设施农业增施 CO_2 利用效率的影响因素及调控策略

仝宇欣,程瑞峰,王君,辛敏,杨其长

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,农业部设施农业节能与废气物处理重点实验室,北京 100081

摘要　为提高设施农业增施 CO_2 的利用效率和经济效益,减少 CO_2 的逸散损失,降低成本,本研究以增施 CO_2 利用效率计算方法为基础,分析了增施 CO_2 利用效率的可能影响因素,探讨了提高 CO_2 施肥经济效益的有效技术与方法。分析表明,影响增施 CO_2 利用效率的主要因素为设施的换气次数、设施内外 CO_2 浓度差和植物的光合能力。因此,在进行 CO_2 施肥时,应综合考虑植物种类、生育阶段、栽培条件及其他环境要素等条件,选择适宜的 CO_2 增施方法、施肥浓度和施肥时间。

关键词　CO_2 施肥;利用效率;设施农业

中图分类号　S626.9　　**文献标志码**　A　　**doi**　10.3981/j.issn.1000-7857.2014.10.008

Effect Factors and Control Strategies for Improving Enriched CO_2 Utilization Efficiency in Protected Agriculture

TONG Yuxin, CHENG Ruifeng, WANG Jun, XIN Min, YANG Qichang

Key Laboratory for Energy Saving and Waste Disposal of Protected Agriculture, Ministry of Agriculture; Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract　To improve the utilization efficiency and economic benefits of enriched CO_2 and reduce the CO_2 leaked outside and the operation cost of protected agriculture, the possible effect factors on the enriched CO_2 utilization efficiency are analyzed based on calculations in this paper,. The effective methods and technologies to improve the enriched CO_2 utilization efficiency are discussed. The result shows that the main effect factors on the enriched CO_2 utilization efficiency are the air exchange rate, CO_2 concentration difference between inside and outside facilities and the plant photosynthetic capacity. To maximize the enriched CO_2 utilization efficiency, the optimum CO_2 enriched method, CO_2 enriched concentration and enriched time should be decided by considering plant species, growth stage, cultivation conditions, other environmental factors, etc., when the CO_2 enrichment is conducted.

Keywords　CO_2 enrichment; utilization efficiency; protected agriculture

近年来,随着设施工程技术和栽培育种技术的不断进步,设施农业作物产量得到极大的提高。但是,由于不适生长环境因子(如光照强度、温度、CO_2 浓度等)及病虫害等的影响,设施农业作物实际的产量只发挥了其生产潜力的24%左右,其中不适生长环境已成为作物产量最重要的限制因素[1]。与设施农业环境控制技术发达的荷兰和日本相比,中国设施农业作物的平均产量分别为其平均产量的1/6和1/3左右[2]。其主要原因是中国的农业设施主要以大棚和日光温室为主,室内环境调控能力较差。另外,研究者和生产者较注重温室光透性与温度控制问题,而对 CO_2 浓度等环境因子未给予相应重视。

CO_2 是作物进行光合作用的原料之一,因此,CO_2 浓度是影响作物生长的一个很重要的环境因子。在设施农业生产中,作物进行光合作用会消耗大量的 CO_2,若室内 CO_2 得不到

收稿日期:2014-01-10;修回日期:2014-01-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA103007);中国农业科学院基本科研业务费项目(BSRF201405)

作者简介:仝宇欣,助理研究员,研究方向为设施园艺环境工程、植物工厂等,电子信箱:tongyuxin@caas.cn;杨其长(通信作者),教授,研究方向为设施园艺环境工程、植物工厂、LED农业应用等,电子信箱:yangqichang@caas.cn

引用格式:仝宇欣, 程瑞锋, 王君, 等. 设施农业增施 CO_2 利用效率的影响因素及调控策略[J]. 科技导报, 2014, 32(10): 47-52.

及时补充,CO_2浓度会迅速下降。在不通风情况下,CO_2浓度会降低到作物CO_2补偿点以下,即使在通风情况下,室内CO_2浓度也可能低于室外CO_2浓度[3]。因此,过低的CO_2浓度已成为设施作物光合的主要限制因素,制约了作物生长发育,降低了作物产量和品质[3]。

在作物CO_2饱和点以下,光合作用随着CO_2浓度的升高而增强。因此,提高设施内CO_2浓度是提高设施农业作物产量和改善品质的有效措施。增施CO_2具有以下效果:1)增加产量达20%~60%;2)改善品质,外观品质好,个大,瓜粗,畸形果少,色泽鲜艳,果肉厚实,耐贮运;3)提早成熟上市,收获期或采摘期一般可提前3~7 d,价格高,效益好;4)增强抗病抗旱能力,植株健壮,抗病虫害能力增强[4~9]。

