

# $\gamma$ -聚谷氨酸对番茄穴盘育苗基质矿质养分供应及幼苗生长发育的影响

褚群, 董春娟, 尚庆茂\*

(农业部园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081)

**摘要:**【目的】研究聚谷氨酸不同加入量对基质理化性状和蔬菜生长的影响, 可以为其在番茄穴盘育苗中的合理应用提供依据。【方法】以草炭、蛭石、珍珠岩(3:1:1, v/v)混合物料为育苗基质, 50孔塑料穴盘为育苗容器进行盆栽试验。基质适宜添加量试验: 播种前在基质中混入 $\gamma$ -聚谷氨酸( $\gamma$ -PGA) 0、1、3、5、10 kg/m<sup>3</sup>, 调查了添加 $\gamma$ -聚谷氨酸后番茄穴盘育苗基质理化、生物学性状及幼苗生长发育参数的动态变化。顶部灌施适宜用量试验: 在播种后16 d, 将 $\gamma$ -聚谷氨酸0、1、3、5、10 g/L  $\gamma$ -PGA 溶于水溶性肥料溶液(20-20-20)进行顶部灌施, 肥料氮(N)浓度为200 mg/L, 施用量为1 L/tray, 测定了播种后36 d 番茄幼苗生长发育参数。【结果】1) 基质添加 $\gamma$ -聚谷氨酸显著提高了基质初始持水孔隙度、最大持水量、铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾、交换性镁含量和EC值, 降低了通气孔隙度和pH值, 增强了番茄穴盘苗生长发育过程中基质速效氮、速效磷、速效钾和交换性镁供应能力, 显著提高了番茄穴盘苗生长发育后期基质过氧化氢酶活性和中性磷酸酶活性; 这些有效作用随 $\gamma$ -PGA添加量的增加而显著增加, 不同添加量处理间差异显著。2) 基质添加 $\gamma$ -聚谷氨酸, 随着添加量增加, 番茄苗叶片叶绿素含量呈逐步增加趋势, 根系活力峰值则出现在添加量3 kg/m<sup>3</sup>水平; 3)  $\gamma$ -聚谷氨酸无论基质添加或顶部灌施, 对番茄穴盘苗茎叶都表现出促进生长的作用, 对根系发育却表现出一定的抑制作用; 4) 基质添加 $\gamma$ -聚谷氨酸对番茄穴盘苗生长发育的促进作用还表现出明显的延迟效应, 在幼苗生长发育后期的效果显著优于前期。【结论】番茄穴盘育苗施用 $\gamma$ -聚谷氨酸能增强基质水分、养分供应能力, 促进番茄穴盘苗后期生长发育。

**关键词:** 番茄; 穴盘苗;  $\gamma$ -聚谷氨酸

中图分类号: S625.5; S642.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)03-0855-08

## Effects of $\gamma$ -poly glutamic acid on substrate mineral nutrient supply and growth of tomato plug seedlings

CHU Qun, DONG Chun-juan, SHANG Qing-mao\*

(Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops, Ministry of Agriculture;  
Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** 【Objectives】 The objective is to evaluate effects of  $\gamma$ -poly-glutamic acid ( $\gamma$ -PGA) on tomato plug seedling production. 【Methods】 Tomato seedlings were grown in the 50 cell-plug trays, with substrates containing peat moss, vermiculite and perlite (3:1:1, v/v) as the growth medium.  $\gamma$ -PGA was applied in the substrates by mixing with substrate before the sowing. Changes in physical, chemical and biological properties of the substrates and growth parameters of tomato plug seedlings caused by  $\gamma$ -PGA addition were measured.  $\gamma$ -PGA was applied by overhead irrigation 16 days after the sowing. The growth parameters of tomato plug seedlings were measured. 【Results】 In the beginning of the treatment,  $\gamma$ -PGA improves the water filled porosity, water holding capacity, EC value, and the contents of  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N, Olsen-P, readily available K, exchangeable Mg in the substrates, and reduces the pH values. At the seedling growth stage,  $\gamma$ -PGA increases the available N, P, K and Mg contents in the substrate, and especially improves the activities of phosphatase and catalase at the later growth stage. For the tomato seedlings, the chlorophyll contents are increased with the increasing of  $\gamma$ -PGA. The highest root activity is obtained in the treatment of 3 kg/m<sup>3</sup>  $\gamma$ -PGA.  $\gamma$ -PGA mainly improves the shoot growth but restrains the root growth

收稿日期: 2014-9-24

接受日期: 2015-1-27

网络出版日期: 2015-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31172001); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-25); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303014)资助。

作者简介: 褚群(1982—), 女, 山东潍坊人, 博士, 主要从事蔬菜苗期发育生理及分子生物学研究。E-mail: chuqun111@163.com

\* 通信作者 E-mail: shangqingmao@caas.cn

applied by either mixing with the substrates before the sowing or watering with  $\gamma$ -PGA solution.  $\gamma$ -PGA shows a delayed effect on the growth of tomato seedlings, and the effect is much better for the later-stage seedlings than early-stage seedlings. **【Conclusions】**  $\gamma$ -PGA application can enhance the water and fertilizer retention capacity of substrates, and therefore improve the growth of tomato seedlings.

