植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1645–1654
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16048
http://www.plantnutrifert.org

包膜材料 γ-聚谷氨酸对菜心的农学效应

黄巧义，唐拴虎*，李 苹，付弘婷，张 木，黄 旭，易 琼，张发宝
（广东省农业科学院农业资源与环境研究所，农业部南方植物营养与肥料重点实验室，
广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室，广州 510640）

摘要:【目的】考察施用γ-聚谷氨酸 (γ-PGA) 对菜心生长、产量、品质和养分吸收的影响，揭示 γ-PGA 的农学施用效应。【方法】在酸性土壤 (pH 5.89) 和强酸性土壤 (pH 4.85) 以菜心为供试作物进行盆栽试验。在常规施肥（施 N 1.33 g/kg 土，分 5 次施入土壤）的基础上，设不施 γ-PGA 包裹型肥料 (T1)、分 5 次施用 γ-PGA 0.53 mg/kg 土 (T2) 和 1.06 mg/kg（T3）、在定苗一周后一次性淋施 γ-PGA 0.53 mg/kg 土（T4）和 1.06 mg/kg 土（T5）5 个处理。调查了菜心根系活力、养分含量、养分吸收累积量、叶片抗氧化系统、菜心产量及品质。【结果】酸性、强酸性土壤上，γ-PGA 处理（T2、T3、T4、T5）的伤流强度均高于 T1，且 T3、T4、T5 的伤流液氨基酸输出强度显著高于 T1，平均增幅分别达到 38.1%、33.2%、44.2% ($P < 0.05$)。酸性土壤上，T2、T3、T4、T5 处理的菜心钙、镁含量显著高于 T1 ($P < 0.05$)，菜心钙的增幅分别为 29.6%、21.8%、26.4%、22.7%，镁的增幅分别为 11.7%、8.3%、22.2%、16.7%，锌、锰也有一定程度的提高；强酸性土壤上不同处理的菜心养分含量没有差异。T2、T3、T4、T5 处理的氮、磷、钾、钙、镁、铜、锌、铁、锰累积量均显著高于 T1；T4、T5 处理的菜心叶片可溶性蛋白显著高于 T1 ($P < 0.05$)，T2、T3、T4、T5 处理的菜心叶片 CAT 活性显著高于 T1 ($P < 0.05$)；而酸性土壤上，仅 T3 处理的菜心叶片 CAT 活性显著高于 T1 处理 ($P < 0.05$)。酸性、强酸性土壤上，T3、T4 处理的菜心叶片 SOD 活性显著高于 T1($P < 0.05$)；不同处理的菜心叶片 POD 活性没有差异；T2、T3、T4、T5 处理的菜心产量均显著高于 T1 ($P < 0.05$)，在酸性土壤上增幅分别为 4.4%、7.3%、12.2%、12.3%，强酸性土壤上分别为 9.7%、14.2%、12.2%、12.39%。两种类型土壤上，T2、T3、T4、T5 处理的菜心地上部分和根系生物量均显著高于 T1 处理 ($P < 0.05$)。T4、T5 处理的 Vc 含量和游离氨基酸含量显著高于 T1 ($P < 0.05$)，T2、T3、T4、T5 处理的硝酸盐含量显著低于 T1 ($P < 0.05$)。γ-PGA 淋施处理 (T4、T5) 的菜心根系活力、养分含量、养分累积量、叶片抗氧化能力、产量和品质均优于 γ-PGA 包裹肥料施用处理 (T2、T3)。不同 γ-PGA 用量水平不影响菜心产量、品质、养分含量及叶片抗氧化能力。在酸性土壤上，γ-PGA 对菜心养分吸收累积影响更为显著，而在强酸性土壤上，γ-PGA 对菜心叶片抗氧化能力影响更突出。【结论】施用 γ-PGA 可提高菜心根系活力，促进菜心对养分，尤其是中微量元素的吸收，并增强菜心抗逆性，产量显著提高，一次施用效果好于分多次施用。

关键词: γ-聚谷氨酸；菜心；产量；品质；养分

中图分类号: S145.5; S634.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)06–1645–10

Agronomic effects of coating material γ-polyglutamic acid on Chinese flowering cabbage

HUANG Qiao-yi, TANG Shuan-hu*, LI Ping, FU Hong-ting, ZHANG Mu, HUANG Xu, YI Qiong, ZHANG Fa-bao
(*Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture/Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China*)