19世纪80年代以来,研究人员开始致力于CO_2施肥技术的研究[9]。但在研究初期,由于对CO_2施肥技术认识不足(如室内CO_2浓度不能得到很好控制,CO_2增施的浓度往往达到作物CO_2饱和点以上),试验方法和条件的限制(如采用同时会产生其他空气污染物的燃烧法生成CO_2进行施肥,对照实验利用土耕栽培并施用可放出大量CO_2的有机肥),试验效果并不明显,有些试验结果甚至表明作物产量和品质会低于对照[10],增施CO_2的利用效率也较低,致使一些研究者对CO_2施肥技术的研究热情一度低迷,在研究初期的40~50年内,CO_2施肥技术并未得到很大提高。近年来,随着对CO_2施肥技术认识的增加及设施农业环境控制技术的提高,一些国家尤其是设施农业技术发达的国家,配备CO_2施肥装置的设施面积正不断增加。据2011年日本农林水产省报道[11],2009年配备CO_2施肥装置的温室面积比2001年增加了56%。荷兰也有70%以上的温室配备了CO_2施肥装置。而在中国,配备CO_2施肥装置的温室较少,且普遍缺乏CO_2调控装置及监测系统,给CO_2施肥带来更多技术上的困难,而一些技术措施还缺乏适当的理论指导,致使CO_2施肥的经济效益低,限制了CO_2施肥技术的推广应用[12]。本文从设施内增施CO_2利用效率的计算方法入手,分析增施CO_2利用效率的可能影响因素,探讨提高CO_2施肥经济效益的有效调控技术与方法。

1 设施内增施CO_2利用效率计算方法

设施内增施CO_2的利用效率(enriched CO_2 utilization efficiency,ECUE)是CO_2施肥经济效益评价的最重要指标。其计算公式为[13]

$$ECUE = 1 - (L_{CO_2} + dC/dt)/S \quad (1)$$

其中,L_{CO_2}为CO_2通过设施缝隙逸散到设施外的损失率,$kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$;$S$为设施内$CO_2$的增施速率,$kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$;$dC/dt$为设施内$CO_2$浓度变化速率,$kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$。

由式(2)求得[13]

$$L_{CO_2} = K_{CO_2} NV(C_{out} - C_{in})/A \quad (2)$$

其中,K_{CO_2}为标准状态下CO_2的密度,1.96 $kg \cdot m^{-3}$;N为设施的换气次数,h^{-1};C_{out}为设施外CO_2浓度,$\mu mol \cdot mol^{-1}$;C_{in}为设施内CO_2浓度,$\mu mol \cdot mol^{-1}$;V为设施体积,m^3;A为栽培面积,m^2。

由式(3)求得[13]

$$dC/dt = R_{CO_2} + S - P_n - L_{CO_2} \quad (3)$$

其中,R_{CO_2}为土壤释放出CO_2速率,$kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,若土壤表面有覆盖膜,$R_{CO_2}$一般可忽略不计;$P_n$为植物净光合速率,$kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$。

2 增施CO_2利用效率的影响因素

结合式(1)~式(3)可以看出,增施CO_2的利用效率主要受设施的换气次数、设施内外CO_2浓度差和植物光合能力的影响。横井等[14]假设设施面积为1000 m^2,体积为3000 m^3,设施内CO_2浓度为1000 $\mu mol \cdot mol^{-1}$,设施外CO_2浓度为350 $\mu mol \cdot mol^{-1}$,换气次数分别为0.1、0.5、1.0、2.0、10 h^{-1},设施外气温为27°C,由土壤微生物呼吸所放出的CO_2忽略不计,得出增施CO_2的利用效率与植物的净光合速率和设施换气次数的关系(图1)。

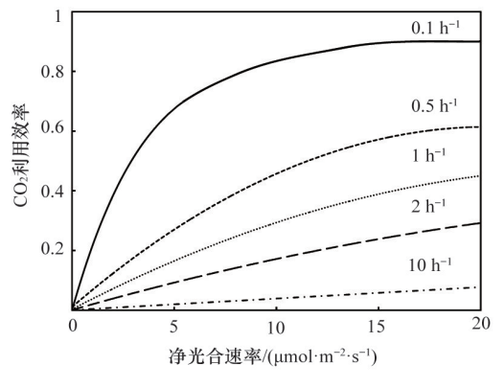

图1 增施CO_2的利用效率与净光合速率和换气次数的关系

Fig. 1 Responses of the net photosynthetic rate and air exchange rate to the enriched CO_2 utilization efficiency

