

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.038

# 基于膜空气吹扫技术的农业温室增施 CO<sub>2</sub> 研究

梁飞虹<sup>1,2</sup> 孙豆<sup>1,2</sup> 涂特<sup>1,2</sup> 纪龙<sup>1,2</sup> 贺清尧<sup>1,2</sup> 晏水平<sup>1,2</sup>

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 以甘氨酸钾(PG)富 CO<sub>2</sub> 溶液(富液)为对象,研究了采用膜空气吹扫技术将富液 CO<sub>2</sub> 再生与温室 CO<sub>2</sub> 气肥增施融合的可行性,并得出了设施番茄栽培的增施 CO<sub>2</sub> 方案。结果表明:在 40~80℃ 时,PG 富液初始 CO<sub>2</sub> 负荷越高,CO<sub>2</sub> 再生程度越大,释放的 CO<sub>2</sub> 量越多,且在约 60 min 时即可达到再生平衡。在可控参数的最佳条件下(气相流速 6 L/min、初始 CO<sub>2</sub> 负荷 0.75 mol/mol 和再生时间 60 min),仅通过调节液相流速和再生温度即可控制膜空气吹扫再生的 CO<sub>2</sub> 产量。针对标准农业温室(600 m<sup>3</sup>)内的设施番茄栽培,可采用两种 CO<sub>2</sub> 气肥增施方案:先将温室内 CO<sub>2</sub> 浓度迅速增施至最大浓度,随后根据植物光合情况随时补充;或是先计算番茄在某一段时间内所需的 CO<sub>2</sub> 总气量,然后以一定速率均匀地增施到温室中。与传统增施技术相比,富液再生增施 CO<sub>2</sub> 技术具有更低增施成本与生态环境敏感性,成本最高可降低约 58.00%。对于 1 000 m<sup>3</sup>/d 沼气产量的生物天然气工程,以富液为载体时,仅需 3 个连栋温室即可完全消纳沼气提纯中所需脱除的 CO<sub>2</sub>。

**关键词:** 农业温室; CO<sub>2</sub> 再生; CO<sub>2</sub> 气肥; 氨基酸盐; 沼气提纯

中图分类号: S216.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)11-0351-07

OSID:



## Atmospheric CO<sub>2</sub> Content Increment in Agricultural Greenhouse Based on Membrane Air-stripping Technology

LIANG Feihong<sup>1,2</sup> SUN Dou<sup>1,2</sup> TU Te<sup>1,2</sup> JI Long<sup>1,2</sup> HE Qingyao<sup>1,2</sup> YAN Shuiping<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The combination of CO<sub>2</sub> regeneration from CO<sub>2</sub>-rich solvent and atmospheric CO<sub>2</sub> content increment in the agricultural greenhouse was explored when the membrane-based air stripping technology and CO<sub>2</sub>-rich potassium glycinate (PG) were adopted. Additionally, the method of CO<sub>2</sub> content increase for tomato growth in the greenhouse was also put forward. Results showed that an increase of the initial CO<sub>2</sub> loading of CO<sub>2</sub>-rich PG solution straight forwardly increased the CO<sub>2</sub> regeneration efficiency and then the released CO<sub>2</sub> amount under the conditions of 40~80℃ reaction temperature. A regeneration equilibrium can be obtained within 60 minutes. Under the optimal operating conditions of 6 L/min air stripping flow rate, 0.75 mol/mol initial CO<sub>2</sub> loading and 60 minutes regeneration time, the released CO<sub>2</sub> amount can be easily controlled only by regulating the rich PG solvent flow rate and regeneration temperature. Two approaches for increasing the atmospheric CO<sub>2</sub> content in a standard greenhouse (600 m<sup>3</sup>) were provided for improving the growth of tomato. Firstly, the atmospheric CO<sub>2</sub> content was rapidly increased to the maximum value through CO<sub>2</sub> regeneration from rich PG solvent, and then the required CO<sub>2</sub> amount during tomato growth was supplemented according to the plant photosynthesis. Secondly, based on the calculation of total CO<sub>2</sub> amount required for tomato growth in some times, CO<sub>2</sub> form rich solvent regeneration was supplemented into the greenhouse at a fixed speed. Compared with the traditional method, this method using CO<sub>2</sub> released from CO<sub>2</sub>-rich solvent as CO<sub>2</sub> gas-fertilizer can obtain

收稿日期: 2020-10-28 修回日期: 2020-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52076101)、湖北省自然科学基金项目(2020CFA107)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662018PY046)

作者简介: 梁飞虹(1993—),男,博士生,主要从事 CO<sub>2</sub> 的植物与土壤固定研究, E-mail: lianf2008@outlook.com

通信作者: 晏水平(1980—),男,教授,主要从事低能耗 CO<sub>2</sub> 化学吸收及 CO<sub>2</sub> 植物与土壤固定研究, E-mail: yanshp@mail.hzau.edu.cn

a lower cost and environmental sensitivity. For example, the CO<sub>2</sub> generation cost can reduce by up to about 58.00%. For a bio-natural gas plant with 1 000 m<sup>3</sup>/d biogas yield, the released CO<sub>2</sub> during biogas upgrading can be completely absorbed and fixed by the plants cultivated in the three multi-span greenhouses when the developed technology was used.