收稿日期: 2016–02–01　　**接受日期:** 2016–03–09
基金项目: 公益性（农业）行业专项（201503123）；广东省科技计划项目（2012A020100004，2014B090904068，2016A020210035）；粤科规财字[2014]208号）资助。
作者简介: 黄巧义（1985—），男，广东潮阳人，硕士，助理研究员，主要从事土壤培肥及高效施肥技术研究。
Tel: 020-32885730, E-mail: huangqiaoyi@hotmail.com。* 通信作者 Tel: 020-85161400, E-mail: 1006339502@qq.com

Abstract: 【**Objectives**】Effects of γ-polyglutamic acid (γ-PGA) on growth, yield and quality of Chinese flowering cabbage were studied to provide a support for its use in agricultural production.【**Methods**】A pot experiment was conducted using Chinsese flowering cabage as tested crop in an acid soil (pH 5.89) and a strong acid soil (4.85). At the base of applying N 1.33 g/kg soil in 5 times, five treatments were designed: no γ-PGA applicaiton (T1), applying γ-PGA 0.53 mg/kg soil (T2) and 1.06 mg/kg soil (T3) in five times with N fertilization, and applying γ-PGA 0.53 mg/kg soil (T4) and 1.06 mg/kg soil (T5) once after seedling transplanting. The root activity, nutrient contents, nutrient accumulation, antioxidant system, yield and quality of Chinese flowering cabbage of each treatment were determined.【**Results**】In both the acid and strong acid soils, the bleeding intensities of Chinese flowering cabbage in T2, T3, T4 and T5 were slightly higher than that in T1, and the amino acid intensities in the bleeding sap in T3, T4 and T5 were significantly higher than in T1 ($P < 0.05$) with the average increased rates of 38.1%, 33.2% and 44.2%, respectively. In the acid soils, the Ca and Mg contents of Chinese flowering cabbage in T2, T3, T4 and T5 were significantly higher than that in T1 ($P < 0.05$), with the increased rates of 29.6%, 21.8%, 26.4%, 22.7% in acid soil and 1.7%, 8.3%, 22.2%, 16.7% in strong acid soil condition, respectively. The Zn and Mn contents in Chinese flowering cabbage were increased slightly in the treatments of T2, T3, T4 and T5 in the acid soils, no differences in strong acid soils. The accumulated amounts of N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe and Mn in Chinese flowering cabbage in the acid soils and the strong acid soils were increased greatly by applying γ-PGA. In the strong acid soils, the soluble protein contents in leaves of Chinese flowering cabbage in T4 and T5 were significantly higher than that in T1, and the CAT activities in T2, T3, T4 and T5 were significantly higher than in T1 ($P < 0.05$). While in the acid soils, the CAT activity of leaves of Chinese flowering cabbage was increased significantly only in T3. In both the acid and strong acid soils, SOD activities of leaves of Chinese flowering cabbage were increased significantly in T3 and T4 than in T1 ($P < 0.05$), while not in the POD activities. The yields of T2, T3, T4 and T5 were significantly higher than in T1 ($P < 0.05$), with the increases rate of 4.46%, 7.3%, 12.2% and 12.3% in acid soils and 9.7%, 14.2%, 12.2% and 12.3% in strong acid soils. The aboveground and root biomass of T2, T3, T4 and T5 were significantly higher than those of T1 ($P < 0.05$). The VC and free amino acid contents in T4 and T5 were significantly higher than those of T1 ($P < 0.05$), and the nitrate contents were decreased greatly in the γ-PGA applied treatments (T2, T3, T4 and T5) as compared with T1. The root activities, nutrient contents, nutrient accumulation amounts, antioxidant system, yields and quality of Chinese flowering cabbage in the γ-PGA treatments were higher than those in the γ-PGA coated fertilizer treatments. No significant differences in the yields, quality, mineral nutrition, and antioxidant system were observed among different γ-PGA dosages. The γ-PGA primary increased the uptakes of nutrients in Chinese flowering cabbage in the acid soils, while the γ-PGA mostly strengthened the antioxidant system of Chinese flowering cabbage in the strong acid soils.【**Conclusions**】The γ-PGA application enhanced the root activities of Chinese flowering cabbage, increased the uptake and accumulation of mineral nutrients (bivalent cation especially) in Chinese flowering cabbage, strengthened the stress resistance of Chinese flowering cabbage, and increased the yield of Chinese flowering cabbage. Once application of γ-PGA in the tested dosage performs better than that apllied in five times.