2.1 设施换气次数对增施CO_2利用效率的影响

温室在密闭状态下的换气次数一般在0.3~0.5 h^{-1}。若室内CO_2增施到高浓度(如1000 $\mu mol \cdot mol^{-1}$),增施CO_2的利用效率最高可达到0.6~0.8(图1)。而对于密闭性较好的植物生产设施,其换气次数较小,如人工光型植物工厂的换气次数一般为0.01~0.04 h^{-1},由式(1)可知,即使室内CO_2浓度增施到高浓度(如1000 $\mu mol \cdot mol^{-1}$或以上),增施CO_2的利用效率也在0.9以上[15]。

温室在通风状态下的换气次数一般在10 h^{-1}以上,若室内CO_2仍增施到高浓度,那么增施的CO_2 90%以上将逸散到室外,不但造成经济损失,而且增加产生温室效应的CO_2排出量。实验表明[3,13],即使在通风状态下,由于植物光合作用,温室内CO_2浓度有时也会低于大气CO_2水平(室内外浓度差为50~100 $\mu mol \cdot mol^{-1}$)。而在低CO_2浓度,植物净光合速率与CO_2浓度几乎成直线增长关系。Allen等[16]研究发现,当CO_2浓度从330 $\mu mol \cdot mol^{-1}$逐渐升高到800 $\mu mol \cdot mol^{-1}$时,大豆的净光合速率随CO_2浓度升高而成直线增加。综合分析可知,增施CO_2到室外浓度水平可以在很大程度上提高植物的净光合

速率。由式(2)可知,若增施CO_2浓度到室外浓度水平,即使设施换气次数很大,或者说,即使设施在充分通风的情况下,也不会有CO_2逸散到室外,此时,增施CO_2的利用效率约为1。

2.2　植物光合能力对增施CO_2利用效率的影响

植物光合能力也是影响增施CO_2利用效率的一个重要因素。因此,任何影响植物光合能力的因素,同样会影响增施CO_2的利用效率。植物光合能力主要受植物种类及其生长环境因素的影响。

2.2.1　不同植物种类对增施CO_2利用效率的影响

根据光合碳同化途径不同,植物可分为C_3、C_4和CAM植物。其中C_3植物占95%左右,而设施农业作物基本上属于C_3植物[17,18]。试验证明[19],与C_3植物相比,C_4植物的PEP羧化酶活性强,对CO_2的亲和力大。因此,C_4植物的CO_2补偿点比C_3植物低,在大气CO_2浓度水平,C_4植物利用低浓度CO_2进行光合的能力比C_3植物高(图2)[17],C_3植物的光合能力随CO_2浓度升高而增加的幅度较大[20,21]。Havelka等[22]发现在$CO_2$1390 μmol·mol^{-1}条件下生长的小麦净光合速率比在332 μmol·mol^{-1}条件下生长的增加了50%。Ziska等[23]、Kimball等[24]的研究也表明了增施CO_2对C_3植物有明显的增产效果。增施CO_2对C_4植物的增产效果则不太明显[25]。而CAM植物的气孔一般会在傍晚或夜晚开放,进行CO_2的吸收与固定,因此,在傍晚或夜晚进行CO_2施肥可能会促进CAM植物的生长[9]。

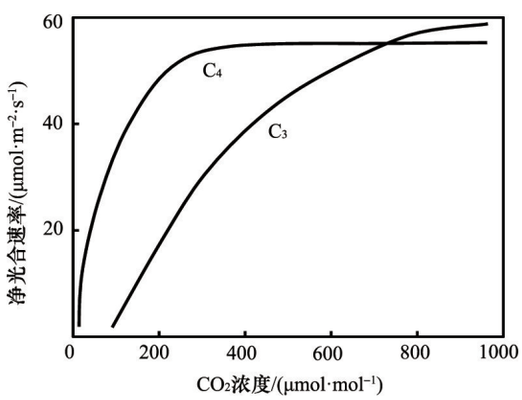

图2　增施CO_2对C_3和C_4植物净光合速率的影响

Fig. 2　Responses of CO_2 enrichment to the net photosynthesis for C_3 and C_4 plants

2.2.2　不同环境因子对增施CO_2利用效率的影响

植物利用CO_2进行光合的能力还受到不同环境因子的影响。CO_2浓度水平与其他环境因子(光照强度、叶温、湿度、气流速度和水肥吸收速度等)在对植物进行光合的影响上存在着既相辅相成又相互制约的关系[3,26~29]。