**Key words:** agricultural greenhouse; CO<sub>2</sub> regeneration; CO<sub>2</sub> gas-fertilizer; amino acid salt; biogas upgrading

## 0 引言

温室内增施 CO<sub>2</sub> 能显著提高设施作物的光合作用,有利于增加作物的株高、叶面积及干重比<sup>[1]</sup>,并能增加作物坐果率<sup>[2]</sup>,提高产量和改善品质<sup>[3]</sup>。农业温室是一个相对密闭的空间,日出后几个小时里,由于光照适宜,植物的光合作用最大,温室内的 CO<sub>2</sub> 会很快被消耗,若不及时进行通风或增施 CO<sub>2</sub>,温室内 CO<sub>2</sub> 浓度会低于植物的光补偿点,长此以往将降低植物的光合作用,进而影响产量<sup>[4]</sup>。因此,给温室增施一定浓度的 CO<sub>2</sub> 非常有必要。

目前,温室增施 CO<sub>2</sub> 的方法有使用 CO<sub>2</sub> 钢瓶气、有机堆肥法、有机物燃烧法、化学反应法等<sup>[5]</sup>。CO<sub>2</sub> 钢瓶气安全、洁净且浓度可控,但在冬季使用,CO<sub>2</sub> 气化容易造成温室内温度降低,同时钢瓶搬运不便且价格高昂<sup>[6-7]</sup>。有机堆肥法成本低廉,但对增施过程中的 CO<sub>2</sub> 浓度及 CO<sub>2</sub> 施肥时间等不可控,应用局限性较大<sup>[8]</sup>。有机物燃烧法易产生有毒有害气体,存在安全隐患。化学反应法一般采用硫酸与碳酸氢铵反应制取 CO<sub>2</sub>,但硫酸属危化品,推广困难。适宜的 CO<sub>2</sub> 气肥增施方式应满足设施农业标准化生产、规模化生产和国家节能减排战略。

沼气含有约 40% 的 CO<sub>2</sub><sup>[9-10]</sup>,同时沼气燃烧后的产物仅有水和 CO<sub>2</sub>。因此,沼气是一种可行的温室 CO<sub>2</sub> 气肥资源。但沼气工程一般与农业温室的距离较远,不宜就地采用沼气燃烧等方式增施 CO<sub>2</sub>。同时,沼气在高值利用时往往需要去除沼气中的 CO<sub>2</sub><sup>[11-12]</sup>。理论上,可将沼气高值利用中分离的 CO<sub>2</sub> 作为农业温室气肥使用。

在众多沼气 CO<sub>2</sub> 分离技术中,CO<sub>2</sub> 化学吸收法因操作便捷、技术成熟、沼气中 CH<sub>4</sub> 损失可忽略和产品气中 CH<sub>4</sub> 纯度高等优势而备受关注<sup>[13]</sup>。化学吸收法面临的瓶颈问题之一在于富 CO<sub>2</sub> 吸收剂溶液(富液)的再生能耗高,其可占总系统能耗的 60% 以上<sup>[14]</sup>,从而造成 CO<sub>2</sub> 分离成本高<sup>[15]</sup>。对于更易受成本影响的沼气 CO<sub>2</sub> 分离而言<sup>[16]</sup>,降低富液再生能耗成为关键。因此,如将富液作为 CO<sub>2</sub> 载体,将富液的 CO<sub>2</sub> 再生过程延伸到农业温室,与温室的 CO<sub>2</sub> 气肥增施系统结合,就可以将吸收剂富液的再生能

耗转嫁到农业温室运营中,进而降低沼气提纯成本。采用上述方式还能农户节省 CO<sub>2</sub> 成本,同时增施系统还能部分替代温室的增温设备以及内通风设备,可进一步降低温室运营成本。

由于富液在农业温室内再生,因而不能选择具有挥发性的有机 CO<sub>2</sub> 吸收剂,可选择具有零蒸气压、良好生物降解性、抗氧化降解的氨基酸盐吸收剂<sup>[17]</sup>。此外,施肥 CO<sub>2</sub> 需根据蔬菜的生物特性选择适当的施肥时间,如番茄的最佳增施 CO<sub>2</sub> 时间为 08:00—10:00 之间<sup>[18]</sup>,果菜应在开花后施用,如施时不当,将使果菜徒长<sup>[19]</sup>。同时,施肥 CO<sub>2</sub> 一经开始,不宜中途停顿,多云或阴雨天可减半施放,以免引起光合作用能力下降和植物染病<sup>[20]</sup>。因此,还需进一步探究农业温室内增施 CO<sub>2</sub> 气肥方案。

基于此,本文以甘氨酸钾(Potassium glycinate, PG)富 CO<sub>2</sub> 溶液(富液)为 CO<sub>2</sub> 载体,探究以膜空气吹扫技术将富液 CO<sub>2</sub> 再生为农业温室增施 CO<sub>2</sub> 气肥的可行性,并以设施蔬菜番茄为模式作物,探索其增施 CO<sub>2</sub> 方案,同时分析本技术替代传统技术的经济效益与环境敏感性,以期农业温室增施 CO<sub>2</sub> 气肥提供一种新的可行方案。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 PG 富液制备

PG 由甘氨酸与 KOH 等物质的量反应而成,其中分析纯级 KOH 购置于上海凌峰化学试剂有限公司,甘氨酸购置于 BioFroxx GmbH 公司,纯度为 99%。PG 富液通过 PG 水溶液与纯 CO<sub>2</sub> 气体反应而成,在 CO<sub>2</sub> 吸收过程中,每隔 5 min 取样分析溶液 CO<sub>2</sub> 负荷,当达到指定负荷时,即可停止吸收,完成富液配制。其中 CO<sub>2</sub> 钢瓶气购置于武钢氧气气瓶检验厂东新分部,纯度大于 99.9%。吸收剂的 CO<sub>2</sub> 负荷采用经典的酸碱滴定法进行测试<sup>[14]</sup>。