Key words: γ-polyglutamic acid; Chinese flowering cabbage; yield; quality; nutrition

在产量与环境保护双重压力下，通过肥料技术创新，提升肥料利用效率，实现以增值对冲减量的化肥发展策略受到广泛关注[1-2]。聚天冬氨酸和聚谷氨酸等聚合氨基酸类等有机生物材料不仅具有一定的养分活化能力，还可延长肥效期等性能，是目前开发新型增效型肥料的理想材料[3-4]。γ-聚谷氨酸(γ-polyglutamic acid，γ-PGA) 是由 D-和 L-谷氨酸构成的一种独特的阴离子型同元聚酰胺[5]，具有生物可降解性、无毒性、无致免疫性等优越性能，广泛应用于食品、医药、污水处理等领域[5-7]。有研究发

现，将 γ-PGA 与包裹尿素形成缓释氮肥，其养分释放速率符合欧盟标准，可有效提高氮肥利用效率[8–10]。γ-PGA 对磷矿粉进行改性后，可显著提高磷矿粉的生物利用效率[4]。研究也证明施用 γ-PGA 可有效改善小青菜、甘蓝、油菜、小麦、小白菜、番茄幼苗等作物的生长，增产效果显著[3, 11–15]。以 γ-PGA 为载体开发新型增效肥料产品，可为化肥增效减量有效突破提供技术可能[3, 16]。目前 γ-PGA 在农业上应用尚停留在效果验证阶段，γ-PGA 增效增产机理研究较少。本研究以广东省两种酸度水平菜园土壤作为试验材料开展菜心盆栽试验，考察施用 γ-PGA 后蔬菜产量、养分吸收累积量及自由基清理酶活性的响应，揭示 γ-PGA 增效增产机理。

1　材料与方法

1.1　供试材料

试验于 2014 年 7 月至 12 月在广东省农业科学院农业资源与环境研究所网室开展盆栽试验。选用两种酸度水平土壤，土壤基础理化性状见表 1。供试土壤自然风干、打碎后，过 2 mm 筛，混合均匀后分别装于直径 25 cm、高 30 cm 的塑料桶中，每桶 7.5 kg。供试肥料为 15-5-15 复混肥料 (新农科，含硝基氮)、γ-PGA 包裹，γ-PGA 由味丹国际 (控股) 有限公司提供。供试菜心品种为翠绿 80 天菜心，由广东省农业科学院蔬菜研究所提供。采用直播育种，出苗后间苗，每盆保留 4 株。

表 1　土壤基本化学性状

Table 1　Basic chemical properties of the studied soils

供试土壤 Soil tested	pH	有机质 OM (g/kg)	碱解氮 Alk.-hydr.N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
强酸性土壤 Strong acid soil	4.85	47.2	166.60	10.08	56.00
酸性土壤 Acid soil	5.89	14.2	85.40	24.70	51.50

1.2　试验设计

本试验设置 5 个处理：设常规施肥 (T1)、施用 γ-PGA 包裹型肥料 (含 γ-PGA 400 mg/kg，T2)、施用 γ-PGA 包裹型肥料 (含 γ-PGA 800 mg/kg，T3)、常规施肥+淋施 γ-PGA (γ-PGA 用量与 T2 相同，0.53 mg γ-PGA/kg 土，T4)、常规施肥+淋施 γ-PGA (γ-PGA 用量与 T3 相同，γ-PGA 1.06 mg/kg 土，T5)。每个处理重复 8 次。

常规施肥 (T1) 氮肥用量为 200 mg/kg 土，相当于每公斤土使用 N 1.333 g，分基肥、出苗后 7～10 d、15～20 d、25～30 d、35～40 d 共 5 次施肥，每次比例为 20%、10%、20%、30%、20%。基施氮肥与土壤全部混匀，追肥时将肥料溶解后淋施。