如图3[15]所示,增施CO_2可以降低光强不足对植物光合的影响,而提高光照强度可以降低植物CO_2补偿点同时提高CO_2饱和点,补偿CO_2浓度不足对植物光合的影响[9,12]。从图3可见,在较强光照强度下进行CO_2施肥,增施CO_2的利用效率较高。因此,根据光强大小增施CO_2至不同浓度,效果更显著。

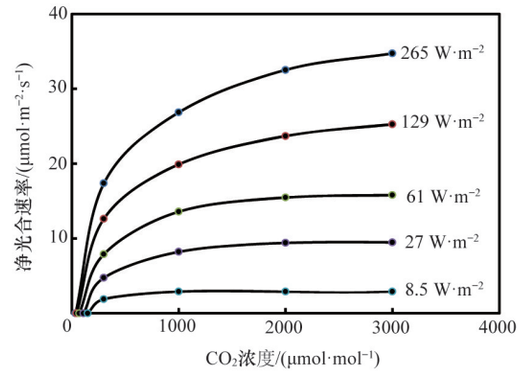

图3　净光合速率与CO_2浓度和光合有效辐射的关系

Fig. 3　Responses of CO_2 concentration and photosynthetic active radiation to net photosynthetic rate

增施CO_2的效果还会受到叶温的影响(图4)[15]。Eamus等[30]对桉树进行CO_2施肥实验证明,当CO_2浓度从大气浓度水平提高到700 μmol·mol^{-1}后,桉树生长的最适叶温从29°C升高到34°C。Idso等[31]在不同温度下对一些植物品种进行了CO_2施肥试验,结果表明,在高CO_2浓度下,植物生长的最适叶温也相应提高了2~5°C,若在低温下(如低于18°C)进行CO_2施肥,其效果不明显,有时反而会抑制植物生长。因此,在进行设施CO_2施肥时,可适当调高设施开窗通风的设定温度,延长CO_2施肥时间,使其达到更好的效果。

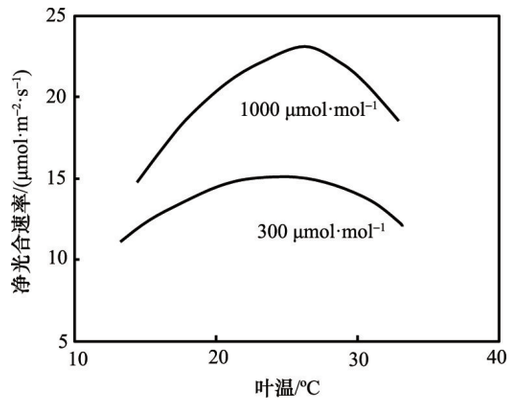

图4　净光合速率与叶温和CO_2浓度的关系

Fig. 4　Responses of the leaf temperature and CO_2 concentration to net photosynthetic rate

设施内空气相对湿度和风速间接影响了增施CO_2的效果(图5)[15]。过低或过高的空气相对湿度都会降低植物叶片的气孔导度[3,19],从而增加CO_2进入叶片的阻力,降低蒸腾速率,尤其是在低水肥供给条件下,会导致植物水分、营养匮乏,降低增施CO_2的效果[32~34]。

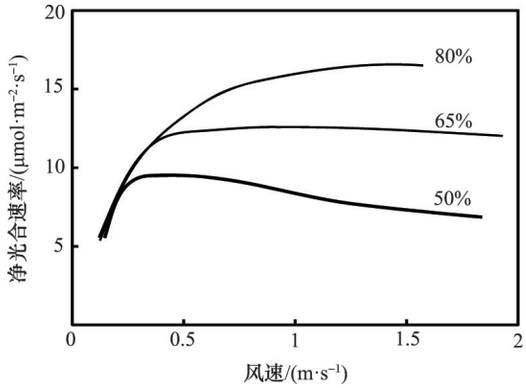

图5 净光合速率与风速和相对湿度的关系

Fig. 5 Response of the wind speed and relative humidity to net photosynthetic rate

风速大小会影响植物冠层与群落内部CO_2的均匀分布，从而影响增施CO_2的效果。植物进行光合作用消耗大量的CO_2，若风速较小，会使CO_2的扩散速率减慢，造成植物群落内部CO_2得不到及时补充，从而降低植物的光合速率。一般当风速在0.3~1.0 m·s^{-1}时，随着风速增大，植物叶片的边界层阻力减少，气孔导度增大，增施CO_2的效果增加[3]。若风速超过1.0 m·s^{-1}，尤其是在较低的相对湿度环境下，再增大风速，会导致植物的部分气孔关闭，气孔导度降低，增施CO_2的效果降低[13]。