### 1.2 试验系统

利用膜空气吹扫技术进行 PG 富液再生的试验装置如图 1 所示。试验中,向富液罐内添加 2 kg PG 富液,富液经蠕动泵(BT100-2J 型,兰格恒流泵有限公司)控制流量后进入电加热器(CS601 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂)进行加热,然后进

入膜组件,并在管层内流动(膜及组件参数如表 1 所示)。与此同时,空气经气泵(ACO-006 型,饶平县兴成机电水族用品有限公司)增压后经过气体流量计(LZB-6WB 型,泰州俊海仪表有限公司)控制流量后进入膜壳程,与液相形成逆向流动。吹扫再生中产生的再生气体经干燥后进行 CO<sub>2</sub> 浓度检测(XLA-BX-CO<sub>2</sub> 型,深圳市普利通电子科技有限公司)。气、液相温度采用温度测量仪(HT-9815 型,HTI Technology & Industries 公司)测试。

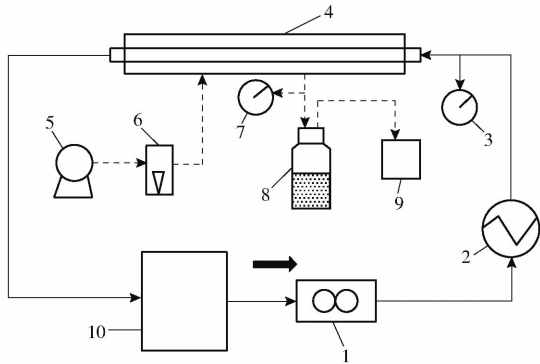


图 1 PG 富液膜空气吹扫再生试验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of CO<sub>2</sub> regeneration from

CO<sub>2</sub>-rich PG solvent by membrane air-stripping technology

1. 蠕动泵 2. 加热器 3. 温度测量仪 4. 膜分离设备 5. 气泵  
6. 气体流量计 7. 温度计 8. 干燥瓶 9. CO<sub>2</sub> 浓度检测仪 10. PG 富液罐

表 1 PP 中空纤维膜参数

Tab. 1 Specifics of PP hollow fiber

参数	数值
膜管长度/mm	375
膜管外径/mm	25
纤维内径/ $\mu\text{m}$	300
纤维外径/ $\mu\text{m}$	400
纤维根数	500
膜孔径/ $\mu\text{m}$	0.02 ~ 0.2
膜孔隙率/%	40 ~ 50

试验中,重点关注试验装置 CO<sub>2</sub> 实时产气量及试验时的 CO<sub>2</sub> 产气总量。其中,单位时间的 CO<sub>2</sub> 实时产气量可根据出口 CO<sub>2</sub> 实时浓度及气相流速计算获得,而 CO<sub>2</sub> 产气总量可通过对 CO<sub>2</sub> 实时浓度-时间曲线进行积分获得。

### 1.3 PG 富液的再生性能

PG 富液的再生程度  $\xi$  计算式为

$$\xi = \frac{\alpha_0 - \alpha_t}{\alpha_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $\alpha_0$ ——PG 富液 CO<sub>2</sub> 初始负荷, mol/mol

$\alpha_t$ —— $t$  时刻 PG 富液 CO<sub>2</sub> 负荷, mol/mol

再生过程中,PG 富液 CO<sub>2</sub> 负荷由  $\alpha_0$  下降到  $\alpha_t$  时,单位 CO<sub>2</sub> 再生所需要的能量  $E$  (kJ/mol) 为

$$E = \frac{PM\Delta t}{(\alpha_0 - \alpha_t)wm} \quad (2)$$

式中  $P$ ——系统总功率, kW

$M$ ——PG 摩尔质量分数, g/mol

$m$ ——再生过程中 PG 溶液总质量, kg

$w$ ——PG 溶液质量分数, %

$\Delta t$ ——系统运行时间, s

### 1.4 温室内增施 CO<sub>2</sub> 时的 CO<sub>2</sub> 需求量

温室增施时,植物生长所需 CO<sub>2</sub> 总量估算式为<sup>[21]</sup>

$$V_{\text{CO}_2} = \left( \frac{P_L \rho \Delta t}{2} + c_t - c_0 \right) V_G \quad (3)$$

其中  $P_L = P_g LA = P_n (1 - e^{-\frac{PAR}{P_n}}) LA$  (4)

式中  $V_{\text{CO}_2}$ ——温室所需的 CO<sub>2</sub> 气量, L

$P_L$ ——冠层光合速率, mL/(株·min)

$\rho$ ——番茄种植密度,取 6 株/m<sup>2</sup>

$c_t$ —— $t$  时刻温室的 CO<sub>2</sub> 浓度,取 900 mL/m<sup>3</sup>

$c_0$ ——温室初始 CO<sub>2</sub> 浓度,08:00 时,温室内的 CO<sub>2</sub> 浓度可降至约 700 mL/m<sup>3</sup>,因此  $c_0$  取 700 mL/m<sup>3</sup>

$V_G$ ——温室体积, m<sup>3</sup>

$P_g$ ——单叶片光合速率, L/(m<sup>2</sup>·min)

$LA$ ——叶面积, m<sup>2</sup>

$P_n$ ——仪器测定的光合速率, L/(m<sup>2</sup>·min)

$\varepsilon$ ——光转换因子,即吸收光的初始光能利用效率,取 0.4

$PAR$ ——冠层吸收光合有效辐射, J/(m<sup>2</sup>·min)

