 大气中的二氧化碳浓度及其变化: 作物光合作用所需的 CO_2 主要来自大气, 大气 CO_2 浓度由于受气候、生物等诸多因素的影响, 而发生明显的、有一定规律性的日变化和季节性变化, 大气中 CO_2 浓度平均为 $0.03\% (300 (10^{-6}))$, 每天日出前出现最大值, 日出后逐渐下降, 10时 - 14时降至最低点, 15时左右略有回升 (图 1); 一年中近地面二氧化碳浓度以 4 - 6月较低, 而冬季 11月 - 翌年 2月较高。二氧化碳浓度的日变化和季节性变化差异恰与自然界温度和光照强度变化相矛盾, 不利于提高作物的光合作用强度。

3. 保护地 CO_2 浓度及其变化: 保护地 CO_2 的浓度, 因保护地设施结构、管理方法、栽培作物、土壤有机质含量及天气情况等因素的不同而不同, 但变化的规律却大致相同。这是因为目前保护地内的管理以温

一、二氧化碳施肥的基本原理

1. 蔬菜作物对二氧化碳浓度的要求: 光合作用包括许多中间环节, 其总过程可由下列反应式来概括的表达:

$$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow[\text{绿色植物}]{\text{光}} (\text{CH}_2\text{O})_n + \text{O}_2$$

由这个反应式可见 CO_2 是光合作用的重要原料, 是光合作用得以进行的基础之一, CO_2 的多少直接影响着光合产物的生成及氧气的释放, 而氧气对整个生物界的作用是不可替代的, 因此, CO_2 的作用显而易见。各种作物 (包括蔬菜作物) 对 CO_2 的吸收利用都有补偿点和饱和点。一定条件下, 作物对 CO_2 的同化量和呼吸消耗量相等时的大气 CO_2 浓度即为该作物 CO_2 补偿点; 随着 CO_2 浓度的增加, 作物光合强度也增强, 当 CO_2 达到一定浓度后, 即使再增加, 光合强度也维持不变, 此时, 大气中的 CO_2 浓度为该作物的 CO_2 饱和点。在 CO_2 补偿点作物净光合作用等于零, 当空气中的 CO_2 浓度低于 CO_2 补偿点时, 作物同化 CO_2 的速度低于呼吸作用释放 CO_2 的速度, 体内有机物不断减少, 植物不但不会生长发育, 反而会因“饥饿”而死亡。因

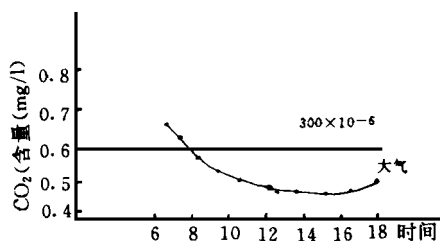


图 1 大气 CO_2 浓度日变化

度为指标,晴天日出后保护地内温度随外界温度升高而升高,当室温(或棚温)达 $25\sim 30^\circ\text{C}$ 时通风换气,下午当温度达 $15\sim 20^\circ\text{C}$ 时关窗收风,这样保护地内 CO_2 浓度就有一定的规律:夜间作物的光合作用基本停止,而土壤有机质分解及植物呼吸释放 CO_2 ,使保护地内 CO_2 浓度升高,一般在早晨日出前保护地内 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 CO_2 ,使保护地内 CO_2 浓度迅速降低,一般在中午前后达到最低点,且远远低于大气 CO_2 浓度的平均水平,而此时保护地内的温度、光照条件都比较适宜,植物的光合作用应是一天中最强的, 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 $25\sim 30^\circ\text{C}$ 时通风换气,使内外温度和 CO_2 浓度逐渐达到平衡;当气温降至 $15\sim 20^\circ\text{C}$ 时关闭保护地,此时保护地内仍有一定的光照,温度也较适宜,植株仍能进行光合作用,从而又引起 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,保护地 CO_2 浓度在夜间又迅速升高。没有种植作物的温室内 CO_2 浓度的日变化如图 2 所示。北京市蔬菜所对温室 CO_2 浓度变化的测定如表 1。保护地内种植作物后, CO_2 浓度变化也有一定的规律性如图 3。由此可见,不论保护地有无作物栽培,也不论栽培作物种类如何变化, CO_2 浓度日变化曲线基本相似,即每天日出前 CO_2 浓度达到最高,大约在光合作用最强的 $10\sim 14$ 时降至最低点,表现出严重亏缺,势必严重影响植株的生长发育,此时补充 CO_2 气体必定能大大提高植株的光合效率。 CO_2 浓度的变化与作物的呼吸作用有关,也与保护地设施体积大小有关,一般说来,夜间(或阴天)比白天(或晴天) CO_2 浓度高;随着保护地体积变大,最低浓度出现的时间要推迟。 CO_2 在保护地内的分布,一般近中午时间作物层上部、通道及近地面空气中 CO_2 浓度较高,作物群体内部浓度较低,即使 CO_2 浓度高的部位其浓度仍低于 $300(10^{-6})$,无法满足光合作用的需要,下午 6 时至夜间,近地面空气中 CO_2 浓度较高,作物群体内部 CO_2