植物水肥供给条件会影响增施CO_2的效果，而CO_2施肥也会影响植物的水肥吸收速度。Kanemoto等[32]在332~910 μmol·mol^{-1}的6个CO_2浓度水平上进行大豆实验，结果表明，在水分充足的情况下，虽然高浓度CO_2增大了大豆的叶面积，但同时也降低了大豆叶片的气孔导度，从而减少了每株大豆的水分蒸发量。在水分胁迫情况下，高CO_2浓度下大豆表现出较强的抗旱性。Sa′nchez-Guerrero等[7]研究发现在水胁迫下增施CO_2可以降低设施黄瓜的蒸腾速率，提高水分利用效率。Reddy等[35]在350~900 μmol·mol^{-1}的5个CO_2水平上对棉花进行试验表明，棉花对水的利用效率随着增施CO_2浓度的升高而增大，其主要原因为增施CO_2提高了植物冠层光合能力，减少了其蒸腾速率。上述实验表明，CO_2施肥会降低植物的蒸腾速率，从而减少水肥的吸收，因此，若在进行CO_2施肥的同时提高水肥的供给水平，则可以在很大程度上提高增施CO_2的效果，从而提高植物产量和品质[36]。

环境因子对植物利用CO_2进行光合的影响存在着既相互制约又相互促进的关系。因此，为提高增施CO_2的利用效率，应注意环境因子的综合调控，提高其经济效益。

3 提高增施CO_2利用效率的调控策略

大量试验表明，不当的CO_2施肥方法会对植株造成伤害，如出现徒长、营养缺乏、加速老化，有时甚至会造成减产。因此，采用适当的CO_2施肥方法是提高增施CO_2利用效率和经济效益的关键。

3.1 CO_2施肥方法

如表1所示，CO_2的增施方法主要包括通风换气、液态CO_2（或干冰）[37]、碳水化合物燃烧[38]、化学反应、发酵、利用动植物产生的CO_2等[12,39]。目前在中国，由于大部分设施结构简单，综合环境控制技术差，增施的CO_2主要采用成本较低的方法获得，例如通风换气、化学反应和自然降解法等。在荷兰、日本等设施农业技术较高的国家，主要采用CO_2浓度可精确控制或可进行多目的应用的方法，例如，纯CO_2（液体CO_2或工业副产品）和燃烧法（在冬季利用较多）[40]。表1列出了各种常用方法的优缺点。在进行方法选择时，应充分考虑设施栽培条件、栽培植物、环境控制条件、经济条件等因素，以取材方便、操作简单、安全可靠、无污染物影响植物生长和便于自动控制等为原则，合理选择一种或几种可以协同利用的方法，提高增施CO_2的利用效率。

3.2 CO_2施肥浓度

对植物而言，并非CO_2浓度越高越好。如图2所示，在低CO_2浓度时，植物的光合速率随CO_2浓度的升高几乎呈直线增加，越接近CO_2饱和点，光合速率增加越慢。若CO_2浓度增施到饱和点以上，光合速率则不再增加。过高的CO_2浓度还会减小植物叶片气孔导度，降低植物蒸腾，使植株表现为营养缺乏、落叶，降低CO_2的利用效率，造成经济损失。因此，适宜的CO_2浓度应根据设施的密闭状况、植物的种类、品种、生育阶段和其他环境因子而定。一般蔬菜的CO_2饱和点都在1000 μmol·mol^{-1}以上，且随着光强增加而升高[12]。实际生产中，在设施密闭性较好，室内光、温等环境条件较为适宜的条件下，增施CO_2的浓度，叶菜类蔬菜以600~1000 μmol·mol^{-1}为宜，果菜类蔬菜以1000~1500 μmol·mol^{-1}为宜，生长发育前期和阴天取低限，生长发育后期和晴天取高限。

3.3 CO_2施肥时间

选择适宜的CO_2施肥时间可以提高CO_2的利用效率并增加产量。适宜的CO_2施肥时间根据植物不同生育阶段、栽培方式等的不同而有所变化。

同一种植物，在不同的生育阶段或采用不同的栽培方式，其利用CO_2进行光合的能力存在差别。多层立体栽培的叶菜类蔬菜或种苗生产，单位土地面积上的叶面积指数大，群落光合能力强，增施CO_2的利用效率高，CO_2施肥可以在整个生育期进行。而在一般的设施果菜类栽培中，植物苗期的叶面积指数小，利用CO_2进行光合的能力较弱，增施CO_2的利用效率低，不宜施用。而在果菜类植物进入开花结果后期，CO_2吸收量增加，增施CO_2可以促进果菜生殖生长，增产效果好。因此，在开花结果期，增施CO_2增产效果较明显。