**Key words:** tomato; plug seedling;  $\gamma$ -poly glutamic acid

穴盘育苗节能、省工,适于机械化作业,广泛应用于蔬菜、烟草、水稻、观赏植物、林木生产<sup>[1]</sup>。但是,穴盘育苗单株根系发育空间小,且采用人工混配轻型基质,通气孔隙度大,保水保肥能力弱<sup>[2]</sup>,因此,基质水肥适量稳定供应对于穴盘壮苗培育至关重要。

聚谷氨酸( $\gamma$ -poly glutamic acid,  $\gamma$ -PGA),是微生物发酵产生的一种阴离子自然聚合物,属于 $\alpha$ -氨基和 $\gamma$ -羧基之间经酰胺键连接构成的同型聚酰胺,具有水溶性和粘着性,易被生物降解,不含毒性,对环境友好,以往主要应用于医药、食品、化妆品、饲料、环保等行业<sup>[3]</sup>,应用于农业则相对较晚。 $\gamma$ -PGA与其他氨基酸多聚体功能类似,能够通过螯合作用减少矿质养分冲淋率,提高肥料的利用效率,促进作物的生长发育,起到肥料增效剂作用<sup>[4-5]</sup>。 $\gamma$ -PGA与尿素混合施用或尿素包衣施用,有助于氮的微生物固定和缓慢释放,盆栽小麦和田间种植小麦氮肥表现利用效率与单纯施用尿素相比分别提高11.8%~14.0%和11.3%~11.4%,田间增产7.2%<sup>[6]</sup>,用红薯和豆腐渣培养芽孢杆菌生产的 $\gamma$ -PGA显著提高了黄瓜幼苗根系、茎叶干物质量和根冠比<sup>[7]</sup>,用菜子粕培养芽孢杆菌生产的 $\gamma$ -PGA显著提高了西瓜幼苗株高和茎叶干物质量<sup>[8]</sup>, $\gamma$ -PGA用于茄子、结球甘蓝、草莓、水稻、油菜、棉花,也表现出明显的增产作用<sup>[9-13]</sup>。本研究将通过测定 $\gamma$ -PGA施用后基质物理化学性状及番茄穴盘苗生长发育参数,评价 $\gamma$ -PGA在番茄穴盘育苗中的应用效果,旨在为 $\gamma$ -PGA在番茄穴盘育苗中的应用提供参考依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

供试番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)品种‘中杂105’,由中国农业科学院蔬菜花卉研究所选育; $\gamma$ -PGA购自北京元嘉禾农业科技有限公司,由台湾味丹企业股份有限公司生产(产品标准号Q/CY SYZ0001-2013, $\gamma$ -PGA含量8%);室内分析测试所需化学试剂,购自北京化学试剂公司,AR级。

番茄幼苗培育所需水溶性复合肥(20-10-20,

20-20-20, The Scotts company, USA),购自北京大汉园景公司;50孔塑料穴盘(长 $\times$ 宽 $\times$ 高=53 cm $\times$ 28 cm $\times$ 5.5 cm),单穴容积55 cm<sup>3</sup>,购自浙江台州隆基塑业有限公司;基质配制所需草炭来自吉林辽源市禾本草炭厂,蛭石和珍珠岩来自河北灵寿县腾达矿产品加工厂,粒径2~5 mm。

### 1.2 试验设计与幼苗培养

$\gamma$ -PGA基质添加试验于2014年2月21日~4月15日在中国农业科学院蔬菜花卉研究所玻璃温室中进行。在基质混拌时,加入4 kg/m<sup>3</sup>白云石灰石粉和0、1、3、5、10 kg/m<sup>3</sup>  $\gamma$ -PGA。每个 $\gamma$ -PGA添加量作为一个处理,共5个处理,每处理4次重复,每穴盘为一次重复,随机区组排列。育苗期间,灌水采用顶部喷灌方式,并分4次施用水溶性肥料溶液(20-10-20),肥料氮(N)浓度为25~100 mg/L。

$\gamma$ -PGA顶部灌施试验于2014年6月12日~7月18日在中国农业科学院蔬菜花卉研究所玻璃温室中进行。播种后16 d,将0、1、3、5、10 g/L  $\gamma$ -PGA溶于水溶性肥料溶液(20-20-20)进行顶部灌施,肥料氮(N)浓度为200 mg/L,施用量为1 L/tray,随后喷水200 mL/tray,将肥料溶液全部冲淋至基质。每 $\gamma$ -PGA浓度为一个处理,共5个处理,每处理3次重复,每穴盘为一次重复,随机区组排列。

育苗基质全部由草炭、蛭石、珍珠岩按3:1:1(v/v)混配而成。番茄种子经5% NaClO表面消毒10 min,无菌水冲淋3~4次,28 $^{\circ}$ C恒温培养箱催芽。种子萌发后,选择发芽一致的种子播入50孔塑料穴盘,覆盖1.5 cm厚蛭石,并充分灌水,直至穴盘底部排水孔有水滴出现。幼苗生长于温室自然温光环境条件,平均昼夜温度25 $\pm$ 3 $^{\circ}$ C/18 $\pm$ 3 $^{\circ}$ C,光照强度350  $\mu$ mol/(m<sup>2</sup>·s),空气相对湿度60%~80%。

### 1.3 测定方法

1.3.1 基质理化性状 用环刀法采取基质样品,再烘干,称重,测定基质容重,饱和称重法测定基质最大持水量和孔隙度<sup>[14]</sup>;基质、水1:5(v/v)浸提法测定pH、EC值;2 mol/L KCl浸提—靛酚蓝比色法

测定铵态氮<sup>[15]</sup>; 饱和硫酸钙溶液浸提—双波长紫外分光光度法测定硝态氮<sup>[16]</sup>; 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法测定速效磷<sup>[17]</sup>; 10% 硝酸钠溶液浸提—四苯硼钠比浊法测定速效钾<sup>[18]</sup>; 1 mol/L 中性乙酸铵浸提—EDTA 滴定法测定交换性钙和交换性镁<sup>[19]</sup>。

1.3.2 基质生物活性 采用荧光素二乙酸酯(FDA) 分光光度计法测定基质微生物活性<sup>[20]</sup>, 苯磷酸二氢钠法测定中性磷酸酶活性<sup>[21]</sup>, 高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性<sup>[22]</sup>。

1.3.3 幼苗表观形态和生理指标 每重复随机取 10 株幼苗, 分别用直尺和游标卡尺测定株高和茎粗, 扫描仪(ScanMaker i800)扫描和 LA-S 叶面积分析系统测定叶面积, 称重法测定茎叶、根鲜物质量和干物质量, 壮苗指数 = (茎粗/株高) × 全株干重。氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法测定根系活力<sup>[23]</sup>, 叶