γ-PGA 由“味丹”粉状包裹聚谷氨酸肥提供，每公斤肥料含 γ-PGA 8%，约 5 g。T2 和 T3 处理中 γ-PGA 施用方式为随肥料分次施用；T4 和 T5 中 γ-PGA 于菜心定苗后一周，约菜心 3 叶期一次性淋施“味丹”聚谷氨酸 50 和 100 mg/pot，也就是 γ-PGA 施用量为 0.53 土和 1.06 mg/kg 土。

1.3　测定项目与方法

1.3.1 产量及品质指标　收获期将每盆菜地上部分齐头割下，称重计商品重量。选取其中有代表性植株，分为地上部和根系，洗净烘干后称生物量，测量其植株高度 (量至菜心花苔顶部)及经济部粗度。菜心氨基酸含量采用茚三酮法测定，维生素 C 采用 2，6- 二氯靛酚滴定法测定，可溶糖采用蒽酮比色法测定，硝酸盐采用紫外法测定。

1.3.2 根系活力指标　每盆选取 1 株代表性植株，于下午 18: 00～19: 00 将植株从距根部 1.5 cm 处剪断，用脱脂棉开始吸收伤流液，并用塑料膜包扎，至次日 8: 00 收取脱脂棉，测定伤流量，并计算单茎伤流强度。吸取 1 mL 伤流液，用茚三酮法测定伤流液中氨基酸氮含量，并根据伤流强度计算伤流液中氨基酸氮的输出强度；吸取 1 mL 伤流液，用凯氏法测定伤流液中全氮含量，并根据伤流强度计算伤流液中氨基酸氮的输出强度。

1.3.3 植株养分测定方法　全氮含量采用 H_2SO_4–混合加速剂—蒸馏法，全磷含量采用 H_2SO_4–H_2O 消煮—钼锑抗比色法，全钾含量采用 H_2SO_4–H_2O 消煮—火焰光度计法，钙、镁含量采用 HNO_3–$HClO_4$ 消煮—原子吸收分光光度法，全硫含量采用 HNO_3–$HClO_4$ 消煮—$BaSO_4$ 比浊法，全铁、锰、锌、铜含量采用 HNO_3–$HClO_4$ 消煮—原子吸收分光光度法，全硼含量采用姜黄比色法，全钼含量采用硫氰酸钾比色法。

1.3.4 菜心抗氧化系统酶、蛋白质和丙二醛测定方法　菜薹形成初期，选取 10 片叶，用液氮即时冰冻，用泡沫保温箱带回实验室并保存在–80℃ 冰箱中用于测定叶片中可溶性蛋白、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和丙二醛 (MDA)含量。

菜心叶片中 SOD 采用氮蓝四唑 (NBT) 法测定，POD 采用愈创木酚法测定，CAT 采用紫外吸收法测

定，MDA 采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法，可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定，上述测定均参照李玲[17] 的方法。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2007 进行数据统计分析，R 软件开展 LSD 法对进行差异显著性检验及作图。

2 结果与分析

2.1 施用 γ-PGA 对菜心产量及品质的影响

2.1.1 对菜心产量的影响 从图 1 可见，施用 γ-PGA 可有效提高菜心产量。以 T1 处理为对照，酸性土壤上 T2、T3、T4、T5 处理分别增产 4.4%、7.3%、2.2%、12.3%，强酸性土壤上分别增产 9.7%、14.2%、12.%、12.3%，两种类型土壤上，T2、T3、T4、T5 处理的菜心产量均显著高于常规施肥处理。

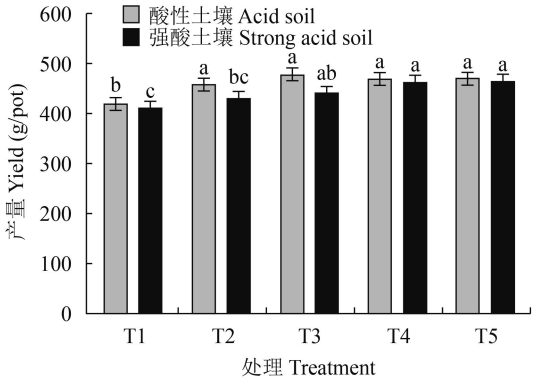

图 1 不同 γ-PGA 不同处理对菜心产量的影响

Fig. 1 Effect of the application of γ-PGA on the yield of Chinese flowering cabbage

[注（Note）：柱上不同字母表示相同土壤不同处理间差异达 5% 显著水平 Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments in the same soil ($P < 0.05$, $n = 8$).]