式中常数 2 为标准温室的高度, m。

## 2 结果与讨论

### 2.1 以富液为载体的温室增施 CO<sub>2</sub> 可行性

#### 2.1.1 操作参数对 PG 富液膜空气吹扫再生性能的影响

为了实现膜空气吹扫技术进行 PG 富液再生的产能和效率最大化,需对该技术的运行参数进行筛选,如图 2 所示。

当 PG 质量分数  $w = 15\%$ 、液相流速  $Q_L = 150$  mL/min、再生温度  $T = 100^\circ\text{C}$ 、再生时间  $t = 20$  min 时,气相流速  $Q_g$  对 PG 富液的再生性能影响如图 2a 所示。由图 2a 可知,再生过程中的 CO<sub>2</sub> 再生总量随  $Q_g$  的增大而呈现先增后减的趋势,并在  $Q_g = 6$  L/min 时达到最大值(4.37 L)。随着气相流速的增加,气相传质阻力降低,总传质系数增加,因而 CO<sub>2</sub> 再生量增加<sup>[22]</sup>。但在膜吹扫再生中,CO<sub>2</sub> 总传质系数主要由液相分传质系数决定<sup>[22]</sup>,因而气相流速变化对 CO<sub>2</sub> 再生性能的影响并不显著<sup>[23]</sup>。气

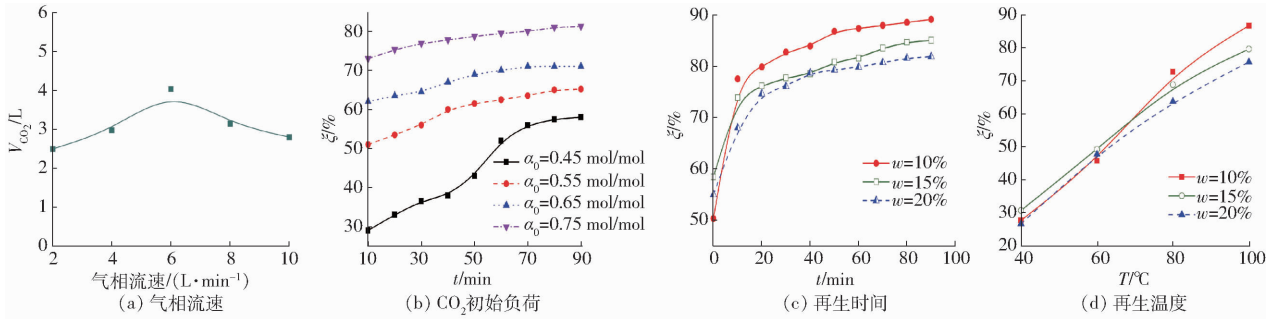


图2 操作参数对PG富液再生性能的影响

Fig. 2 Effects of operating parameters on CO<sub>2</sub> regeneration performance of CO<sub>2</sub>-rich PG solution

相流速过低时,膜更容易被浸润<sup>[24]</sup>,而过高的气相流速又使系统能耗增加。因此,将气相流速固定为6 L/min。

当 $Q_g = 6$  L/min时,PG富液初始CO<sub>2</sub>负荷对再生性能的影响如图2b所示。富液初始CO<sub>2</sub>负荷越高,富液的平衡CO<sub>2</sub>分压越大,再生推动力越大,再生程度因而越高<sup>[25]</sup>。因此,选择 $\alpha_0 = 0.75$  mol/mol。

不同吸收剂浓度下,随着再生时间的延长,富液的再生程度增加,如图2c所示。由图2c还可知,不论何种PG浓度,在60 min时间内,吸收剂的再生性能基本趋于稳定,进一步增加再生时间对再生程度的影响并不显著,但会大幅提升系统能耗<sup>[26]</sup>。因此,选择的再生时间为60 min。

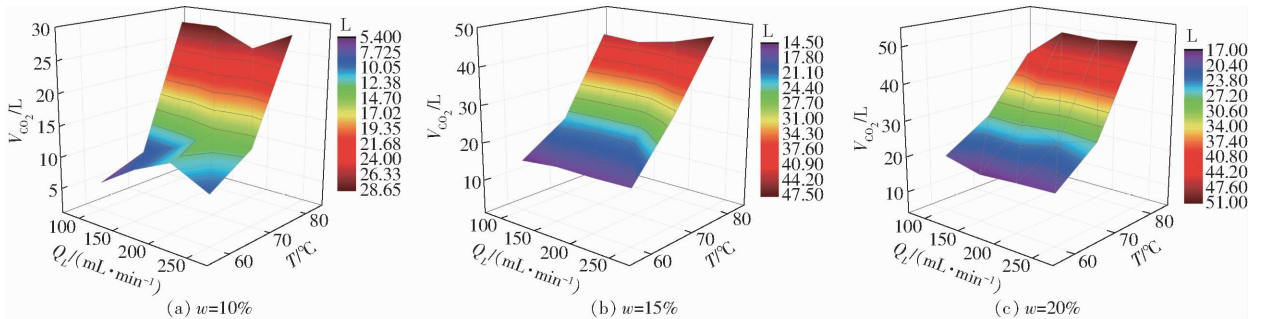
不同吸收剂浓度下,再生温度对PG富液再生性能的影响如图2d所示。再生温度越高,富液CO<sub>2</sub>

分压越大,再生过程中CO<sub>2</sub>传质推动力越大,再生效果越好。但对于膜空气吹扫技术而言,再生温度过高,会影响膜的使用寿命,且会增加液相加热耗能。

在实际运行中,除了需关注PG富液的再生性能外,还需关注作为气肥的CO<sub>2</sub>产气量变化。由图2可知,在实际运行中,可固定PG富液的CO<sub>2</sub>初始负荷(0.75 mol/mol)、气相流速(6 L/min)和再生时间(60 min),通过调控富液流量和再生温度来灵活调节CO<sub>2</sub>产量,从而适应植物在不同生长阶段、不同阶段的CO<sub>2</sub>需求差异。

