

# 聚- $\gamma$ -谷氨酸对小白菜生长和光合作用的影响

孙刚忠<sup>1</sup> 谭启玲<sup>1</sup> 胡承孝<sup>1</sup> 陈守文<sup>2</sup> 郑苍松<sup>1</sup> 孙学成<sup>1</sup>

1. 华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070;

2 华中农业大学农业微生物学国家重点实验室, 武汉 430070

**摘要** 采用水培方法研究了聚- $\gamma$ -谷氨酸对小白菜地上部生长、叶片叶绿素含量、光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )的影响。结果表明,随着养分含量的降低,聚- $\gamma$ -谷氨酸处理小白菜较对照叶片  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 和  $C_i$ 均有提高;在 90%养分含量下施加聚- $\gamma$ -谷氨酸显著提高了叶片中叶绿素 a 的含量;在 70%~100%养分含量范围内,小白菜地上部产量较对照均有所提高,说明聚- $\gamma$ -谷氨酸可通过降低气孔限制值、增加叶绿素含量和提高吸收光强的能力,从而促进小白菜对光能的捕获及其转化,提高其光能利用效率。

**关键词** 聚- $\gamma$ -谷氨酸;小白菜;光合速率;气孔导度;胞间  $CO_2$  浓度;蒸腾速率

**中图分类号** S 145.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2012)02-0216-04

目前,全球肥料施用量每年巨幅增长,然而肥料的利用效率却逐年下降,我国尤为突出,而且肥料的残留与流失也会带来更多的环境问题<sup>[1]</sup>。因此,如何提高肥料利用效率、降低肥料流失量、建立合理的施肥体系成为我国肥料产业未来发展的方向<sup>[2-4]</sup>。多年来人们对肥料的增效因子进行了大量的研究,这些增效因子主要包括腐植酸类、植物生长调节剂、多种矿质营养元素复合和高分子聚合物四大类,其中高分子聚合物以其添加量少、成本低、促进植物生长效果明显等优势而越来越受到重视。聚- $\gamma$ -谷氨酸(poly- $\gamma$ -glutamic acid,  $\gamma$ -PGA)因其水剪性强、保水性好、具有良好的生物相容性、生物可降解性、对金属离子具有强的吸附性,在农业领域具有良好的发展前景<sup>[5-6]</sup>。

光合作用是植物生长发育的基础,为植物的生长提供所必需的物质和能量,是影响植物产量和品质的重要因素。本试验在水培体系中加入  $\gamma$ -PGA,探讨  $\gamma$ -PGA 对小白菜叶片光合气体交换参数、叶绿素含量的影响,从提高光合转化的角度分析  $\gamma$ -PGA 对小白菜生长的调控作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验在华中农业大学微量元素研究中心进

行, $\gamma$ -PGA 由华中农业大学农业微生物学国家重点实验室提供;供试小白菜品种为楚农上海青。

### 1.2 试验设计

挑选健壮饱满的种子消毒后在 25 °C 培养箱中催芽 24 h 后取出于温室中培养。将育好的小白菜幼苗移植到黑色塑料钵(15 cm×24 cm)中,加入 1/4 Hoagland 营养液和全量 Arnon 营养液进行培养。7 d 后,将 Hoagland 营养液换为全量营养液,其营养液组成为  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  495 mg/L,  $KNO_3$  607 mg/L,  $NH_4H_2PO_4$  115 mg/L,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  493 mg/L,  $H_3BO_3$  2.86 mg/L,  $MnCl_2 \cdot 4H_2O$  1.81 mg/L,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  0.22 mg/L,  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  0.08 mg/L,  $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$  0.02 mg/L, EDTA-Fe 3~5 mg/L。同时试验分为 5 个大组,一组每钵加 1.5 L 完全营养液,其余各组的营养液含量依次减为原来的 90%、80%、70%、60%,每一大组再分为 2 小组,每组  $\gamma$ -PGA 的终质量分数分别为 0(CK)、200 mg/kg(T),每钵栽植 4 株幼苗,试验设 3 次重复,共 30 盆,随机排列。植株用打孔的泡沫板支持,脱脂棉固定。每周更换营养液 1 次,同时加入对应浓度的  $\gamma$ -PGA,30 d 时收获幼苗,称鲜质量。