绿素计(SPAD-502Plus)测定最新完全展开叶 SPAD 值, 每重复取样量 10 株。

1.3.4 数据处理 采用 SPSS 软件(IBM SPSS Statistics 21)应用 Duncan 法进行单因素方差分析, 比较不同处理间差异显著性( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 聚谷氨酸对番茄穴盘育苗基质物理性状的影响

表 1 表明, 基质添加  $\gamma$ -PGA 后, 容重和总孔隙度没有显著变化, 通气孔隙度显著减小, 持水孔隙度和最大持水量增加, 并随  $\gamma$ -PGA 添加量增加, 差异逐渐达到显著水平( $P < 0.05$ )。如  $\gamma$ -PGA 添加量为 10 kg/m<sup>3</sup> 时, 与未添加  $\gamma$ -PGA 对照相比, 通气孔隙度降低了 63.7%, 持水孔隙度和最大持水量分别增加了 11.3% 和 8.8%。

表 1 添加聚谷氨酸后番茄穴盘育苗基质主要物理性状指标

Table 1 Physical properties of tomato plug seedling substrates after added with the  $\gamma$ -PGA

$\gamma$ -PGA (kg/m <sup>3</sup> )	容重 Bulk density (mg/cm <sup>3</sup> )	总孔隙度 Total porosity (%)	通气孔隙度 Air-filled porosity (%)	持水孔隙度 Water-filled porosity (%)	最大持水量 Water holding capacity (%)
0	293.0 ± 4.2 a	71.2 ± 0.6 a	7.9 ± 1.1 a	63.3 ± 1.0 b	215.9 ± 2.3 b
1	292.2 ± 2.9 a	71.7 ± 0.1 a	6.0 ± 1.3 a	65.7 ± 1.4 b	224.8 ± 4.8 ab
3	297.5 ± 0.8 a	71.4 ± 0.6 a	3.4 ± 0.2 b	68.1 ± 0.7 a	228.8 ± 3.0 a
5	299.4 ± 0.7 a	71.4 ± 1.1 a	2.9 ± 0.4 b	68.4 ± 0.9 a	228.5 ± 2.7 a
10	293.1 ± 2.4 a	71.7 ± 0.3 a	2.9 ± 0.2 b	68.8 ± 0.2 a	234.8 ± 1.2 a

注(Notes): 同列数值后不同字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平 Values followed by different letters within the same column indicate significant differences at the 0.05 level among treatments. 基质添加  $\gamma$ -聚谷氨酸后, 稳定 2 小时, 然后取样测定 The samples are tested two hours after the addition of  $\gamma$ -poly glutamic acid.

### 2.2 聚谷氨酸对番茄穴盘育苗基质化学性状的影响

如图 1 所示, 基质初始 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、速效氮、速效磷、速效钾、交换性镁含量和 EC 值随  $\gamma$ -PGA 添加量增加而增加, 且均与  $\gamma$ -PGA 添加量呈极显著线性相关关系,  $r$  值分别为 0.996、0.993、0.997、0.938、0.971、0.833 和 0.994。随着幼苗生育期的推移, 受矿质养分吸收、淋洗以及施肥的多重影响,  $\gamma$ -PGA 对基质化学性状指标的作用也呈现出不同变化趋势。如 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量, 除 10 kg/m<sup>3</sup>  $\gamma$ -PGA 处理水平在播种后 26 d 仍保持较高水平外, 其余处理全部随生育期推移快速下降; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量, 播种 26 d, 峰值出现于添加量 5 kg/m<sup>3</sup> 水平, 至播种后 54 d, 随  $\gamma$ -PGA 添加量增加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量呈

现线性增加的趋势, 峰值出现在添加量 10 kg/m<sup>3</sup> 水平; 速效氮含量, 无论播种后 26 d 或 54 d, 均随  $\gamma$ -PGA 添加量增加而增加; 速效磷含量, 总体来看随  $\gamma$ -PGA 添加量增加而增加, 与初始变化趋势相似; 速效钾含量, 在播种后 26 d, 随  $\gamma$ -PGA 添加量增加表现出明显的增加趋势, 但至播种后 54 d, 各处理间差异缩小; 交换性钙含量, 在基质初始和播种后 26 d,  $\gamma$ -PGA 添加后没有显著变化, 但至播种后 54 d, 随  $\gamma$ -PGA 添加量增加表现出增加趋势; 交换性镁含量, 与速效钾含量变化趋势相似, 在播种后 26 d, 随  $\gamma$ -PGA 添加量增加表现出明显的增加趋势, 播种后 54 d 时  $\gamma$ -PGA 的作用减弱; EC 值、pH 受生育期影响较小, 基本保持初始变化趋势, 即随  $\gamma$ -PGA 添加量增加 EC 值逐渐增加, 而 pH 逐渐下降。