总体上，γ-PGA 的增产效果显著，γ-PGA 以基肥淋施处理 (T4、T5) 的增幅大于 γ-PGA 包裹肥料分次施用处理 (T2、T3)；γ-PGA 包裹肥料分次施用和 γ-PGA 基施情况下，两种 γ-PGA 施用水平间的菜心产量没有显著差异。

2.1.2 对菜心生物量的影响 从表 2 可见，T2、T3、T4、T5 处理的菜心地上部和根系生物量均显著高于 T1，地上部分生物量平均增幅分别为 10.6%、21.7%、24.4%、22.4%，根系生物量平均增幅分别为 –1.2%、13.6%、13.0%、16.8%。由此可见，施用 γ-PGA 可有效提高菜心生物量，并且 γ-PGA 以基肥淋施处理 (T4、T5) 的效果更优，两种 γ-PGA 用量水平的菜心生物量没有显著差异。

2.1.3 对菜心株高和茎粗的影响 从表 3 可见，酸性土壤 T2、T3、T4、T5 处理的株高和茎粗均高于 T1，其增幅分别为 0.4%、0.4%、3.6%、15.0% 和 1.6%、7.0%、11.7%、13.6%。强酸性土壤不同处理的株高和茎粗没有显著差异。施用 γ-PGA 对菜心的株高和茎粗均有一定促进作用，但在不同土壤上的表现不一致。γ-PGA 以基肥淋施处理 (T4、T5) 对菜心的株高和茎粗均优于 γ-PGA 包裹肥料分次施用处理 (T2、T3)。两种 γ-PGA 用量水平的菜心株高和茎粗没有显著差异。

2.1.4 γ-PGA 对菜心品质的影响 从表 4 可见，不同施肥处理对菜心可溶糖含量没有显著影响。T4、T5 处理的 Vc 含量和游离氨基酸含量显著高于 T1，其平均增幅分别为 6.6%、6.2% 和 14.1%、31.0%，T2、T3 处理的 Vc 含量和游离氨基酸含量与 T1 处理没有显著差异。同时，T2、T3、T4、T5 处理的硝酸盐含量显著低于 T1 处理，其平均降幅分别为 8.5%、10.8%、19.2%、28.6%。总体上，施用 γ-PGA 在一

表 2 不同 γ-PGA 不同处理对菜心生物量的影响

Table 2 Effect of the application of γ-PGA on the biomass of Chinese flowering Cabbage

处理 Treatment	地上部分生物量 Above-ground biomass (g/pot)		根系生物量 Root biomass (g/pot)	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	23.32 ± 1.55 b	22.04 ± 1.85 b	3.49 ± 0.28 b	3.03 ± 0.26 b
T2	26.04 ± 0.78 ab	24.16 ± 1.25 a	3.37 ± 0.30 b	3.24 ± 0.47 ab
T3	27.33 ± 2.48 a	27.82 ± 1.96 a	4.35 ± 0.44 a	3.58 ± 0.23 ab
T4	28.13 ± 1.68 a	28.24 ± 2.90 a	4.30 ± 0.11 a	3.63 ± 0.31 ab
T5	28.17 ± 1.88 a	27.31 ± 2.50 a	4.56 ± 0.20 a	3.66 ± 0.40 a

注（Note）：同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 ($n = 8$) Values followed by different small letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level.

表 3　γ-PGA 不同处理对菜心株高和茎粗的影响

Table 3　Effect of γ-PGA application on the plant height and stem diameter of Chinese flowering cabbage

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)		茎粗 Stem diameter (mm)	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	18.75 ± 0.88 b	17.62 ± 0.52 a	19.26 ± 0.79 b	17.77 ± 0.29 a
T2	18.82 ± 0.64 b	18.02 ± 0.79 a	19.56 ± 1.16 b	18.16 ± 0.90 a
T3	18.83 ± 0.68 b	17.97 ± 1.54 a	20.61 ± 0.59 ab	18.12 ± 0.45 a
T4	19.43 ± 0.58 b	17.98 ± 0.94 a	21.51 ± 1.08 a	18.12 ± 0.43 a
T5	21.57 ± 0.76 a	17.47 ± 0.96 a	21.87 ± 0.48 a	18.18 ± 0.59 a

注（Note）：同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 (n = 8) Values followed by different small letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level.