### 1.3 小白菜叶绿素含量的测定

在小白菜培养 28 d 时用 80%丙酮浸提比色法

收稿日期: 2011-04-08

基金项目: 湖北省科技攻关重大专项(2008ABA001)

孙刚忠, 硕士研究生, 研究方向: 植物营养与施肥。E-mail: sungangzhong@webmail.hzau.edu.cn

通讯作者: 谭启玲, 博士, 副教授, 研究方向: 植物营养与施肥及废弃物利用。E-mail: qltan@mail.hzau.edu.cn

测量。

### 1.4 小白菜光合作用气体交换参数的测定

采用英国 PP-Systems 公司生产的 CIRAS-2 全自动便携式光合作用测定系统在有效光合辐射 (PAR) 为  $1\ 500\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的条件下,在小白菜生长到 28 d 测定各处理下倒数第 4 片叶的净光合

速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 和蒸腾速率 ( $T_r$ ),气孔限制值 ( $L_s$ ) 按照  $L_s = 1 - (C_i/C_0)$  计算,其中  $C_0$  代表气室中  $\text{CO}_2$  浓度;水分利用效率由公式  $E_{\text{wu}} = P_n/T_r$  计算。光合作用测定时间为 09:30—10:30。所有数据采用 Excel 和统计分析软件 SAS 8.1 进行分析。

表 1 聚- $\gamma$ -谷氨酸对小白菜叶片光合作用和呼吸作用的影响<sup>1)</sup>

Table 1 Effects of  $\gamma$ -PGA on the photosynthesis and transpiration of Chinese cabbage leaves

营养液养分含量/% Concentration of nutrient solution	处理 Treatment	净光合速率/ ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) $P_n$	气孔导度/ ( $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) $G_s$	蒸腾速率/ ( $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) $T_r$	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度/ ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) $C_i$
100	CK	16.35 a	0.30 ab	3.95 c	299.50 ab
	T	18.30 a	0.37 a	4.86 a	308.00 a
90	CK	11.25 c	0.24 bc	2.97 e	264.00 dc
	T	17.05 a	0.31 ab	4.60 ab	307.50 a
80	CK	14.55 abc	0.19 c	3.31 de	249.50 dc
	T	14.90 abc	0.25 bc	4.09 bc	268.50 dc
70	CK	11.75 bc	0.20 c	3.04 e	242.00 d
	T	14.05 abc	0.27 bc	4.07 bc	278.00 bc
60	CK	10.85 c	0.18 c	3.00 e	244.00 d
	T	16.20 ab	0.23 bc	3.78 dc	260.50 bc

1) 不同小写字母代表 ( $P < 0.05$ ) 的显著水平,下同 Different lower letters mean the probability level of  $P < 0.05$ . The same as follows.

## 2 结果与分析

### 2.1 聚- $\gamma$ -谷氨酸对小白菜叶片光合作用和呼吸作用的影响

由表 1 可知,随着营养液养分含量的降低,施加  $\gamma$ -PGA 处理和未施处理的  $P_n$  都有所下降,但在 90%、60% 养分含量时施加  $\gamma$ -PGA 比对照分别提高了 51.56%、49.31%,达到显著水平,其他营养水平也有提高的趋势,但不显著。 $T_r$  的大小可衡量植物叶片蒸腾强度和气孔开放程度,随着溶液养分含量的降低,施加  $\gamma$ -PGA 处理和未施处理的  $T_r$  都表现出下降的趋势,并且施加  $\gamma$ -PGA 处理均显著高于未施处理,增幅为 23.19%~54.97%;随着营养液浓度的降低,小白菜  $G_s$  均表现出下降趋势,但施加  $\gamma$ -PGA 处理却均高于未施处理,增幅为 22.52%~31.11%;各处理  $C_i$  均随着养分含量的降低而有下降的趋势,在 90%、70% 时  $\gamma$ -PGA 处理显著高于未