浓度也升高。冬暖棚在深冬季节,通风时间短、次数少, CO_2 亏缺更严重。冬季日照时间短、照度低,在中午光照最强的“黄金”时间内 CO_2 亏缺,造成光能的巨大浪费,进一步加剧了冬季不利因素的影响,成为提高产量的桎梏。如果在中午时分补充 CO_2 气体,就可充分利用光能,减缓冬季温室光照不足的问题,从而大大提高和改善作物的生产状况。

表 1 温室内 CO_2 浓度的变化

时间	日期	
	3月 28日	3月 19日
	晴天 (10^{-6})	阴天 (10^{-6})
5:30	2400	2530
10:39	760	1970
14:30	340	450
23:30	1200	2400

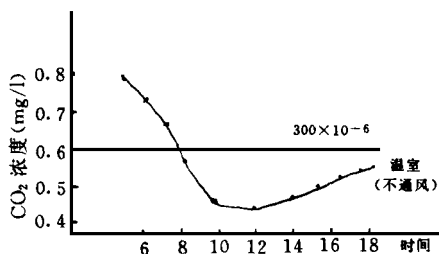


图 2 温室 CO_2 浓度日变化

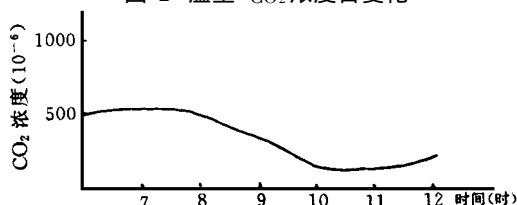


图 3 大棚芹菜不施 CO_2 时棚内 CO_2 的变化

(朱荣宝等, 1992)

二、二氧化碳施肥的作用

1. 对产量的影响: 在适宜的条件下, 增加保护地 CO_2 浓度将提高作物的经济产量。这也正是 CO_2 施肥技术得以逐步推广的前提。任何一项新技术只有将增产增值作为最终目标, 在实际生产中才能被接受, 才能大面积应用。试验表明, 在保护地生产黄瓜、番茄、辣椒、莴苣、芹菜等蔬菜时施用 CO_2 会大幅度提高产量。当 CO_2 浓度倍增时, 蔬菜产量平均提高 $25\sim 33\%$ 。黄瓜生产上增施 CO_2 一般增产 $30\sim 60\%$ 。据北京郊蔬菜保护地的调查, 亩增产值几千元; 郭秀媛 (1985 年) 等在黄瓜上的试验也取得相似的结果。 CO_2 施肥对番茄产量的提高也很大, 一般在 $20\sim 40\%$, 增加产值也达几千元。樊鸿修等在番茄上的试验结果如表 2 所

示。朱荣宝等在芹菜生产中进行 CO₂ 施肥也表现出增产效应,每亩增加纯收入 1001.9 元。在甜椒、莴苣生产中增施 CO₂ 产量分别提高 19.9% 和 20~30%。大量的试验证明,在一定范围内,保护地内 CO₂ 浓度超过大气 CO₂ 浓度就能提高作物的产量,虽然最终产值还要受多种因素的影响,如 CO₂ 的来源、运费、容器消耗、市场蔬菜价格等等,但增加产值是毫无疑问的。CO₂ 施肥效果,在一些分批采收的蔬菜(如黄瓜、番茄等)上有特殊表现,这些蔬菜施用 CO₂,前期产量增幅很大,后期产量增加的幅度小,甚至出现负增加。郁昭等的黄瓜试验表明,CO₂ 施肥后,黄瓜后期产量比对照增产均不显著,而前期产量与对照相比均达显著性差异;在番茄上的试验也有同样的结果。