1天中CO_2施肥的适宜时间取决于室内CO_2浓度和光、温等环境条件。在相对密闭的设施内，由于夜间植物呼吸和土壤有机物经微生物分解释放的CO_2积蓄于室内，日出前，室内CO_2浓度较高，一般可达800 μmol·mol^{-1}；日出后，植物开始进行光合作用吸收大量的CO_2，室内CO_2浓度迅速下降，因此，CO_2施肥应当在日出后0.5 h左右进行。为避免高温对植物

表1　CO_2施肥方法比较

Table 1　Comparison of CO_2 enrichment methods

方法	来源	优点	缺点
通风换气法	利用天窗或侧窗,通过通风换气来补充设施内CO_2,减小室内外CO_2浓度差	操作简单,无成本	只能将设施内CO_2浓度提高到设施外浓度水平,且受到时间限制,比如在冬季为避免设施内温度过低,不宜开窗
液体CO_2法	释放瓶装液体CO_2	操作简单,可精确控制设施内CO_2浓度	成本较高
固体CO_2法	施入地表或浅埋土中的固体CO_2颗粒气肥,借助光温效应自行潮解释放CO_2	操作简单	CO_2释放速度不易控制,因此设施内CO_2浓度无法进行精确控制
燃烧法	利用燃烧煤、油、天然气、沼气等碳水化合物释放的CO_2	燃烧释放的热量可用于设施内加温	燃烧同时会产生一些大气污染物,如SO_2,NO_x等,未完全燃烧产生的CO会造成人身伤害,成本高
化学反应法	利用碳酸氢铵、碳酸氢钠或碳酸钙与稀硫酸(3∶1)进行化学反应产生CO_2	反应剩余物可做肥料,成本较低	若温度过高导致碳酸氢铵分解,会产生氨中毒,硫酸对人、对物有腐蚀作用
酵解法	将有机物在酵母作用下酵解,或增施有机肥,将秸秆和畜禽粪便混合进行堆肥,利用微生物酵解产生的CO_2	操作简单,成本低,同时可以提高土壤肥力	CO_2释放速度不易控制,堆肥时可能同时会产生一些大气污染物,如SO_2,NO_x等
种植食用菌法	在栽培的空闲空间或在可以进行气体交换的设施中种植食用菌,利用食用菌释放的CO_2	无成本	CO_2释放速度不易控制,设施内CO_2浓度无法进行精确控制
养殖动物法	在设施旁边建设畜(禽)舍,利用畜禽呼吸产生的CO_2	无成本,畜禽的粪便可以作为有机肥料	CO_2释放速度不易控制,设施内CO_2浓度无法进行精确控制

伤害,一般进行通风换气,所以,在通风前0.5 h应停止CO_2施肥,避免浪费。^{14}C同位素跟踪实验表明,上午增施的CO_2在果实、根中的分配比例较高,而下午增施的CO_2在叶内积累较多。植物全天光合产物的3/4在上午产生,可知,植物的光合作用主要在上午进行,因此CO_2施肥也应主要集中在上午。在光照强度较低的阴雨天,可不施或进行CO_2低浓度施肥。

CO_2施肥时间的长短也会影响增施CO_2的利用效率。相关研究发现[41-43],若对一些植物进行长期的CO_2施肥,会使光合产物在植物叶片中积累,使叶绿素浓度和光合反应酶的活性下降。对不同植物进行长期CO_2施肥实验表明,在进行CO_2施肥的初期,植物的净光合能力普遍增强,但几周后,植物的净光合能力则会下降到对照试验水平或更低。Delucia等[44]研究发现,棉花在CO_2 350、675、1000 $\mu mol \cdot mol^{-1}$的环境下生长4周后,高CO_2浓度增加了棉花的生物量,但由于碳水化合物,如淀粉,在植物叶片中的积累,分解了叶片中部分叶绿素,并降低了光合反应酶的活性,从而使叶绿素浓度和光合能力下降。烟草在CO_2浓度为1000 $\mu mol \cdot mol^{-1}$的条件下生长几周后也出现了20%净光合能力的下降。高浓度CO_2可导致西红柿叶片中光合产物积累,使叶片光合能力下降。但也有试验表明,对植物进行长期CO_2施肥不会降低其光合能力。Eamus等[30]研究表明,以大气CO_2浓度为对照,桉树在$CO_2$700 $\mu mol \cdot mol^{-1}$的条件下分别生长12、18、30个月后,虽然叶片叶绿素浓度有所降低,但植物的光合能力得到增强。Michael等[45]也有相同的报道。因此,CO_2施肥时间的长短应根据植物品种而定。

4　结论

1)从计算公式可知,增施CO_2的利用效率主要受设施的换气次数、设施内外CO_2浓度差和植物光合能力的影响;