### 2.1.2 PG富液膜空气吹扫再生时CO<sub>2</sub>产量的调控方案

在 $Q_g = 6$  L/min、 $\alpha_0 = 0.75$  mol/mol、 $t = 60$  min时,膜空气吹扫技术的CO<sub>2</sub>产气量调控方案如图3所示。

图3 温度及液相流速对PG富液膜空气吹扫再生中CO<sub>2</sub>产气量的影响Fig. 3 Effects of reaction temperature and solvent flow rate on CO<sub>2</sub> releasing amount from CO<sub>2</sub>-rich PG solvent by membrane air-stripping technology

由图3可知,无论何种PG浓度,膜空气吹扫再生的CO<sub>2</sub>产气量均随富液温度的升高不断上升,但随着液相流速的增大,产气量先上升后下降,并在150~200 mL/min之间产气量最大。因此,为了实现合理产气量,在液相流速一定时,可通过提高或降低温度来获得较大或较小产气量,而在温度确定时,可通过调节液相流速获取合适产气量。当 $w = 10\%$ 时, $V_{CO_2Max} = 28.62$  L,此时 $Q_L = 250$  mL/min, $T = 80^\circ\text{C}$ ;  $V_{CO_2Min} = 5.49$  L,此时, $Q_L = 100$  mL/min, $T = 60^\circ\text{C}$ 。当 $w = 15\%$ 时, $V_{CO_2Max} = 47.31$  L,此时 $Q_L =$

250 mL/min, $T = 80^\circ\text{C}$ ;  $V_{CO_2Min} = 14.70$  L,此时 $Q_L = 100$  mL/min, $T = 60^\circ\text{C}$ 。当 $w = 20\%$ 时, $V_{CO_2Max} = 51.00$  L,此时 $Q_L = 250$  mL/min, $T = 80^\circ\text{C}$ ;  $V_{CO_2Min} = 17.16$  L,此时 $Q_L = 150$  mL/min, $T = 60^\circ\text{C}$ 。其他产气速率可通过组合调节液相流速和再生温度获得。

因此,通过膜空气吹扫技术将富液CO<sub>2</sub>再生时,在气相流速 $Q_g = 6$  L/min、初始CO<sub>2</sub>负荷 $\alpha_0 = 0.75$  mol/mol、每批次富液再生时间 $t = 60$  min时,仅通过调节液相流速和再生温度即可控制系统的CO<sub>2</sub>产气量,并且PG富液浓度越高,产气量越大。

## 2.2 农业温室增施 CO<sub>2</sub> 方案

表 2 为番茄在不同生长时期的单株叶面积及其在 08:00—11:00 之间的最大光合速率等参数。

表 2 番茄在不同生长时期的光合速率及单株叶面积

Tab.2 Photosynthetic rate and leaf area of tomato at different growth periods

生长时期	光合速率 $P_n$ / ( $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )	单叶光合 速率 $P_g$ / ( $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )	单株 叶面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{株}^{-1}$ )	冠层光合 速率 $P_L$ / ( $\text{mL} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )
幼苗期	$7.52 \pm 1.72$ [27]	3.81	$0.21$ [19]	0.80
成苗期	$12.33 \pm 1.85$ [27]	8.92	$0.45$ [19]	4.02
开花早期	$17.36 \pm 2.32$ [28]	13.98	$0.69$ [19]	9.65
盛花期	$17.01 \pm 2.16$ [29]	15.05	$0.73$ [19]	10.99
结果期	$22.52 \pm 2.95$ [27]	21.41	$0.87$ [19]	18.63
盛果期	$24.90 \pm 3.12$ [30]	24.65	$1.01$ [19]	24.90

假设在一个标准单栋温室(面积为  $300 \text{ m}^2$ , 高  $2 \text{ m}$ )中进行增施 CO<sub>2</sub> 模拟, 将 PG 富液量放大为  $40 \text{ kg}$ , 增施时间为 08:00—10:30。以盛花期的温室番茄生产为例, 由表 2 可知整栋温室内的番茄光合速率为  $19.78 \text{ L}/\text{min}$ 。采用质量分数 15% 的 PG 富液用于 CO<sub>2</sub> 再生, 由式(3)可知, 在每天 150 min (08:00—10:30) 的增施过程中, 该温室需额外供应  $3\ 087.30 \text{ L}$  的 CO<sub>2</sub>。根据图 3b 计算可知, 在  $60 \sim 80^\circ\text{C}$  再生 PG 富液每小时可产生  $701.55 \sim 891.97 \text{ L}$  CO<sub>2</sub>。因此, 该温室需要 2 台  $40 \text{ kg}$  规模的基于膜空气吹扫技术的再生设备(中途更换一次富液), 即可满足温室番茄生产的 CO<sub>2</sub> 增施需求。

具体增施方案如下:

(1) 方案 1: 先将温室内 CO<sub>2</sub> 浓度迅速增施至番茄生长所需的最大浓度, 随后根据番茄光合情况进行随时补充。具体措施如下: 已知番茄盛花期温室每天需供应 CO<sub>2</sub> 为  $3\ 087.30 \text{ L}$ 。在该方案中, 再生设备首先需为温室供应 CO<sub>2</sub> 到番茄生长所需的最大浓度( $900 \text{ mL}/\text{m}^3$ )。由图 3b 可知,  $40 \text{ kg}$  PG 富液再生最快产气量为  $15.77 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{台})$ , 因此调节  $Q_L = 250 \text{ mL}/\text{min}$  和  $T = 80^\circ\text{C}$  即可满足当前需求, 此时运