2. 对作物形态解剖的影响: 叶菜类的食用器官也是营养器官,营养器官的大小反应其经济产量的大小,CO₂ 施肥促进营养器官的生长,就能提高产量。芹菜在施用 CO₂ 后,产量的增加与株高、叶柄粗、茎盘粗的增大密切相关,株高增加 28%,茎盘粗增加 31.8%,叶柄粗增加 41.4%,引起每亩增产 50.3%。CO₂ 施肥使黄瓜株高增加 10~40%、叶面积增加 20~30%、叶数的增长速率平均每天比对照多 0.3%;随着保护地 CO₂ 浓度的增加,黄瓜雌花数增多,这与黄瓜光合产量提高、同化产物递增有关,CO₂ 含量在空气中达到 1% 时,雌花百分率可达 100%,同时座果率提高、畸形果减少。另外,CO₂ 施肥还能增加黄瓜叶片气孔数、降低根瓜部位、增加干物质质量、增加瓜长、瓜数以及瓜重。在番茄生产中,CO₂ 施肥同样对果数、果重等的增加有促进作用,特别是苗期施用 CO₂,幼苗生长速度加快,干物质积累增多,叶面积加大,叶片数和叶片气孔数显著增加,对于培养壮苗作用很大。适当的 CO₂ 浓度不仅对番茄苗地上部分有明显的影响,而且对植株根系的影响也很大,在浓度为 300~1000 (10⁻⁶) 时,根冠比适中,既利于上部生长,又促进根部生长,为后继生长打下坚实的基础。增施 CO₂ 还加速了花芽分化的进程,增加单株花芽数,为番茄多花多果创造了条件,开花期提早有利于早熟。

3. 对保护地温度的影响: CO₂ 施用效果受温度、光照等因素的制约,施用时应与这些因素的控制相配合,反之 CO₂ 施肥也能影响保护地的浓度,白天施用 CO₂ 一般可使保护地内温度相应提高约 3~4℃,施肥停止后可按正常温度要求管理;夜间温度管理变幅应略为加大,即上半夜比正常略高,下半夜略低,以增加白天 CO₂ 施肥的效果。CO₂ 施肥还应根据天气和光照强弱进行,晴天光照强、温度高,CO₂ 用量大、浓度要高;阴天光照弱、温度偏低,CO₂ 用量小、浓度要低;

雨雪天光照极弱,一般不进行 CO₂ 施肥。CO₂ 气源不同,施用时对温度影响也不一,通过燃烧液化油、白煤油、沼气等天然化合物获得 CO₂ 的方法,在提供 CO₂ 的同时,也使保护地的温度升高(表 2)。因此在温度管理上要因地制宜,避免高温,一旦出现高温,不但 CO₂ 施肥的效果大打折扣,而且还会抑止光合作用和有关酶的反应,特别是高温和高 CO₂ 浓度同时存在时,作物受高温的不利影响大于 CO₂ 的增益作用。

表 2 不同 CO₂ 浓度处理增温表

(郭秀媛等, 1985)

处理 (10 ⁻⁶)	晴天 (时)				阴天 (时)			
	5 ⁵ : 8 ⁸ : 0 ⁰	00 ⁰ : 8 ⁸ : 00 ⁰	差 - CK	(12.5 ⁵ : 30 ⁸ : 0 ⁰)	5 ⁵ : 30 ⁸ : 0 ⁰	30 ⁸ : 8 ⁸ : 00 ⁰	差 - CK	(6.1)
2000	11.8	27.4	15.6	3.4	10.4	19.1	8.7	2.6
1500	11.8	25.8	14.0	1.8	10.5	17.9	7.4	1.3
1000	11.8	25.0	13.2	1.0	10.4	17.9	7.5	1.4
CK	11.8	24.2	12.2	0.0	10.4	16.5	6.1	0.0

4. 对蔬菜品质的影响: 蔬菜施用 CO₂ 后能促使叶和果实的光泽变好、外观品质提高,还能提高营养成份的含量,从而改善内在品质。藤井和伊正 (1965) 在番茄上施用 CO₂,可溶性固形物、果汁粘度、全糖、谷氨酸含量增加,果汁 PH 值减少,果实风味增加。施用 CO₂,黄瓜 V_C 含量增加,番茄 V_A 含量增加。Bentrup 等 (1987) 指出,球茎甘蓝幼苗和成株的叶柄中的硝酸盐含量比茎叶和叶片的高,但其硝酸盐含量在高 CO₂ 低 O₂ 条件下减少。