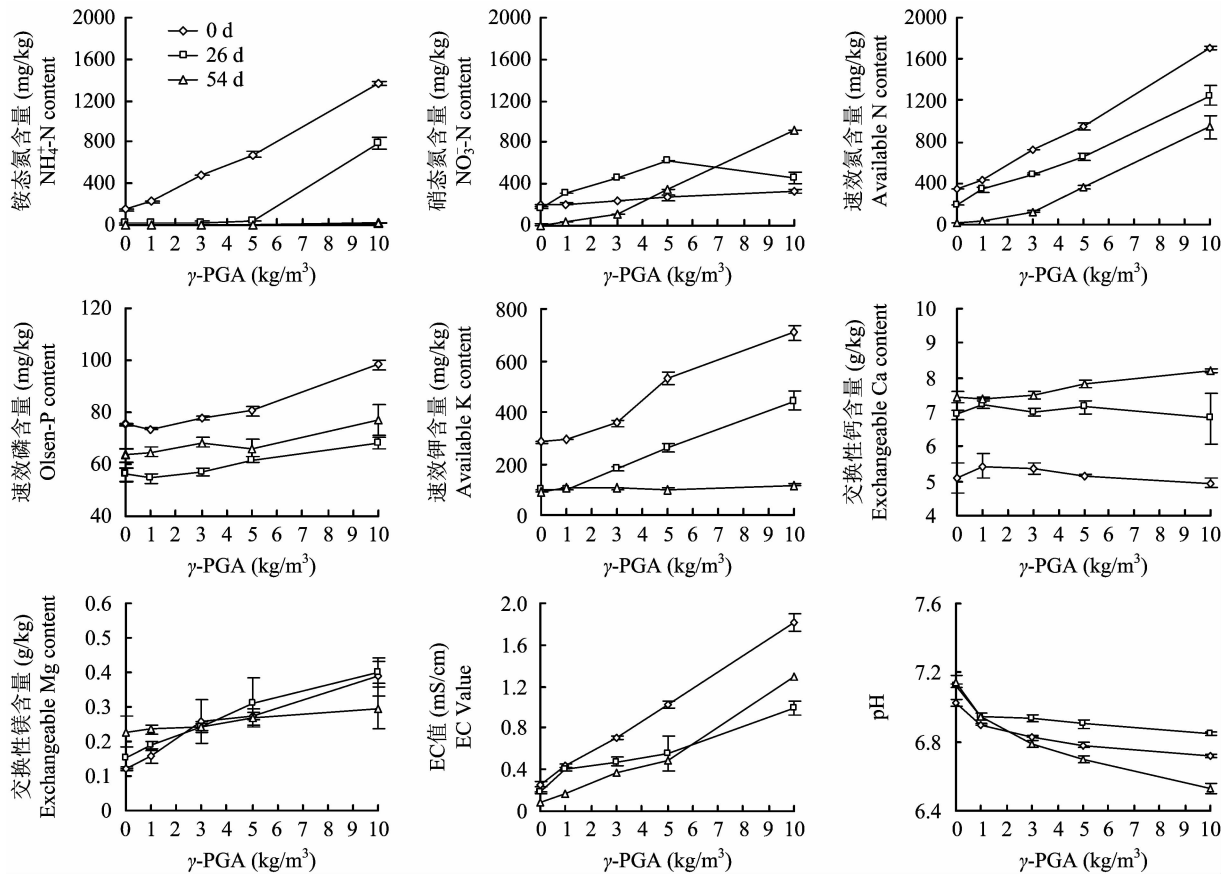


图1 聚谷氨酸添加对番茄穴盘育苗基质化学性状的影响

Fig.1 Effects of  $\gamma$ -PGA addition on chemical properties of tomato plug seedling substrates

[注 (Note): 速效氮为铵态氮和硝态氮之和; 基质添加  $\gamma$ -聚谷氨酸后, 稳定 2 小时, 然后取样, 风干后测定; 播种后 26 d、54 d, 每重复随机取 10 株幼苗基质, 挑除根系, 风干待测 Available N means the sum of  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_3^-$ -N. Samples were taken two hours after the addition of  $\gamma$ -poly glutamic acid and air-dried samples were tested. The substrate samples were also harvested at 26 d and 54 d after sowing. Each replicate contained 10 seedlings. Before air-drying, the roots were removed.]

### 2.3 聚谷氨酸对番茄穴盘育苗基质生物学活性的影响

如图 2 所示, 随着  $\gamma$ -PGA 添加量增加, 番茄穴盘育苗基质微生物活性、过氧化氢酶活性、中性磷酸酶活性均呈现升高的趋势, 尤其是番茄穴盘苗生长发育后期 (播种后 54 d),  $\gamma$ -PGA 对基质过氧化氢酶活性和中性磷酸酶活性的剂量效应更加明显, 均达到了显著差异水平。如  $\gamma$ -PGA 在  $10 \text{ kg/m}^3$  处理水平与未添加  $\gamma$ -PGA 处理相比, 播种后 54 d 过氧化氢酶活性和中性磷酸酶活性分别提高了 61.7% 和 42.4%, 而播种后 26 d, 分别提高了 78.9% 和 31.8%。

### 2.4 聚谷氨酸对番茄穴盘苗叶片叶绿素含量和根系活力的影响

$\gamma$ -PGA 添加还改变了番茄穴盘苗叶片叶绿素含量和根系活力。如图 3 所示, 随着  $\gamma$ -PGA 添加量

增加, 番茄穴盘苗叶片叶绿素含量显著提高。特别是播种后 54 d, 各处理之间均达到了显著差异水平 ( $P < 0.05$ )。  $\gamma$ -PGA 添加对番茄穴盘苗根系活力的作用效果因番茄幼苗发育阶段表现出不同变化趋势。在播种后 26 d, 番茄穴盘苗根系活力随  $\gamma$ -PGA 添加量增加而逐渐下降。至播种后 54 d,  $0 \sim 3 \text{ kg/m}^3$  添加量区间表现出显著增加, 而大于  $3 \text{ kg/m}^3$  的各处理间并未表现出显著差异。

### 2.5 聚谷氨酸对番茄穴盘苗生长发育的影响

如表 2 所示,  $\gamma$ -PGA 基质添加主要促进了番茄穴盘苗地上部茎叶的生长发育, 且在幼苗生长发育的后期 (播种后 54 d) 差异性达显著水平 ( $P < 0.05$ )。而对于根系, 在整个幼苗生育期均表现为抑制效应, 随基质  $\gamma$ -PGA 添加量增加, 根体积和根干重呈现出显著降低的趋势。由于  $\gamma$ -PGA 基质添加后促进了茎叶生长, 抑制了根系生长, 最终降低了