行时间为  $10 \text{ min}$ (由式(3)计算可得)。随后温室的供气根据番茄光合情况进行补充, 番茄的光合速率为  $19.78 \text{ L}/\text{min}$ (表 2), 因此满足番茄生长的合理供气量应为  $9.89 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{台})$ , 此时只需调节  $Q_L = 150 \text{ mL}/\text{min}$  和  $T = 60^\circ\text{C}$  即可满足当前供气要求。

(2) 方案 2: 计算番茄在某一时段内所需的 CO<sub>2</sub> 总气量, 然后以一定速率均匀地将 CO<sub>2</sub> 增施到温室中。具体措施如下: 已知番茄盛花期温室每天需供应 CO<sub>2</sub>  $3\ 087.3 \text{ L}$ , 此时再生设备的供气速率需为  $10.29 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{台})$ 。由图 3b 可知, 调节  $Q_L$  为  $150 \text{ mL}/\text{min}$ ,  $T = 70^\circ\text{C}$  即可满足当前供气要求。

## 2.3 系统经济性能及环境敏感性分析

采用质量分数为 15% 的 PG 富液时, CO<sub>2</sub> 再生能耗与再生温度和液相流速的关系如图 4 所示。由图可知, 在 PG 富液的主再生阶段, CO<sub>2</sub> 再生能耗随着温度的升高而降低, 但随着液相流速的增大而增大。由图 4 可知,  $E_{\text{Max}} = 409.24 \text{ kJ}/\text{mol}$ ,  $E_{\text{Min}} = 163.49 \text{ kJ}/\text{mol}$ 。因此, 采用本系统为标准单栋温室供 CO<sub>2</sub>  $3\ 087.30 \text{ L}$  时, 采用方案 1 所需的总能耗为  $8.28 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 采用方案 2 的总能耗为  $8.62 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

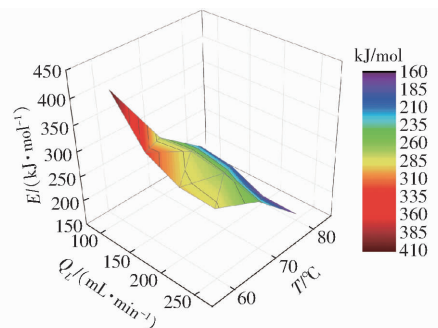


图 4 温度和液相流速对 15% PG 富液再生能耗的影响  
Fig.4 Effect of temperature and solvent flow rate on CO<sub>2</sub> regeneration energy consumption using 15% CO<sub>2</sub>-rich PG solvent as an example

以设施番茄栽培为例, 本文提供的温室增施 CO<sub>2</sub> 方法与现有温室增施 CO<sub>2</sub> 方法的经济性对比结果如表 3 所示。由表 3 可知, 采用膜空气吹扫技术再生 PG 富液为农业温室增施 CO<sub>2</sub>, 运行成本约

表 3 农业温室不同增施 CO<sub>2</sub> 方法的经济性分析

Tab.3 Economic analysis of CO<sub>2</sub> content increment in agricultural greenhouse by using different CO<sub>2</sub> methods

增施 CO <sub>2</sub> 方法	可供 CO <sub>2</sub> 气量 <sup>[31]</sup> / ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	用料量 <sup>[31]</sup>	成本/ ( $\text{元} \cdot \text{d}^{-1}$ )	一次性设备 投资/元
钢瓶气法	1.20 *	2.4 kg(液态 CO <sub>2</sub> )	10.0	2 000
酸碱中和法	1.20 *	2.75 kg(浓硫酸) + 4.65 kg(碳酸氢钠)	8.8	100
碳氢化合物燃烧法	1.20 *	1.4 m <sup>3</sup> (天然气)	4.2	4 000
膜空气吹扫技术	3.09 **	80 kg(PG 富液)	4.2	4 000

注: \* 表示常规气肥增施的 CO<sub>2</sub> 浓度达到  $1\ 000 \text{ mL}/\text{m}^3$  时即停止增施, 主要问题在于增施 CO<sub>2</sub> 气相流速无法精准控制, 温室内气体消耗速率无法检测, 过量增施 CO<sub>2</sub> 会对作物产生毒害; \*\* 表示本系统增施 CO<sub>2</sub> 气量大的是在系统运行过程中能够将温室内的 CO<sub>2</sub> 浓度实时维持在  $900 \text{ mL}/\text{m}^3$ , 避免了过量增施的毒害, 实现 CO<sub>2</sub> 的最大化利用。

为4.2元/d,相比于传统方式,成本最高可降低约58.00%,但相比于钢瓶气法和酸碱中和法,本系统的一次性设备投资较大。

图5为基于膜空气吹扫技术再生PG富液的温室增施CO<sub>2</sub>方法替代传统温室增施CO<sub>2</sub>方法用于农业生产时的生态环境敏感性与成本的关系。生态环境敏感性是指生态环境对区域内自然和人类活动干扰的敏感程度,具体评价标准参照文献[32]。如图5所示,图中填充部分是低生态环境敏感区域,颜色过渡表示技术的成本变化,其中越接近绿色区域,成本越低,越接近红色区域,成本越高。相比于传统方式,膜空气吹扫技术的生态环境敏感性最低,对环境无害。这是由于采用膜空气吹扫技术为农业温室增施CO<sub>2</sub>时,CO<sub>2</sub>来源环保清洁,且该技术能够实现CO<sub>2</sub>负排放或近零排放。而钢瓶气法虽然也拥有较低的生态环境敏感性,但技术成本高,且由于CO<sub>2</sub>来源并不完全环保,施用不当易产生温室气体排放;碳氢化合物燃烧法极易产生有害物质,危害环境,因而生态环境敏感性最高;酸碱中和法未完全反应时剩下的残酸残碱危害环境,导致生态环境敏感性较高。