表 4　γ-PGA 不同处理菜心品质

Table 4　Quality of Chinese flowering cabbage affected by application of γ-PGA treatments

处理 Treatment	可溶糖 (g/kg) Soluble sugar		Vc (mg/kg)		游离氨基酸 (mg/kg) Free amino acid		硝酸盐 (mg/kg) Nitrate	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	4.21 ± 0.17 a	4.55 ± 0.19 a	465.23 ± 10.00 b	464.19 ± 45.21 a	11.58 ± 0.56 b	11.68 ± 1.57 b	711.62 ± 42.36 a	1123.27 ± 143.64 a
T2	3.99 ± 0.19 a	4.52 ± 0.96 a	468.00 ± 4.00 b	546.13 ± 27.76 a	13.91 ± 1.16 ab	10.73 ± 0.28 b	608.41 ± 53.09 b	1095.21 ± 50.34 a
T3	4.12 ± 0.20 a	5.28 ± 0.09 a	463.13 ± 7.56 b	550.57 ± 91.55 a	12.86 ± 0.96 ab	12.20 ± 0.91 b	607.03 ± 6.68 b	1044.89 ± 61.62 a
T4	4.71 ± 0.46 a	5.48 ± 0.91 a	504.76 ± 9.85 a	486.06 ± 51.29 a	13.32 ± 1.11 ab	13.22 ± 0.41 ab	657.93 ± 9.51 ab	775.49 ± 29.76 b
T5	5.02 ± 0.60 a	5.14 ± 0.47 a	482.93 ± 7.09 ab	503.88 ± 49.87 a	15.03 ± 0.35 a	15.44 ± 1.13 a	601.44 ± 1.11 b	653.95 ± 82.92 b

注（Note）：同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 (n = 8) Values followed by different small letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level.

定程度上提高菜心 Vc 和游离氨基酸含量水平，且有效降低蔬菜硝酸盐含量，其中 γ-PGA 以基肥淋施处理 (T4、T5) 对菜心各种品质指标的影响更明显。

2.1.5　γ-PGA 对菜心根系伤流液及其组分含量的影响　根系是作物吸收养分、水分的主要器官，伤流液强度可有效表征根系活力。T2、T3、T4、T5 处理的伤流强度均高于 T1，其平均增幅分别为 20.4%、26.4%、14.1%、30.9%，强酸性土壤上 T5 处理的增幅达到显著水平 (表 5)。两种γ-PGA 施用方式和两个 γ-PGA 施用水平对菜心伤流液输出强度没有影响。T3、T4、T5 处理的伤流液氨基酸输出强度显著高于 T1，其平均增幅分别为 38.1%、33.2%、44.2%。γ-PGA 以基肥淋施处理 (T4、T5) 的菜心伤流液中氨基酸输出强度显著高于 γ-PGA 包裹肥料分次施用处理 (T2、T3) ($P < 0.05$)，且 γ-PGA 添加比例为 800 mg/kg 处理的伤流液中氨基酸输出强度显著高于 γ-PGA 添加比例为 400 mg/kg 处理 ($P < 0.01$)，而不同施肥处理对菜心伤流液中全氮输出强度没有显著影响。

2.2　施用 γ-PGA 对菜心养分吸收累积的影响

2.2.1　施用 γ-PGA 对菜心养分含量的影响　从表 6 可见，不同施肥处理的菜心氮、磷、钾、铜、铁含量没有显著差异。在酸性土壤上，施用 γ-PGA 处理的菜心钙、镁、锌、锰含量均高于 T1，其中 T2、T3、T4、T5 的钙含量增幅分别为 29.6%、21.8%、26.4%、22.7%，镁含量增幅分别为 11.7%、8.3%、22.2%、16.7%，锌含量增幅分别为 4.5%、18.4%、6.9%、15.6%，锰含量增幅分别为 26.5%、37.6%、15.5%、9.7%；不同 γ-PGA 施用方式不影响菜心钙、镁、锌、锰含量，锌含量水平随着 γ-PGA 施用量的增加而增加。而强酸性土壤上不同施肥处理对菜心钙、镁、锌、锰含量没有显著影响。

2.2.2　施用 γ-PGA 对菜心养分累积量的影响　从表 7 可见，施用 γ-PGA 处理的菜心氮、磷、钾、钙、镁、铜、锌、铁、锰累积量均高于常规施肥处理。从平均增幅来看，施用 γ-PGA 处理的菜心钙、镁、锰累积量提高幅度最大，较常规施肥处理提高了