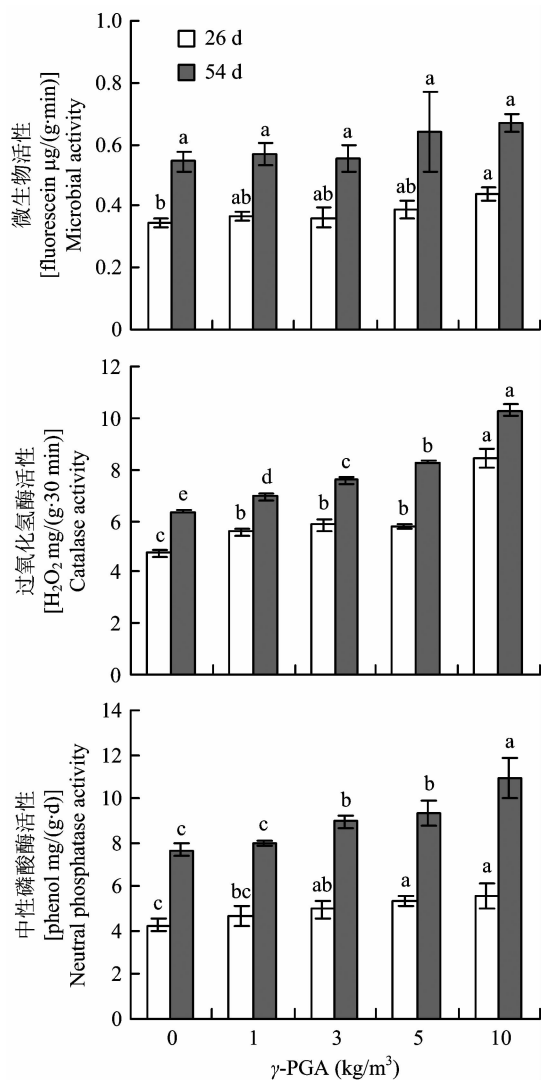


图2 聚谷氨酸添加对番茄穴盘育苗基质生物学活性的影响  
Fig. 2 Effects of  $\gamma$ -PGA addition on biological activities of tomato plug seedling substrates

[注 (Note): 柱上不同字母代表同一取样时间  $\gamma$ -聚谷氨酸处理间差异达到 0.05 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences at the 0.05 level among  $\gamma$ -poly glutamic acid treatments at the same sampling time. 播种后 26 d、54 d, 每重复随机取 10 株幼苗基质, 挑除根系, 4 $^{\circ}\text{C}$  保存待测 The substrate samples were harvested at 26 d and 54 d after sowing. Each replicate contained 10 seedlings. The samples without root contaminants were stored at 4 $^{\circ}\text{C}$  for test.]

幼苗根冠比。此外,  $\gamma$ -PGA 基质添加还显著降低了幼苗生长发育前期 (播种后 26 d) 壮苗指数。然而, 随着幼苗生长发育进程,  $\gamma$ -PGA 逐步提高了幼苗茎粗和茎叶干物质积累量, 幼苗壮苗指数在各处理间并未表现显著性差异。  $\gamma$ -PGA 顶部灌施, 显著提高了番茄穴盘苗株高、茎粗、叶面积、茎叶干重等地上部生长发育参数, 显著降低了根干重, 与  $\gamma$ -PGA 基质添加作用效果一致。

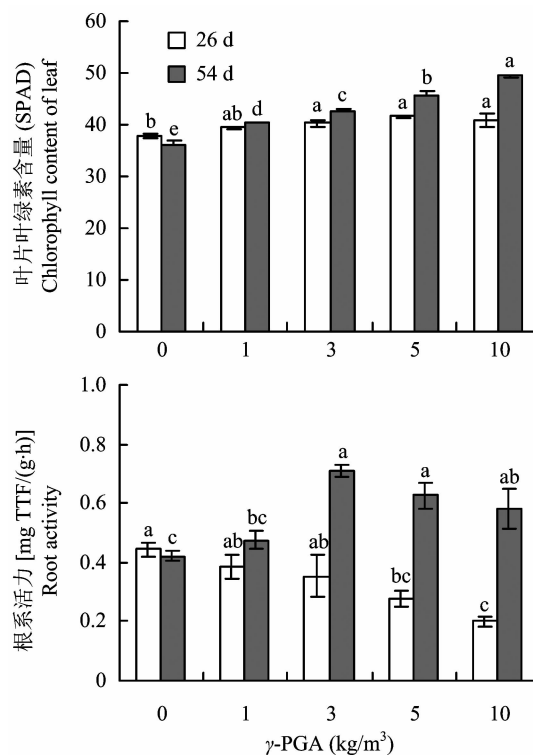


图3 聚谷氨酸添加对番茄穴盘苗叶片叶绿素含量和根系活力的影响

Fig. 3 Effects of  $\gamma$ -PGA addition on leaf chlorophyll contents and root activities of tomato plug seedlings

[注 (Note): 柱上不同字母代表同一取样时间  $\gamma$ -聚谷氨酸处理间差异达到 0.05 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences at the 0.05 level among  $\gamma$ -poly glutamic acid treatments at the same sampling time. 播种后 26 d、54 d, 每重复随机取 10 株幼苗 Ten plants per replicate were taken at 26 d and 54 d after sowing.]