施处理,分别提高了 43.50 和 36.00  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,其他处理均有提高趋势,但差异不显著。

以上结果表明施加  $\gamma$ -PGA 可提高小白菜的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$ ,另一方面也可缓解由养分降低引起的光合作用下降的胁迫。

### 2.2 聚- $\gamma$ -谷氨酸对小白菜叶片水分利用效率和气孔限制值的影响

从表 2 可以看出,随着营养液养分含量的降低,施加  $\gamma$ -PGA 处理和对照处理均出现  $L_s$  升高的趋势,说明气孔闭合程度加大。90% 和 70% 水平施加  $\gamma$ -PGA 后小白菜  $L_s$  显著低于未施  $\gamma$ -PGA 处理,降低幅度分别为 30.00% 和 23.74%,其他养分水平降低差异不显著。施加  $\gamma$ -PGA 对小白菜的水分利用效率影响不显著。

以上结果表明施加  $\gamma$ -PGA 可以降低保卫细胞的  $L_s$ ,缓解由于养分降低导致的气孔阻力加大的影响,但对小白菜的水分利用效率影响不明显。

表 2 聚- $\gamma$ -谷氨酸对小白菜叶片水分利用效率和气孔限制值的影响

Table 2 Effects of  $\gamma$ -PGA on the water use efficiency and  $L_s$  of Chinese cabbage leaves

项目 Items	处理 Treatment	营养液养分含量/% Concentration of nutrient solution				
		100	90	80	70	60
气孔限制值 $L_s$	CK	0.314 bcde	0.360 abc	0.385 ab	0.396 a	0.383 ab
	T	0.285 de	0.252 e	0.332 abcd	0.302 cde	0.342 abcd
水分利用效率/( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) Water use efficiency	CK	4.57 a	3.81 ab	4.17 ab	3.88 ab	4.44 a
	T	4.46 a	3.46 b	3.83 ab	4.18 ab	4.36 a

表 3 聚- $\gamma$ -谷氨酸对小白菜叶片叶绿素含量和地上部生物量的影响  
Table 3 Effects of  $\gamma$ -PGA on chlorophyll and the biomass of Chinese cabbage leaves

营养液养分含量/% Concentration of nutrient solution	处理 Treatment	叶绿素 a/(mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b/(mg/g) Chlorophyll b	类胡萝卜素/(mg/g) Carotenoids	每盆地上部鲜质量/g Fresh weight above ground per pot
100	CK	0.828 b	0.626 bc	0.081 a	90.58 bcd
	T	0.873 b	0.641 bc	0.060 a	111.83 a
90	CK	0.873 b	0.676 bc	0.072 a	83.46 cde
	T	1.104 a	0.844 a	0.076 a	102.93 ab
80	CK	0.780 b	0.555 bc	0.073 a	78.62 cde
	T	0.955 ab	0.704 b	0.071 a	103.49 ab
70	CK	0.816 b	0.628 bc	0.071 a	73.61 de
	T	0.904 ab	0.702 b	0.069 a	92.13 bc
60	CK	0.741 b	0.533 c	0.080 a	72.09 e
	T	0.856 b	0.616 bc	0.082 a	68.97 e

### 2.3 聚- $\gamma$ -谷氨酸对小白菜叶绿素含量和地上部生物量的影响

由表 3 可知,  $\gamma$ -PGA 处理的小白菜叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 在 90% 养分含量时均显著高于未施  $\gamma$ -PGA 处理, 增幅分别为 26.46% 和 24.85%, 在其他营养水平时也均略有增加, 但差异不显著; 类胡萝卜素含量变化不显著, 说明  $\gamma$ -PGA 处理可提高小白菜叶片叶绿素含量, 从而促进光能的吸收和转化。