5. 对蔬菜病害的影响: 蔬菜施用 CO₂ 后,叶片光合效率提高,植株健壮、生活力增强,体内糖分积累增多,提高了植株的抗疫能力,有抑制和减轻病害发生的效应。赵文华等 (1988) 对大棚黄瓜施用 1500~2000 (10⁻⁶) CO₂,霜霉病发病率和病情指数都降低,相对防效提高 20%,这是因为当 CO₂ 浓度升高时,植株叶片气孔部分关闭,阻碍了霜霉病游动孢子由气孔的侵入,从而减轻病害侵染的机会。施用 CO₂ 番茄的蕨叶病发病率降低 32%,病情指数降低 50%;辣椒花叶病发病率降低 61%,病情指数降低 92%。

三、二氧化碳施肥技术

1. CO₂ 施肥的浓度: CO₂ 施肥浓度与作物种类、品种以及光线强弱、温度高低甚至肥水等条件都有很大关系。前已述及,一般接近 CO₂ 饱和点的浓度是最适 CO₂ 施肥浓度,但 CO₂ 饱和点由于受多种因素的影响而发生很大的变化,在当前条件下准确掌握 CO₂ 饱和点是十分困难的,而且由于受条件和检测手段的限制,某一作物的 CO₂ 饱和点往往有很大出入,因此实际意义不大。这一方面的试验往往只是比较几个 CO₂ 浓度的施用效果,结果一般都比标准浓度 (300 (10⁻⁶)) 增产。比如,黄瓜施用 800~3000 (10⁻⁶) 甚至 8000 (10⁻⁶) 的 CO₂ 都有增产作用,其中以 2000 (10⁻⁶) 作

用最大、增产最多；芹菜以 $1000\sim 1200(10^{-6})$ 浓度增产效果最好。目前在北欧、美国、日本等国多以 $2000(10^{-6})$ 以上。浓度过高不但不经济，而且会使气孔张度减小、蒸腾速度降低、叶温升高，导致萎蔫，还会引起缺钙、硼等元素，降低根的吸收能力。为了保险起见，实际生产中应用的浓度是：叶菜类 $1500\sim 2500(10^{-6})$ ；黄瓜、茄子、青椒为 $800\sim 1500(10^{-6})$ ；番茄、甜瓜 $500\sim 1000(10^{-6})$ 。这些浓度的增产效果稳定。

2. CO_2 施用的时间和时期：从理论上讲 CO_2 施肥应在作物光合作用最旺盛、产品形成期光照最强烈时进行。实际生产中最佳施肥时间应在日出不久进行，具体时间一般是：11月~1月为9时，1月下旬~2月下旬为8时，3月~4月为6时半~7时。当需要通风降温时，应在通风前半小时内~1小时停止施用。寒流阴雨天、多云天气，因气温低、光照弱、光合作用低，一般不施用或施用浓度要低。作物不同生育阶段的 CO_2 施肥效果不完全一样，从多数试验和实际效果来看，苗期 CO_2 施肥对培育壮苗的作用十分明显，它可以缩短苗龄，加速苗期发育，果菜类作物还可提早花芽分化，对提高早期产量的作用很大。果菜类蔬菜在定植到开花前这一段时间内一般不进行 CO_2 施肥，否则易出现营养生长过旺、植株徒长的现象，不利于开花座果。果实迅速膨大期是 CO_2 施肥的最佳时期。番茄在开花后 10~20天，黄瓜在开花后 7~15天，甜瓜在开花后 10~20天进行 CO_2 施肥，可使叶片内制造的有机物大量运往果实，而且还可能将一部分同化产物运往根、叶等器官，用于扩大生长；叶菜类可在定植后开始施用 CO_2 。

3. CO_2 施肥时保护地温、光等因素的控制及肥水条件： CO_2 施肥后保护地的温度、光照等因素的控制应与之相配合，特别是温度，这一方面前面已经述及。施用 CO_2 后，一般根系的吸收能力提高，生理机能改善，施肥量应适当增加，但要避免肥水过大，否则，极易造成徒长，反而对生产不利。保护地果菜类作物进行 CO_2 施肥，还应注意增施磷钾肥，适当控制氮肥用量。