### 3 讨论

蔬菜幼苗发育期间基质有效矿质养分始终处于动态平衡之中, 幼苗根系矿质养分吸收、养分形态转化、灌溉淋洗等消耗大量有效矿质养分, 而肥料施用、有机物矿化和微生物固氮又使基质有效矿质养分得以补充<sup>[24]</sup>。

$\gamma$ -PGA 带有大量羧基和酰胺基, 对阳离子矿质养分具有螯合作用或吸附作用, 能够防止养分淋失和提高养分有效性。  $\gamma$ -PGA 提高了钙离子和磷酸根的生物有效性, 减少铵态氮流失<sup>[25-28]</sup>。本研究添加  $\gamma$ -PGA 后提高了基质中速效氮、速效磷、交换性钙镁含量也证实了这种作用。微生物在固氮、分解有机氮、溶磷、溶钾等方面发挥着重要作用, 可以将植物不能直接利用的氮、磷、钾等养分转化为可以被植物吸收利用的形态<sup>[29-31]</sup>。微生物死亡时氮、磷、钾等养分又被释放到基质中被植物吸收利用, 微

表 2 聚谷氨酸施用对番茄穴盘苗生长发育的影响

Table 2 Effects of  $\gamma$ -PGA application on growth and development of tomato plug seedlings

$\gamma$ -PGA 添加方法 Method	添加量 Amount	播种后天数 Days after sowing (d)	株高 Shoot height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	叶面积 Leaf area (cm <sup>2</sup> /plant)	茎叶干重 Shoot dry weight (mg/plant)	根干重 Root dry weight (mg/plant)	根体积 Root volume (mL/plant)	根冠比 Root shoot ratio	壮苗指数 Seedling index
基质添加 Substrate	0	26	5.99 ± 0.10 a	1.58 ± 0.04 a	19.62 ± 0.82 a	38.71 ± 1.98 a	4.81 ± 0.38 a	0.08 ± 0.00 a	0.13 ± 0.01 a	43.52 ± 1.96 a
	1		5.39 ± 0.19 b	1.46 ± 0.03 b	13.04 ± 0.71 b	34.51 ± 2.18 ab	0.08 ± 0.00a	4.44 ± 0.28 ab	0.13 ± 0.01 a	38.95 ± 2.42 ab
	3		5.09 ± 0.11 b	1.46 ± 0.04 b	12.66 ± 0.26 b	33.20 ± 1.40 b	3.82 ± 0.35 b	0.08 ± 0.00 a	0.12 ± 0.01 ab	37.02 ± 1.68 b
	5		4.57 ± 0.07 c	1.37 ± 0.03 b	12.55 ± 0.64 b	27.59 ± 0.78 c	2.85 ± 0.30 c	0.06 ± 0.01 b	0.10 ± 0.01 ab	30.44 ± 1.05 c
	10		3.74 ± 0.16 d	1.21 ± 0.03 c	8.08 ± 0.23 b	17.89 ± 1.41 d	1.70 ± 0.15 d	0.04 ± 0.00 c	0.10 ± 0.00 b	19.60 ± 1.56 d
顶部灌溉 With irrigation (g/L)	0	54	17.68 ± 0.10 a	3.18 ± 0.02 b	90.51 ± 1.40 ab	430.43 ± 0.79 a	60.23 ± 1.42 a	0.81 ± 0.03 a	0.14 ± 0.00 a	88.38 ± 0.55 a
	1		17.87 ± 0.34 a	3.21 ± 0.05 b	95.92 ± 3.54 a	435.25 ± 5.72 a	51.75 ± 2.17 b	0.70 ± 0.02 b	0.12 ± 0.00 b	91.45 ± 4.60 a
	3		18.01 ± 0.18 a	3.34 ± 0.06 a	99.64 ± 2.42 a	438.58 ± 1.63 a	45.20 ± 2.76 c	0.63 ± 0.02 c	0.10 ± 0.01 bc	89.78 ± 1.02 a
	5		17.44 ± 0.31 a	3.38 ± 0.05 a	100.09 ± 0.97 a	410.25 ± 13.89 a	41.53 ± 1.89 c	0.61 ± 0.03 c	0.10 ± 0.01 c	87.45 ± 2.46 a
	10		13.96 ± 0.62 b	3.29 ± 0.02 ab	84.71 ± 4.74 b	349.25 ± 20.52 b	33.50 ± 0.96 d	0.49 ± 0.00 d	0.10 ± 0.00 c	90.45 ± 4.70 a
	0	36	18.79 ± 0.36 c	2.86 ± 0.02 d	46.75 ± 2.64 b	215.00 ± 1.73 c	27.67 ± 1.86 a	0.35 ± 0.04 a	0.13 ± 0.01 a	37.04 ± 1.02 ab
	1		19.55 ± 0.37 bc	2.91 ± 0.02 cd	46.00 ± 1.04 b	216.67 ± 4.41 c	22.33 ± 0.33 b	0.32 ± 0.02 a	0.10 ± 0.00 bc	35.59 ± 0.56 b
	3		20.66 ± 0.66 ab	2.98 ± 0.05 bc	58.84 ± 6.24 ab	223.67 ± 2.96 bc	24.00 ± 0.01 b	0.33 ± 0.01 a	0.11 ± 0.00 b	35.82 ± 1.13 ab
	5		21.15 ± 0.45 a	3.10 ± 0.01 a	62.64 ± 5.30 a	232.67 ± 4.84 ab	20.33 ± 0.88 b	0.38 ± 0.02 a	0.09 ± 0.01 c	37.04 ± 0.54 ab
	10		20.61 ± 0.20 ab	3.04 ± 0.03 ab	60.40 ± 2.70 a	238.00 ± 5.03 a	23.33 ± 1.33 b	0.37 ± 0.02 a	0.10 ± 0.01 bc	38.54 ± 0.64 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一时期  $\gamma$ -聚谷氨酸处理间差异达到 0.05 显著水平 Values followed by different letters within the same column indicate significant differences at the 0.05 level among  $\gamma$ -PGA treatments at the same growth stage.