2)为提高增施CO_2的利用效率,设施内增施CO_2的浓度应随设施换气次数的增大而降低;

3)CO_2施肥对不同植物种类的增产效果不同,其中对C_3植物的增产效果最显著;

4)植物利用CO_2进行光合的能力受其环境因子的影响,因此,为提高增施CO_2的利用效率,应注意环境因子的综合调控;

5)不当的CO_2施肥方法会对植物造成伤害,甚至减产。因此,应在综合考虑植物种类、生育阶段、栽培条件及其他环境因子等因素的基础上,选择适宜的CO_2增施方法、施肥浓度和时间。

参考文献(References)

[1] Ikeda T. The optimal environment for agriculture production[R]. Japan, Tokyo: Japan-China International Workshop of Horticulture, 2010.

[2] Kato S, Matsuda R, Anjyo K, et al. Growth modeling on analyzing the yield difference of greenhouse tomato between Japan and Holland[R]. Japan, Hokkaido: Japanese Society for Agricultural, Biological, and Environment Engineers and Scientists, 2011.

[3] Tongbai P, Kozai T, Ohyama K. CO_2 and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 126(3): 338-344.

[4] Baker J T, Allen L H J, Boote K J. Temperature effects on rice at elevated CO_2 concentration[J]. Journal of Environment Botony, 1992, 43