四、二氧化碳碳源及施用技术

1. 增施有机肥产生 CO_2 有机肥包括人畜粪便、作物秸秆、杂草茎叶等，可施入土壤中也堆积起来。施入土壤后，如果土壤温度、湿度、透气性都适于微生物的活动，有机质可分解而产生大量的二氧化碳。据调查在施有大量稻草的苗床里，稻草分解发酵所释放的 CO_2 可使空气中的 CO_2 浓度高达 $5000(10^{-6})$ ，40天后床内 CO_2 浓度仍在 $2000(10^{-6})$ 左右。可见多施有机肥在一定时期内提高二氧化碳浓度的作用十分明显。有机肥堆积在室外用塑料膜覆盖，再用塑料导管与大棚接通，利用有机质腐烂分解产生的 CO_2 供应大

棚。还可将有机肥堆积在保护地内直接供应 CO_2 ，也有一定效果。尽管多施有机肥可以提高温室内的 CO_2 浓度，但是如果室内作物已经生长繁茂，叶面积指数较大，光合作用对 CO_2 消耗量大，温室又高度密闭，日出后 CO_2 就会被很快消耗掉，而有机肥分解释放的 CO_2 又来不及补充，结果还是起不了人工补充二氧化碳的作用，而且这种方法产生的 CO_2 量不易调节控制，所以用多施有机肥的方法代替人工直接施用 CO_2 有一定的局限性。

2. 燃烧白煤油产生 CO_2 利用 CO_2 发生器，一般 1 公斤白煤油完全燃烧可产生 2.5 公斤 CO_2 (1.27m^3)，反应式为 $2\text{C}_{10}\text{H}_{22} + 31\text{O}_2 \longrightarrow 20\text{CO}_2 \uparrow + 22\text{H}_2\text{O}$ ，此法在日本使用较多，优点是使用方便，易于控制施肥量及时间，但需要施肥设施，白煤油价格也较高。

3. 燃烧液化石油气产生 CO_2 通过 CO_2 发生器燃烧液化石油气、天然气产生 CO_2 ，再经管道输入到保护地。反应式： $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \longrightarrow 3\text{CO}_2 \uparrow + 4\text{H}_2\text{O}$ 当前欧美诸国使用较多，优点是易燃烧完全，产生的 CO_2 纯净，容易控制用量及施肥时间，成本不太高，但当前国内液化石油气供应较困难，同时也需一定的设备。

4. 燃烧煤或焦炭产生 CO_2 这种方法原料来源较容易，但 CO_2 气体浓度不易控制，在燃烧过程中常有 CO_2 和 SO_2 有害气体伴随而出。

5. 燃烧沼气产生 CO_2 白煤油、液化石油气、天然气等在我国现阶段不易推广，因为价格高、来源不方便。但我国许多地方有沼气地，可以通过燃烧沼气产生 CO_2 ，反应式为： $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$ 化学能选用燃烧比较完全的沼气炉或沼气灯，用管道将沼气通入保护地点燃炉、灯即可产生 CO_2 。

6. 液态 CO_2 液态 CO_2 为酒精工业的副产品，可以直接施用，把气态 CO_2 加压装在钢瓶内，每瓶 CO_2 约 20~70kg，可以直接通过管道施用，容易控制用量，肥源较多但成本较高。

7. 固态 CO_2 这是一种工业产品，气态的 CO_2 在低温 (-85°C) 下变为固态，称为干冰，呈粉末状。在常温常压下干冰可气化成 CO_2 气体，1kg 干冰可以生成 0.5m^3 的 CO_2 ，施用方便、效果快，但成本高，还需要冷冻设备。

8. 气态 CO_2 某些地区，如我国的江苏泰兴黄桥有 CO_2 气井，能产生 CO_2 混合气，主要成分为 CO_2 (占 9%)，另外还有少量甲烷、乙烷、乙烯等。可由气井通过管道、流量计，较方便的获得 CO_2 ，而且易于控制施用量和施用浓度。还可将 CO_2 装于钢瓶内使用。利用钢瓶中的气、液、固态的 CO_2 ，补充保护地 CO_2