生物氮、磷、钾是植物生长所需养分的有效来源。 $\gamma$ -PGA 具有生物降解性,能够为微生物提供碳源和氮源,影响基质微生物活性及其功能发挥<sup>[32]</sup>。已有研究表明,添加  $\gamma$ -PGA 能提高土壤微生物量和微生物多样性<sup>[28]</sup>。本研究结果表明, $\gamma$ -PGA 提高了基质中微生物活性。基质中酶活性受多种生物和非生物因素的影响,碳源和氮源均会影响解磷细菌的数量和磷酸酶的分泌<sup>[33]</sup>。加入  $\gamma$ -PGA 后土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均得到提高<sup>[6]</sup>。在本研究中添加  $\gamma$ -PGA 提高了基质中性磷酸酶活性和过氧化氢酶活性。 $\gamma$ -PGA 自身携带的羧基和酰胺基还是亲水基团,能够吸附水分,添加  $\gamma$ -PGA 能提高基质吸水 and 保水能力。加入  $\gamma$ -PGA 能够提高土壤的保水能力<sup>[34]</sup>。在本研究中,加入  $\gamma$ -PGA 后基质最大持水量增加,提高了基质保水能力,降低排水性,进而减缓基质中矿质养分的淋洗,有助于间接地提高基质矿质养分含量。

有效矿质养分持续稳定供给是蔬菜幼苗生长发育的基础或前提条件。本研究表明施用  $\gamma$ -PGA 显著增加了番茄叶片叶绿素含量、根系活力以及株高、茎粗和茎叶干重,且表现出明显的剂量效应。王建平等<sup>[35]</sup>给每株烟草浇灌 2 次 10 mL  $\gamma$ -PGA 水溶液,6 个浓度梯度中 200 mg/L 浓度应用效果最佳,烟草地上部干重与对照相比增加 55.1%。喻三保等<sup>[10]</sup>给草莓浇灌 2 次 100 mL/plant  $\gamma$ -PGA 水溶液,草莓产量比对照增加了 29.6%。王润凡等<sup>[36]</sup>给蜜柑叶面喷施 5 次  $\gamma$ -PGA 水溶液,3 个浓度梯度中 200 mg/L 效果最好,单果鲜重与对照相比增加 17.4%。另外,营养液添加  $\gamma$ -PGA 也改善了玉米、大白菜生物量积累<sup>[37-38]</sup>。以上充分说明了  $\gamma$ -PGA 对作物生长发育的促进作用。

## 4 结论

番茄穴盘育苗施用  $\gamma$ -PGA,能够有效改善基质水分和矿质养分供应能力,提高基质生物活性,促进番茄穴盘苗后期生长发育。根据本研究结果,番茄穴盘育苗基质  $\gamma$ -PGA 适宜添加量为 3 kg/m<sup>3</sup>,顶部灌施  $\gamma$ -PGA 适宜浓度为 5 g/L。

## 参考文献:

[1] 陈殿奎. 国内外蔬菜穴盘育苗发展综述[J]. 中国蔬菜, 2000, (增刊): 7-11.  
Chen D K. Summary of foreign and domestic vegetable corps plug transplants production[J]. China Vegetables, 2000, (Sppl.): 7-11.

[2] Milks R R, Fonteno W, Larson R. Hydrology of horticultural substrates. III. Predicting air and water content of limited-volume plug cells[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1989, 114: 57-61.

[3] Shih I L, Van Y T. The production of poly-( $\gamma$ -glutamic acid) from microorganisms and its various applications[J]. Bioresource Technology, 2001, 79(3): 207-225.

[4] 施庆珊.  $\gamma$ -聚谷氨酸的微生物合成与应用[J]. 精细与专用化学品, 2004, 12(11): 20-23.  
Shi Q S. Biosynthesis and application of  $\gamma$ -poly glutamic acid [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2004, 12(11): 20-23.

[5] 汪家铭. 聚  $\gamma$ -谷氨酸增效复合肥的发展与应用[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2010, 1: 20-24.  
Wang J M. Development and application of poly- $\gamma$ -glutamic acid synergized compound fertilizer [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2010, 1: 20-24.

[6] Xu Z Q, Wan C B, Xu X J, et al. Effect of poly ( $\gamma$ -glutamic acid) on wheat productivity, nitrogen use efficiency and soil microbes[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 13 (3): 744-755.

[7] Wang Q J, Chen S W, Zhang J B, et al. Co-producing lipopeptides and poly- $\gamma$ -glutamic acid by solid-state fermentation of *Bacillus subtilis* using soybean and sweet potato residues and its biocontrol and fertilizer synergistic effects [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(8): 3318-3323.

[8] Yao D H, Ji Z X, Wang C J, et al. Co-producing iturin A and poly- $\gamma$ -glutamic acid from rapeseed meal under solid state fermentation by the newly isolated *Bacillus subtilis* strain 3-10 [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012, 28 (3): 985-991.

[9] 曾路生, 石元亮, 卢宗云, 等. 新型聚氨酸增效剂对蔬菜生长和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(31): 168-173.  
Zeng L S, Shi Y L, Lu Z Y, et al. Effect of new type synergist of poly amino acid on vegetables growth and yield [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(31): 168-173.

[10] 喻三保, 张红艳, 陈守文, 等. 聚  $\gamma$ -谷氨酸施用对草莓产量和果实品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(7): 1638-1641.  
Yu S B, Zhang H Y, Chen S W, et al. Effect of poly- $\gamma$ -glutamic acid on the yield and fruit quality of strawberry [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(7): 1638-1641.

[11] 刘端义, 梅金先, 张旅峰, 等. 聚  $\gamma$ -谷氨酸及其增效肥在水稻上的应用 [J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2390-2394.  
Liu R Y, Mei J X, Zhang L F, et al. Effect of poly- $\gamma$ -glutamic acid synergist and benificiate complex fertilizer on rice [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(10): 2390-2394.

[12] 李汉涛, 杨国正, 柯云, 陈守文. 聚  $\gamma$ -谷氨酸增效复合肥对油菜产量及其构成因素的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2395-2397.  
Li H T, Yang G Z, Ke Y, Chen S W. Effect of a strengthened compound fertilizer by poly- $\gamma$ -glutamic acid on the yield and its components of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(10): 2395-2397.