当养分含量为 100% 时, 加入  $\gamma$ -PGA 比对照增产 24%, 这说明  $\gamma$ -PGA 具有增产效果; 当营养液养分含量为 100%、90%、80% 和 70% 时, 加入 200 mg/kg  $\gamma$ -PGA 比各自对照分别增产 24%、23%、32% 和 25%, 且差异均达到显著水平, 这说明  $\gamma$ -PGA 能促进肥料的吸收与利用, 同时当加入  $\gamma$ -PGA 时, 70% 养分含量的营养液中小白菜生长量与 100% 的生长量相当, 这说明施用  $\gamma$ -PGA 可节约 30% 左右的养分。这一方面表明  $\gamma$ -PGA 可以促进小白菜的生长, 另一方面说明在养分较缺乏的时候,  $\gamma$ -PGA 对小白菜增产效果尤为明显, 即  $\gamma$ -PGA 具有保肥增效的作用。在 60% 时差异不显著, 可能是施用  $\gamma$ -PGA 发挥作用也需要一定的肥力基础。

## 3 讨论

植物叶片光合速率的增加与其自身因素有关, 主要由气孔因素导致的胞间  $\text{CO}_2$  供应增加和非气孔因素导致的光能转化效率提高所引起。一般情况下,  $C_i$  和  $G_s$  增加, 说明气孔因素占主导地位; 反之则为非气孔因素所致<sup>[7]</sup>。光合色素的含量直接影响叶绿体对光能的吸收、传递以及在 PS I、PS II 之间的分配和转化。叶绿素 a 和叶绿素 b 为截获光能的主要色素, 类胡萝卜素是辅助色素, 能将所吸收的光能

传递给叶绿素 a 和 b, 使其吸收的光能最终也用于光合作用<sup>[8-9]</sup>。本研究结果显示,  $\gamma$ -PGA 对小白菜叶片  $C_i$  和  $G_s$  的促进效果较大, 说明  $\gamma$ -PGA 促进小白菜叶片光合速率的提高可能与气孔因素有关, 降低气孔限制值, 增加叶绿素含量, 提高吸收光强的能力, 从而促进小白菜对光能的捕获及其转化, 提高其光能利用效率和加快  $\text{CO}_2$  的同化。已有研究表明  $\gamma$ -PGA 可以改变植物细胞的渗透压, 从而抵抗干旱胁迫<sup>[10]</sup>, 这说明  $\gamma$ -PGA 有可能通过影响保卫细胞的开闭来调节气体的进出, 从而调节光合作用的强度。

高聚物可与  $\text{Ca}^{2+}$  形成大分子复合物, 从而作为激发子激活植物生长和防御中的相关反应<sup>[11]</sup>; 光照也可通过膜上的光敏色素使叶绿体内游离  $\text{Ca}^{2+}$  浓度提高, 活化依赖于  $\text{Ca}^{2+}$ /CaM 的 NAD 激酶, 促使 NADP 合成, 从而提高其  $P_n$ <sup>[12]</sup>; 另外, 外源施 Ca 可提高植物叶片的  $P_n$ 、AQY、CE 和 RuBPCase 活性<sup>[13-14]</sup>, 对 PS II 光化活性和原初光能转化效率增加也有明显的促进作用<sup>[15]</sup>。因此本试验中,  $\gamma$ -PGA 促进光合效率的提高, 可能与其激活叶片的  $\text{Ca}^{2+}$ /CaM 信号系统有关。

另外, 从元素组成来说 N 和 Mg 是叶绿素的组成部分, Mn 和 Zn 是叶绿素合成过程中酶促反应的辅助因子; Zn 是植物碳酸酐酶的组成成分, 缺 Zn 时引起碳酸酐酶和 RuBPCase 活性的下降, 从而影响  $\text{CO}_2$  的同化<sup>[16]</sup>。笔者所在课题组已有的研究表明  $\gamma$ -PGA 可促进小白菜对上述养分离子的吸收, 这可能是  $\gamma$ -PGA 提高光合速率的另外一个原因。