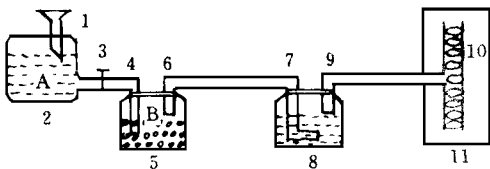
量,可用称量法计算(公式如下),也可用流量计直接读出公斤数。

$$\text{CO}_2 \text{ 补 充 量 (公 斤) } = \frac{0.58\text{g} / \text{m}^3 \times \text{设计浓度} (10^{-6}) - \text{施放时保护地 CO}_2 \text{浓度} (10^{-6})}{300 (10^{-6})}$$

× 每个处理的容积 (m³) ÷ 1000g

注: 0.58g/m³指 300 (10⁻⁶) CO₂约等于 0.58g/m³

9. 化学反应法产生 CO₂ 利用化学反应产生二氧化碳,操作简单、价格较低,适合广大农村的情况,易于推广。目前应用的方法有: 盐酸—石灰石法 (CaCO₃ + 2HCl → CaCl₂ + CO₂↑ + H₂O) 硝酸—石灰石法 (2HNO₃ + CaCO₃ → Ca(NO₃)₂ + CO₂↑ + H₂O) 和碳铵—硫酸法,其中碳铵—硫酸法取材容易、成本低、易掌握,群众乐于接受,在产生 CO₂ 的同时,还能将不宜在保护地中直接施用的碳铵转化为比较稳定的、可直接用作追肥的硫酸铵,是现在应用较广的一种方法。下面简要介绍这种方法: (1) 方法原理: 用化肥碳酸氢铵与工业硫酸反应可产生 CO₂, 反应方程式为: 2NH₄HCO₃ + H₂SO₄ → (NH₄)₂SO₄ + 2CO₂↑ + 2H₂O 使用前应将工业浓硫酸 (93~ 98%) 按 1: 3 稀释,因为硫酸浓度过高,与碳铵反应过程中会产生含硫有害气体,同时反应生成的废液中硫铵含量较高,处于饱和状态,反应速度缓慢,施用不方便。稀释方法: 将 3 份水置于塑料或陶瓷容器内,然后边搅拌边将 1 份 (体积) 浓硫酸沿器壁缓慢加入水中,搅匀,冷却至常温备用。(2) 产气装置。① 成套设备: 成套设备是由稀硫酸贮液桶、碳铵与硫酸反应桶、二氧化碳净化吸收桶和输送管道等部分组成,如图 4 所示。图 4 装置 8 盛水的作用是为了吸收硫、净化二氧化碳,使通入保护地的



A 稀硫酸 B 碳酸氢铵

1. 塑料漏斗 2. 塑料盛液桶 3. 出液管及开关
4. 进液口 5. 塑料反应桶 (带桶) 6. 出气管 7. 进气管 8. 塑料吸收桶 (带盖, 装水) 9. 送气管
10. 出气口 11. 大桶

图 4 稀硫酸加碳酸氢铵产生二氧化碳成套设备
二氧化碳气体纯净 ② 简易装置: 将稀硫酸盛入敞口塑料桶内,为了减少工作量,可一次放入 2~ 3 天的用量,放入量根据所需二氧化碳浓度及每点控制面积而定。由于 CO₂ 气比空气重 (空气比重约为 1.29kg/m³, CO₂ 为 1.98kg/m³), 扩散缓慢,因此应设置多个发生点,利于 CO₂ 浓度均匀。一般每亩需要设置 35~ 50 多个发

生点,即每点控制面积在 1.91~ 13.3m²,每点最大控制面积不超过 20m²。每天只要把碳酸氢铵按需要逐点加入硫酸中即可。因为 CO₂ 较重,发生反应后要下降扩散,所以盛硫酸的桶应该悬挂在空中,利于功能叶片的吸收,悬挂高度随植株生长适当向上提高,一般略高于植株生长点 (表 3)。(3) 二氧化碳施用量。二氧化碳施用量的计算方法可按下列公式进行:

$$W = \frac{V}{S} \times N \times (C_i - C_o) + P - R_s$$

表 3 不同平均高度施不同浓度 CO₂

每日所需原料量单位 (kg)

(白纲义等, 1991)

CO₂ 浓度 (10⁻⁶)	平均高度 (m)							
	1.2		1.5		1.8		2.0	
	碳铵	硫酸	碳铵	硫酸	碳铵	硫酸	碳铵	硫酸
800	2.30	1.43	2.88	1.79	3.46	2.14	3.84	2.38
1000	2.88	1.79	3.60	2.23	4.32	2.68	4.80	2.98
1200	3.46	2.14	4.32	2.68	5.18	3.22	5.76	3.57
1500	4.32	2.68	5.40	3.35	6.48	4.02	7.20	4.46
1800	5.18	3.21	6.48	4.02	7.78	4.82	8.64	5.36
2000	5.76	3.57	7.20	4.46	8.64	5.36	9.60	5.96