[13] 翟云龙, 曹新川, 吕双庆, 等. 聚  $\gamma$ -谷氨酸增效肥对棉花干物质积累与分配的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(21): 5167-5170.  
Zhai Y L, Cao X C, Lü S Q, et al. Effect of poly- $\gamma$ -glutamic

- acid strengthened fertilizer on the dry matter accumulation and distribution of cotton[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52 (21): 5167-5170.
- [14] Gessert G. Measuring a medium's airspace and water holding capacity[J]. Ornamentals Northwest, 1976, 1(8): 11-12.
- [15] Selmer-Olsen A. Determination of ammonium in soil extracts by an automated indophenol method [J]. Analyst, 1971, 96 (1145): 565-568.
- [16] Edwards A C, Hooda P S, Cook Y. Determination of nitrate in water containing dissolved organic carbon by ultraviolet spectroscopy [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2001, 80(1): 49-59.
- [17] Watanabe F, Olsen S. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO<sub>3</sub> extracts from soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(6): 677-678.
- [18] Wang H Y, Sun H X, Zhou J M, *et al.* Evaluating plant-available potassium in different soils using a modified sodium tetraphenylboron method [J]. Soil Science, 2010, 175 (11): 544-551.
- [19] Barrows H L, Simpson E C. An EDTA method for the direct routine determination of calcium and magnesium in soils and plant tissue[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26 (5): 443-445.
- [20] Adam G, Duncan H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(7-8): 943-951.
- [21] Wang Y P, Shi J Y, Wang H, *et al.* The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity, and community composition near a copper smelter[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 67(1): 75-81.
- [22] Brzezińska M, Stepnińska Z, Stepniński W. Dehydrogenase and catalase activity of soil irrigated with municipal wastewater [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2001, 10 (5): 307-311.
- [23] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Bechmeria nivea* (L.) Gaud[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 62(3): 389-395.
- [24] Falkowski P G, Fenchel T, Delong E F. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles[J]. Science, 2008, 320(5879): 1034-1039.
- [25] 夏芳, 蔡皓, 陈守文. 聚- $\gamma$ -谷氨酸延缓磷酸钙沉淀及螯合钙离子的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(3): 56-59.  
Xia F, Cai H, Chen S W. Effects of poly- $\gamma$ -glutamic acid on retarding calcium phosphate depositing and its chelation with calcium ion[J]. Food Science, 2008, 29 (3): 56-59.
- [26] 李俊艳, 胡红青, 李荣纪, 等. 改性磷矿粉对油菜幼苗生长和土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (2): 441-446.  
Li J Y, Hu H Q, Li R J, *et al.* Modified phosphate rock by poly glutamic acid and its effects on the growth of rapeseed seedlings and soil properties [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 441-446.
- [27] Ho G H, Ho T I, Hsieh K H, *et al.*  $\gamma$ -Polyglutamic acid produced by *Bacillus Subtilis* (Natto): structural characteristics, chemical properties and biological functionalities[J]. Journal of the Chinese Chemical Society, 2006, 53(6): 1363-1384.
- [28] Xu Z Q, Lei P, Feng X H, *et al.* Effect of poly ( $\gamma$ -glutamic acid) on microbial community and nitrogen pools of soil [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil and Plant Science, 2013, 63(8): 657-668.
- [29] Taulé C, Mareque C, Barlocco C, *et al.* The contribution of nitrogen fixation to sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), and the identification and characterization of part of the associated diazotrophic bacterial community[J]. Plant and Soil, 2012, 356 (1-2): 35-49.
- [30] Singh G, Biswas D, Marwaha T. Mobilization of potassium from waste mica by plant growth promoting rhizobacteria and its assimilation by maize (*Zea mays*) and wheat (*Triticum aestivum* L.): a hydroponics study under phytotron growth chamber[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 33 (8): 1236-1251.
- [31] Richardson A E, Barea J M, McNeill A M, Prigent-Combaret C. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms[J]. Plant and Soil, 2009, 321(1-2): 305-339.
- [32] Perrott K, Sarathchandra S, Waller J. Seasonal storage and release of phosphorus and potassium by organic matter and the microbial biomass in a high producing pastoral soil [J]. Soil Research, 1990, 28(4): 593-608.
- [33] 赵小蓉, 林启美, 李保国. C, N 源及 C/N 比对微生物溶磷的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 197-204.  
Zhao X R, Lin Q M, Li B G. Effect of C, N source and C/N ratio on the solubilization of rock phosphate by some microorganisms [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 197-204.
- [34] 鞠蕾, 马霞, 张佳.  $\gamma$ -聚谷氨酸的发酵及保水性能[J]. 中国酿造, 2011, (7): 57-60.  
Ju L, Ma X, Zhang J. Fermentation of  $\gamma$ -polyglutamic acid and its water holding capacity[J]. China Brewing, 2011, (7): 57-60.
- [35] 王建平, 王晓丽, 王昌军, 等. 聚- $\gamma$ -谷氨酸对烟草种子萌发及苗期生长的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2007, 26 (3): 340-343.  
Wang J P, Wang X L, Wang C J, *et al.* Effects of poly- $\gamma$ -glutamic acid on tobacco seed germination and its seedling growth [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26 (3): 340-343.
- [36] 王润凡, 尹业雄, 胡世权, 等. PGA 增效剂在温州蜜柑中施用效果的评价[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(4): 884-887.  
Wang R F, Yin Y X, Hu S Q, *et al.* Evaluation of the effect on utilization poly- $\gamma$ -glutamic acid in citrus unshiu [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(4): 884-887.
- [37] 尹成红, 雍晓雨, 冉炜, 等. 产  $\gamma$ -聚谷氨酸菌株的筛选及其对玉米幼苗生长的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2011, 34 (2): 91-96.  
Yin C H, Yong X Y, Ran W, *et al.* Screening for  $\gamma$ -PGA-producing strain and the effect of  $\gamma$ -PGA on growth of maize seedlings[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(2): 91-96.
- [38] Xu Z Q, Lei P, Feng X H, *et al.* Calcium involved in the poly ( $\gamma$ -glutamic acid) - mediated promotion of Chinese cabbage nitrogen metabolism [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 80: 144-152.