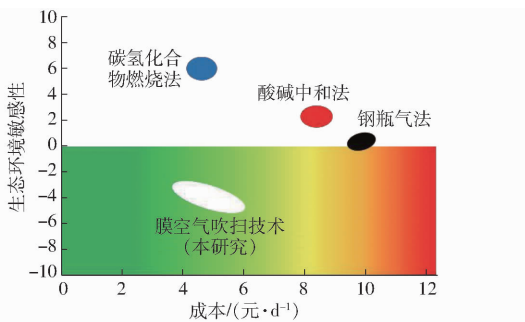


图5 温室增施CO<sub>2</sub>技术的生态环境敏感性

Fig.5 Ecological environmental sensitivity of different CO<sub>2</sub> gas-fertilizer application technologies

## 2.4 农业温室增施CO<sub>2</sub>与沼气提纯工程的匹配机制

以本文的设施番茄增施CO<sub>2</sub>为例进行规模匹

配计算,按照每300 m<sup>3</sup>的空间安装一台基于膜空气吹扫技术的CO<sub>2</sub>增施设备,每台设备每天需要供应120 kg PG富液。对于600 m<sup>3</sup>的独栋温室,在运行期间,每天需供应240 kg PG富液。而对于标准连栋温室(1 300 m<sup>3</sup>),则每天需供应500 kg PG富液。

对于沼气产量为1 000 m<sup>3</sup>/d的沼气工程,假设沼气中CO<sub>2</sub>体积分数为40%。提纯这些沼气每天会产生约2 465 kg的PG富液,由于吸收剂在不同层面的利用价值及能耗不同,在实际应用中,只需取出部分吸收剂用于温室CO<sub>2</sub>气肥增施环节,假设有60%左右的吸收剂被取出,即大约有1 500 kg PG富液需要消纳。按照温室的消耗能力,需要7个温室即可满足需求。如果采用连栋温室,需要3个连栋温室即可满足需求。

## 3 结论

(1)采用膜空气吹扫技术再生PG富液为温室增施CO<sub>2</sub>气肥的方案可行。在可控参数的最佳条件下(气相流速 $Q_g = 6$  L/min,CO<sub>2</sub>初始负荷 $\alpha_0 = 0.75$  mol/mol和富液再生时间 $t = 60$  min),仅通过调节液相流速和再生温度即可控制富液膜空气吹扫再生的CO<sub>2</sub>产气量。同时,随着PG富液的温度和质量浓度升高,再生产气效果越大。

(2)针对标准农业温室(600 m<sup>3</sup>)内的设施番茄栽培,可以采取两种CO<sub>2</sub>气肥增施方式,先将温室CO<sub>2</sub>浓度迅速增施至最大浓度,随后根据番茄光合情况随时补充;或者计算番茄在某一时段内所需的CO<sub>2</sub>总气量,然后以一定速率均匀地将CO<sub>2</sub>增施到温室中。与传统技术相比,本文技术拥有低的环境敏感性和经济成本,成本最高可降低58.00%。

(3)对于1 000 m<sup>3</sup>/d沼气产量的生物天然气工程,如果以吸收剂富液为CO<sub>2</sub>脱除载体,需要7个温室或3个连栋温室即可完全消纳沼气提纯中所需脱除的CO<sub>2</sub>。

## 参 考 文 献

- [1] WANG Y, ZHANG Y J, HAN J M, et al. Improve plant photosynthesis by a new slow-release carbon dioxide gas fertilizer[J]. ACS Omega, 2019, 4(6):10354-10361.
- [2] 康康,呼世斌.净化后废气作为CO<sub>2</sub>气肥的施用效果研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(1):101-106,114.  
KANG Kang, HU Shibin. Research of CO<sub>2</sub> enrichment by utilization of post purification waste gas[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 40(1):101-106,114. (in Chinese)
- [3] 王立革,郭珺,韩雄.增施CO<sub>2</sub>对设施土壤栽培番茄的生长、产量和养分吸收特性的影响[J].中国土壤与肥料,2018(6):180-187.  
WANG Lige, GUO Jun, HAN Xiong. The effects of increasing CO<sub>2</sub> on the growths, yield and nutrient uptake of tomato cultivated in the greenhouse[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2018(6):180-187. (in Chinese)
- [4] 郑云普,李菲,侯毅凯,等.大气CO<sub>2</sub>浓度增加对作物光合性能及叶片水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2019,35(10):91-98.  
ZHENG Yunpu, LI Fei, HOU Yikai, et al. Effect of increasing CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and leaf water use efficiency of crops[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(10):91-98. (in Chinese)