注: 保护地面积为 1 亩 (666.7m²) 式中: W: CO₂ 施用量 (g/m²·h); V: 保护地体积 (m³); S: 保护地土地面积 (m²); N: 换气次数 (次/hr, 根据保护地密闭程度取 0.1~ 5.0 次/hr, 一般取 2.0~ 3.0 次/hr); P: 室内每平方米土地上作物的光合强度 (gCO₂/m²·h); Cᵢ 设定 CO₂ 浓度 (g/m³, CO₂ 比重为 1.82g/l 或 1.82kg/m³); Cₒ: 室外 CO₂ 浓度 (g/m³); Rₛ: 室内每平方米土地面积的土壤上 CO₂ 释放量 (gCO₂/m²·h); 每日所需碳铵量 (g) = 保护地空间体积 (m³) × 施用 CO₂ 浓度 (10⁻⁶) × 0.0036 每日所需硫酸量 (g) = 每日所需碳酸氢铵量 (g) × 0.62 注: ① 保护地空间体积为: 保护地面积 × 平均高度; ② 0.0036 为: 每平方米发生 1(10⁻⁶) CO₂ 所需的碳酸氢铵克数; ③ 0.62 为: 1g 碳酸氢铵需与 0.62g 硫酸反应。硫酸与碳酸氢铵完全反应后 (即碳铵加入硫酸后完全无气泡放出) 得到的液态硫铵仍是一种氮肥,不会产生有害的废弃物,将此液稀释 50 倍可直接作追肥用。

五、二氧化碳浓度的监测方法

1. 化学反应法: (1) 检测剂测定法: 取被测定的空气通过检测剂观察其着色层的长度变化,查表进行温度校正后即可求得 CO₂ 浓度。(2) PH 比色法: NaHCO₃ 溶液在一定温度下能放出或吸收一定量的 CO₂, 从而与空气中的 CO₂ 达到平衡,最后稳定在一定的 PH 值上,因此可以通过指示剂颜色与做好的比色标准比较,即能鉴定溶液的 PH 值。通过 PH 值计算空气

中 CO_2 的含量 (根据 Handerson- Hassalhack 方程式推算), 检测范围在 $200\sim 1300 (10^{-6})$ 之间, 这种方法测定空气中 CO_2 的灵敏程度在 $1000 (10^{-6})$ 以下时为 $100 (10^{-6})$, 在 $1000 (10^{-6})$ 以上时为 $200 (10^{-6})$ 。

2. PH 光合仪测定法: 这种仪器用的较少, 可按仪器说明使用。

3. 电导率法: 根据 CO_2 与苛性钠溶液的反应式: $\text{CO}_2 + 2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, 可知氢氧化钠溶液与 CO_2 反应时, 其电导率发生变化, 用电极可测定。测定范围的变化决定于氢氧化钠溶液的规定度, 通常 $1/100$ 规定度的溶液可测定 $50\sim 2000 (10^{-6})$ 范围内的 CO_2 浓度。

4. 红外线 CO_2 分析仪: 气体在 $2.1\sim 1.5$ 微米波长的红外线光谱范围内, 都有固定的吸收光谱, 并且红外线的吸收量与被吸收气体的浓度成正比, 应用这样原理制成的测定 CO_2 浓度的仪器就是红外线 CO_2 分析仪, 它能连续测定并记录, 测定结果准确可靠。

六、 CO_2 施肥的注意事项

1. 充足的温度、光照条件是 CO_2 施肥的基础。如果没有作物适宜的温度、光照条件就不要进行 CO_2 施肥, 所以阴雨雪天气一般不进行 CO_2 施肥。

2. CO_2 施肥只能在保护地密闭的条件下进行。如果通风换气则施入的 CO_2 会因为空气交换流向室外, 无法提高室内 CO_2 浓度。

3. 为了防止可能发生的障害, 通过燃烧产生 CO_2 时必须充分燃烧以防二氧化硫、一氧化碳等有害气体的产生; 燃烧天然气可能产生乙烯而造成作物中毒。

4. 如果 CO_2 施肥浓度过高会产生裂果、畸形果、卷叶、植株衰老等生理障碍, 由于作物种类不同、发育阶段不同施用的浓度也应不相同。

5. 补充 CO_2 增强了光合作用, 加快了作物生长, 使植株健壮, 根系发达, 吸收能力增强, 果实负荷量加大, 因此, CO_2 施肥后要适当增加施肥量和灌水次数才能获得明显的增产效果。