**致谢** 在光合参数测定过程中得到华中农业大学作物遗传改良国家重点实验室范晓磊同学的热心帮助, 在此表示感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 毕磊,谭启玲,胡承孝,等.养分管理措施对丹江口库区橘园氮磷流失的影响[J].华中农业大学学报,2011,30(4):474-478.
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [3] 李继福,王寅,李小坤,等.鄂东地区油菜施钾效果及适宜用量研究[J].华中农业大学学报,2011,30(6):722-726.
- [4] 张木,胡承孝,孙学成,等.叶面喷施微量元素和氨基酸对小白菜产量及品质的影响[J].华中农业大学学报,2011,30(5):613-617.
- [5] TARUI R Y, IIDA H, ONO E, et al. Biosynthesis of poly- $\gamma$ -glutamic acid in plants; transient expression of poly- $\gamma$ -glutamate synthetase complex in tobacco leaves[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2005, 100(4):443-448.
- [6] 陈雄. 枯草芽胞杆菌高产聚- $\gamma$ -谷氨酸及其应用研究[D]. 武汉:华中农业大学图书馆,2005.
- [7] EDDY A R, CHAITANYA K V, VIVEKANANDAN M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(11):1189-1202.
- [8] 蒋跃林,姚玉刚,张庆国,等.大气二氧化碳浓度升高条件下大豆光合色素含量的变化[J].作物研究,2006,20(2):144-146.
- [9] 高志奎,王梅,任士福,等.定植密度和剪叶处理对日光温室番茄冠层光截获性能的影响[J].华中农业大学学报,2011,30(2):161-166.
- [10] 朱安婷,蒋友武,谢国生,等.外源聚- $\gamma$ -谷氨酸对水稻幼苗耐旱性和渗透调节的影响[J].核农学报,2010,24(6):1269-1273.
- [11] YOKOSE T, NISHIKAWA T, YAMAMOTO Y, et al. Growth-promoting effect of alginate oligosaccharides on a unicellular marine microalga, *Nannochloropsis oculata* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2009, 73(2):450-453.
- [12] 任丽花,翁伯琦,方金梅.施钙增强作物抗旱力的研究进展[J].亚热带农业研究,2005,1(3):19-25.
- [13] 朱晓军,杨劲松,梁永超,等.盐胁迫下钙对水稻幼苗光合作用及相关生理特性的影响[J].中国农业科学,2004,37(10):1497-1503.
- [14] 陈向明,郑国生.钙对保护地栽培牡丹光合特性的影响[J].园艺学报,2001,28(6):572-574.
- [15] 李利红,马培芳,杨亚军,等.外源  $Ca^{2+}$  对高温强光胁迫下小麦叶绿体 D1 蛋白磷酸化及光系统 II 功能的影响[J].应用生态学报,2010,21(3):683-688.
- [16] 施木田,陈如凯.锌硼营养对苦瓜叶片碳氮代谢的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(2):198-201.

## Growth and photosynthesis characteristics of Chinese cabbage under poly- $\gamma$ -glutamic acid

SUN Gang-zhong<sup>1</sup> TAN Qi-ling<sup>1</sup> HU Cheng-xiao<sup>1</sup>  
CHEN Shou-wen<sup>2</sup> ZHENG Cang-song<sup>1</sup> SUN Xue-cheng<sup>1</sup>

1. College of Resources and Environment/Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. State Key Laboratory of Agricultural Microbiology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract** A hydroponic experiment was used to study the effects of poly- $\gamma$ -glutamic acid addition on the growth of Chinese cabbage and its photosynthesis characteristics, such as net photosynthesis rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ), and transpiration rate ( $T_r$ ). The results shows that the level of  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $T_r$  and  $C_i$  in Chinese cabbage leaf treated with poly- $\gamma$ -glutamate acid increases compared with control when the concentration of nutrient decreases. The application of poly- $\gamma$ -glutamate acid with 90% nutrient concentration significantly increased chlorophyll a in Chinese cabbage leaves. When the nutrient concentration was 70%-100%, the above ground yield of cabbage improved compared with control, meaning that poly- $\gamma$ -glutamate acid can promote transformation of light, energy capture, increase the energy efficiency through reducing the stomatal limitation, increasing the chlorophyll content and the capacity of absorption of light intensity.

**Key words** poly- $\gamma$ -glutamic acid; Chinese cabbage; net photosynthesis rate; stomatal conductance; intercellular  $CO_2$  concentration; transpiration rate