(7): 959-964.
[5] Jaffrin A, Bentounes N, Joan A M, et al. Landfill biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(1): 113-123.
[6] Critten D L, Bailey B J. A review of greenhouse engineering developments during the 1990s[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112(1): 1-22.
[7] Sa′nchez-Guerrero M C, Lorenzo P, Medrano E, et al. Effects of EC-based irrigation scheduling and CO_2 enrichment on water use efficiency of a greenhouse cucumber crop[J]. Agriculture Water Management, 2009, 96(3): 429-436.
[8] Tisserat B, Vaughn S F, Berhow M A. Ultrahigh CO_2 levels enhances cuphea growth and morphogenesis[J]. Industrial Crop and Products, 2008, 27(1): 133-135.
[9] Mortensen L M. Review: CO_2 enrichment in greenhouses. Crop responses[J]. Scientia Horticulturae, 1987, 33(12): 1-25.
[10] Peet M M, Huber S C, Patterson D T. Acclimation to high CO_2 in monecious cucumbers. II. Carbon exchange rate, enzyme activities, and starch and nutrient concentrations[J]. Plant Physiology, 1986, 80: 63-67.
[11] Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries. Investigation on protected horticulture and plastic used in agriculture[EB/OL]. [2014-01-10]. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/engei/index.html.
[12] 周长吉. 现代设施工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
Zhou Changji. Modern greenhouse engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
[13] Tong Y. Integrated greenhouse environment control using heat pumps with high coefficient of performance[D]. Japan: Chiba University, 2011.
[14] Yokoyi M, Kozai T, Nagay G, et al. Effects of leaf area index of tomato and air exchange rate on the CO_2 and water use efficiency in closed systems[J]. Japanese Society for Agricultural, Biological, and Environment Engineers and Scientists, 2005, 17(4): 182-191.
[15] Kozai T. Plant factory with artificial light[M]. Japan: Ohmsha, 2012.
[16] Allen L H, Valle J, Mishoe R R, et al. Soybean leaf gas exchange responses to CO_2 enrichment[J]. Soil & Crop Science Society of Florida, 1990, 49: 192-198.
[17] Taiz L, Zeiger E. Plant Physiology[M]. Fourth Edition. Sunderland: Sinauer Associates, 2006.
[18] Baldocchi D. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C_3 (wheat) and an open C_4 (corn) crop. Ⅱ. CO_2 exchange and water use efficiency[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 67: 291-321.
[19] Morison J I L, Gifford R M. Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity: A comparison of two C_3 and two C_4 Grass species[J]. Plant Physiology, 1983, 71(4): 789-796.
[20] Masafumi O, Makie K, Hiroko T, et al. Is yield enhancement by CO_2 enrichment greater in genotypes with a higher capacity for nitrogen fixation?[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(10): 1385-1393.
[21] Remy M, Andreas P, Hans-Joachim W. Effect of free air carbon dioxide enrichment combined with two nitrogen levels on growth, yield and yield quality of sugar beet: Evidence for a sink limitation of beet growth under elevated CO_2[J]. European Journal of Agronomy, 2010, 32 (3): 228-239.
[22] Havelka U D, Wittenbach V A, Boyle M G. CO_2-enrichment effects on wheat yield and physiology[J]. Crop Science, 1984, 24(6): 1163-1168.
[23] Ziska L H, Teramura A H. CO_2 enrichment of growth and photosynthesis in rice (*Oryza Sativa*)[J]. Plant Physiology, 1992, 99: 473-481.
[24] Kimball B A. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations[J]. Agronomy Joutnal, 1983, 75 (5): 779-788.
[25] Strain B R, Cure J D. Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation[M]. California University, United States: U S Department of Energy, 1985.
[26] Jonghan K, Lajpat A, Bruce K, et al. Simulation of free air CO_2 enriched wheat growth and interactions with water, nitrogen, and temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(10): 1331-1346.
[27] Renu P, Priya M, Chacko M L, et al. Higher than optimum temperature under CO_2 enrichment influences stomata anatomical characters in rose (*Rosa hybrida*)[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 113 (1): 74-81.
[28] Franzaring J, Weller S, Schmid I, et al. Growth, senescence and water use efficiency of spring oilseed rape (*Brassicanapus* L. cv. Mozart) grown in a factorial combination of nitrogen supply and elevated CO_2 [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 72(2): 284-296.
[29] Zhu Q, Jiang H, Peng C, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO_2 on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China[J]. Ecological Modeling, 2011, 222(14): 2414-2429.
[30] Eamus D, Duff G A, Berryman C A. Photosynthetic responses to temperature, light flux-density, CO_2 concentration and vapour pressure deficit in Eucalyptus tetrodonta grown under CO_2 concentration[J]. Environment Pollution, 1995, 90(1): 41-49.
[31] Idso S B, Kimball B A, Anderson M G, et al. Effects of atmospheric CO_2 enrichment on plant growth: The interactive role of air temperature [J]. Agricultural Ecosystems Environmental, 1987, 20(1): 1-10.
[32] Kanemoto K, Yamashita Y, Ozawa T, et al. Photosynthetic acclimation to elevated CO_2 is dependent on N partitioning and transpiration in soybean[J]. Plant Science, 2009, 177(5): 398-403.
[33] Zhang X C, Zhang F S, Feng Y X, et al. Effect of nitrogen nutrition on photosynthetic function of wheat leaf under elevated atmospheric CO_2 concentration[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(8): 1362-1370.
[34] Li W, Han X, Zhang Y, et al. Effects of elevated CO_2 concentration, irrigation and nitrogenous fertilizer application on the growth and yield of spring wheat in semi-arid areas[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(1): 106-114.
[35] Reddy V R, Reddy K R, Hodges H F. Carbon dioxide enrichment and temperature effects on cotton canopy photosynthesis, transpiration, and water-use efficiency[J]. Field Crops Research, 1995, 41(1): 13-23.
[36] Franzaring J, Holz I, Fangmeier A. Different responses of Molinia caerulea plants from three origins to CO_2 enrichment and nutrient supply[J]. Acta Ecological, 2008, 33(2): 176-187.
[37] Wittwer S, Robb W. Carbon dioxide enrichment of greenhouse atmospheres for food crop production[J]. Economy Botany, 1964, 18 (1): 34-56.
[38] Hanan J J. Greenhouses advanced technology for protected horticulture [M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.
[39] Louis-Martin D, Mark L, Vale′rie O. Review of CO_2 recovery methods from the exhaust gas of biomass heating systems for safe enrichment in greenhouses[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(8): 3422-3432.
[40] Kozai T. Solar light plant factory[M]. Japan: Ohmsha, 2009.
[41] Rowland-Bamford A J, Allen L H, Baker J T, et al. Acclimation of rice to changing atmospheric carbon dioxide concentration[J]. Plant Cell Environment, 1991, 14(6): 577-583.
[42] Besford R T, Hand D W. The effects of CO_2 enrichment and nitrogen oxides on some Calvin cycle enzymes and nitrite reductase in glasshouse lettuce[J]. Journal of Experiment Botany, 1989, 40(3): 329-336.
[43] Besford R T, Ludwig L J, Withers A C. The greenhouse effect: Acclimation of tomato plants grown in high CO_2, photosynthesis and ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase protein[J]. Journal of Experiment Botany, 1990, 41: 925-931.
[44] Delucia E H, Sasek T W, Strain B R. Photosynthetic inhibition after long-term exposure to elevated levels of atmospheric carbon dioxide [J]. Photosynthesis Research, 1985, 7(2): 175-184.
[45] Michael H, Daniel C M, Anne L. Long-term effects of nutrient and CO_2 enrichment on the temperate coral Astrangia poculata[J]. Cohen Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2010, 386(1/2): 27-33.

（责任编辑　王媛媛）