6. 增施 CO_2 使作物营养生长加快, 为早期产量的提高奠定了基础。但番茄等作物的老化过程也明显提前, 在收获后期出现叶片反卷、畸形、叶绿素含量下降等现象, 叶片中淀粉的大量积累与株龄同步, 使叶绿素发生畸形, 后期光合作用受阻, 导致后期减产, 因此保护地后期相应减少 CO_2 气肥量。

7. 采用化学反应法稀释硫酸时, 一定要将硫酸沿器壁缓慢注入水中, 千万不能将水倒入硫酸中, 以免发生事故; 盛硫酸要用陶瓷或塑料容器, 不能用金属容器, 否则会发生严重的腐蚀。

主要参考文献

1. J. J. 哈南; W. D. 霍利; K. L. 戈德斯贝里著 郑光华、江亦行、田惠兰、蒋有绎译 《温室管理》. 科学出版社, 1984

2. 何启伟. 主编《蔬菜实用新技术》. 山东科学技术出版社, 1992

3. 邢禹贤. 编著《无土栽培原理与技术》. 农业出版社, 1990

4. 吴毅明 徐师华. 编著《温室塑料棚环境管理》. 农业出版社, 1990

5. 辽宁省农牧厅园艺处. 编《保护蔬菜技术问答》. 农业出版社, 1990

6. 苏崇森. 主编《西北保护地栽培》. 天则出版社, 1989

7. 北京农业大学. 主编《蔬菜栽培—保护地栽培》. 农业出版社, 1987

8. 温同年, 李加里. 1988. 大棚利用沼气 CO_2 施肥技术探讨. 长江蔬菜 (3): 34-35

9. 黄玖勤, 杨帆. 1990. 京郊保护地二氧化碳施肥效果明显. 蔬菜 (4): 28-29

10. 朱荣宝, 杨正连张喜武. 1992. 大棚芹菜增施 CO_2 的探讨. 中国蔬菜 (6): 28-29

11. 白纲义, 张兰芬. 1991. 二氧化碳气肥的化学施肥法. 蔬菜 (1): 28-30

12. 张道勇, 张耀栋, 高祖明, 史瑞和. 1989. 施用地下二氧化碳气的增产效果. 江苏农业科学 (5): 47-48

13. 郁昭, 亓玉成, 张明, 王凤明, 李百万 1988. 大棚黄瓜 CO_2 施肥的研究. 土壤肥料 (5): 47-48

14. 寿森炎. 1987. CO_2 施肥对大棚黄瓜的增产效应. 长江蔬菜 (5): 6-8

15. 南林坡. 1988. 大棚蔬菜补充 CO_2 能增产. 农业科技通讯 (7): 19

16. 赵明坤. 1991. 保护地施用 CO_2 方法综述. 蔬菜 (5): 22-23

17. 樊鸿修, 胡立敏, 杨海舰. 1988. 二氧化碳气肥地保护地番茄栽培上的应用研究. 甘肃农业科技 (6): 22-23

18. 曹嘉喜. 1993. 二施二氧化碳对番茄苗生长的影响. 长江蔬菜 (1): 39-40

19. 焦宗玉. 1993. 大棚黄瓜 CO_2 气肥施肥技术. 上海蔬菜 (2): 38

20. 陈炜, 孙韧, 赵建阳. 1993. 不同 CO_2 肥源对大棚黄瓜的增产效应. 上海蔬菜 (3): 36-37

21. 金之庆. 1993. CO_2 浓度增加对作物影响的研究动态. 世界农业 (7): 27-29

22. 王若青. 1991. 番茄苗期 CO_2 施用效果及施用适宜时期研究. 北方园艺 (8): 29-31

23. 宋世清. 1992. 地热温室甜椒追施 CO_2 的研究. 河北农业技术师范学院学报 6 (2): 8-13

24. 施定基, 马桂芝, 李桐柱, 吴毅民, 闵瑾如, 徐师革, 马小军. 1983. 增施 CO_2 生理效应的初步研究. 植物生理学通讯 (3): 30-32