- [5] XIN M, SHUANG L, YUE L, et al. Effectiveness of gaseous CO<sub>2</sub> fertilizer application in China's greenhouses between 1982 and 2010[J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2015, 11:63 - 66.
- [6] ERICKSON S E. Pipeline utilization enhancement including carbon dioxide gas transmission, distribution, and delivery technique: 6108967[P]. 2000-08-29.
- [7] 赵鹏, 单慧勇, 臧自雄. 温室二氧化碳气肥补施控制系统设计[J]. *农业装备与车辆工程*, 2014, 52(10):7 - 9.
- [8] 石磊, 周黎琼. 双组分固体挂袋式二氧化碳缓释气肥剂及其制造方法: CN1849870[P]. 2006-10-25.
- [9] 冉毅, 蔡萍, 黄家鹤, 等. 国内外沼气提纯生物天然气技术研究及应用[J]. *中国沼气*, 2016, 34(5):61 - 66.  
RAN Yi, CAI Ping, HUANG Jiahu, et al. Research and application of biogas purification technology at home and abroad[J]. *Chinese Biogas*, 2016, 34(5):61 - 66. (in Chinese)
- [10] SCARLAT N, DALLEMAND J F, FAHL F. Biogas: developments and perspectives in Europe[J]. *Renewable Energy*, 2018, 129:457 - 472.
- [11] ANGELIDAKI I, TREU L, TSAPEKOS P, et al. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives[J]. *Biotechnology Advances*, 2018, 36(2):452 - 466.
- [12] AWE O W, ZHAO Y, NZIHOU A, et al. Review of biogas utilization, purification and upgrading technologies[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2017, 8(2):267 - 283.
- [13] ABDEEN F R, MEL M, JAMI M S, et al. A review of chemical absorption of carbon dioxide for biogas upgrading[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016, 24(6):693 - 702.
- [14] 晏水平. 膜吸收和化学吸收分离 CO<sub>2</sub> 特性的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.  
YAN Shuiping. Characteristics of membrane absorption and chemical absorption CO<sub>2</sub> separation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- [15] JIANG K, LI K, YU H, et al. Piperazine-promoted aqueous-ammonia based CO<sub>2</sub> capture: process optimization and modification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 347:334 - 342.
- [16] GHATAK M, MAHANTA P. Biogas purification using chemical absorption[J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2016, 8(3):1600 - 1605.
- [17] 方梦祥, 周旭萍, 王涛, 等. CO<sub>2</sub> 化学吸收剂[J]. *化学进展*, 2015, 27(12):1808 - 1814.  
FANG Mengxiang, ZHOU Xuping, WANG Tao, et al. CO<sub>2</sub> chemical absorbent[J]. *Progress in Chemistry*, 2015, 27(12):1808 - 1814. (in Chinese)
- [18] CHEN S, WANG Z, GUO X, et al. Effects of vertically heterogeneous soil salinity on tomato photosynthesis and related physiological parameters[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249(4):120 - 130.
- [19] PAN T, DING J, QIN G, et al. Interaction of supplementary light and CO<sub>2</sub> enrichment improves growth, photosynthesis, yield, and quality of tomato in autumn through spring greenhouse production[J]. *HortScience*, 2019, 54(2):246 - 252.
- [20] JIAO X C, SONG X M, ZHANG D L, et al. Coordination between vapor pressure deficit and CO<sub>2</sub> on the regulation of photosynthesis and productivity in greenhouse tomato production[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1):1 - 10.
- [21] 倪纪恒. 温室番茄生长发育模拟模型研究[D]. 南京:南京农业大学, 2005.  
NI Jiheng. Simulation model of growth and development of tomato in greenhouse [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [22] KHAISRI S, DEMONTIGNY D, TONTIWACHWUTHIKUL P, et al. CO<sub>2</sub> stripping from monoethanolamine using a membrane contactor[J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 376(1):110 - 118.
- [23] MANSOURIZADEH A. Experimental study of CO<sub>2</sub> absorption/stripping via PVDF hollow fiber membrane contactor[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2012, 90(4):555 - 562.
- [24] RAHIM N A, GHASEM N, AL-MARZOUQI M. Stripping of CO<sub>2</sub> from different aqueous solvents using PVDF hollow fiber membrane contacting process[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21:886 - 893.
- [25] YEH J T, PENNLINE H W, RESNIK K P. Study of CO<sub>2</sub> absorption and desorption in a packed column[J]. *Energy & Fuels*, 2001, 15(2):274 - 278.
- [26] 顾光临. 二氧化碳化学吸收剂的复配研究[D]. 北京:北京化工大学, 2010.  
GU Guanglin. Study on the compounding of carbon dioxide chemical absorbent[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010. (in Chinese)
- [27] 薛义霞, 李亚灵, 温祥珍. 空气湿度对高温下番茄光合作用及坐果率的影响[J]. *园艺学报*, 2010, 39(3):59 - 66.  
XUE Yixia, LI Yaling, WEN Xiangzhen. Effects of air humidity on the photosynthesis and fruit-set of tomato under high temperature[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 39(3):59 - 66. (in Chinese)
- [28] 刘贤赵, 康绍忠. 不同生长阶段遮荫对番茄光合作用、干物质分配与叶 N、P、K 的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(12):2264 - 2271.  
LIU Xianzhao, KANG Shaozhong. Effects of shading on photosynthesis, dry matter partitioning and N, P, K concentrations in leaves of tomato plants at different growth stages[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12):2264 - 2271. (in Chinese)
- [29] 胡瑾, 田紫薇, 汪健康, 等. 基于离散曲率的温室 CO<sub>2</sub> 优化调控模型研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(9):337 - 346.  
HU Jin, TIAN Ziwei, WANG Jiankang, et al. Carbon dioxide optimal control model based on discrete curvature[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9):337 - 346. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190939&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190939&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.039. (in Chinese)
- [30] TING L, YUHAN J, MAN Z, et al. Universality of an improved photosynthesis prediction model based on PSO - SVM at all growth stages of tomato[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(2):63 - 73.
- [31] 邹志荣, 邵孝侯. 设施农业环境工程学[M]. 北京:中国农业出版社, 2016.
- [32] 杨晶. 荆州市生态环境系统敏感性评价方法及应用研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2007.  
YANG Jing. Study on sensitivity evaluation of ecological environment system in Jingzhou[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)