表 5 γ-PGA 不同处理菜心根系伤流强度及伤流液中氨基酸氮和总氮输出强度

Table 5 Bleeding intensity and the inside amino acid-N and total N output intensity in Chinese flowering cabbage affected by γ-PGA treatments

处理 Treatment	伤流强度[g/(plant · h)] Bleeding intensity		氨基酸输出强度[mg/(plant · h)] Amino acid-N intensity		总氮输出强度[mg/(plant · h)] Total N intensity	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	0.27 ± 0.10 a	0.29 ± 0.03 c	26.63 ± 6.25 b	26.37 ± 4.41 b	104.85 ± 53.22 a	113.78 ± 52.83 a
T2	0.35 ± 0.03 a	0.32 ± 0.01 bc	32.50 ± 2.86 b	33.91 ± 7.78 ab	130.97 ± 39.90 a	132.79 ± 35.53 a
T3	0.35 ± 0.07 a	0.36 ± 0.02 ab	46.41 ± 5.93 a	46.04 ± 7.46 a	148.57 ± 37.97 a	145.57 ± 50.99 a
T4	0.30 ± 0.09 a	0.34 ± 0.01 abc	40.82 ± 6.94 a	39.51 ± 10.42 ab	125.81 ± 70.75 a	133.49 ± 36.21 a
T5	0.34 ± 0.02 a	0.39 ± 0.02 a	49.68 ± 11.87 a	50.22 ± 18.13 a	133.57 ± 13.39 a	149.91 ± 34.02 a

注（Note）：同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 (n = 8) Values followed by different small letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level.

表 6 γ-PGA 不同处理菜心养分含量

Table 6 Nutrient contents of Chinese flowering cabbage affected by different γ-PGA treatments

处理 Teatment	N (g/kg)		P_2O_5 (g/kg)		K_2O (g/kg)	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	4.85 ± 0.11 a	5.24 ± 0.13 a	1.17 ± 0.09 a	1.47 ± 0.04 a	2.16 ± 0.25 b	5.85 ± 0.20 a
T2	4.89 ± 0.41 a	5.36 ± 0.33 a	1.15 ± 0.14 a	1.48 ± 0.11 a	2.80 ± 0.30 a	5.85 ± 0.02 a
T3	4.77 ± 0.13 a	5.02 ± 0.16 a	1.12 ± 0.05 a	1.46 ± 0.03 a	2.63 ± 0.32 a	5.89 ± 0.08 a
T4	4.61 ± 0.33 a	4.97 ± 0.49 a	1.144 ± 0.08 a	1.46 ± 0.04 a	2.73 ± 0.17 a	5.90 ± 0.53 a
T5	4.88 ± 0.09 a	5.41 ± 0.28 a	1.101 ± 0.09 a	1.48 ± 0.07 a	2.65 ± 0.18 a	5.85 ± 0.24 a

处理 Treatment	Ca (g/kg)		Mg (g/kg)		Cu (mg/kg)	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	0.36 ± 0.02 b	0.30 ± 0.02 a	0.36 ± 0.02 b	0.30 ± 0.02 a	7.83 ± 0.07 a	9.45 ± 0.68 a
T2	0.42 ± 0.04 a	0.29 ± 0.01 a	0.42 ± 0.04 a	0.29 ± 0.01 a	7.94 ± 0.33 a	9.37 ± 0.13 a
T3	0.39 ± 0.04 ab	0.30 ± 0.01 a	0.39 ± 0.04 ab	0.30 ± 0.01 a	7.82 ± 0.78 a	9.26 ± 0.80 a
T4	0.44 ± 0.03 a	0.31 ± 0.03 a	0.44 ± 0.03 a	0.31 ± 0.03 a	8.00 ± 0.35 a	9.51 ± 0.35 a
T5	0.42 ± 0.03 a	0.31 ± 0.01 a	0.42 ± 0.03 a	0.31 ± 0.01 a	8.02 ± 0.57 a	9.82 ± 0.72 a

处理 Treatment	Zn (mg/kg)		Fe (mg/kg)		Mn (mg/kg)	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	70.43 ± 3.78 b	236.35 ± 24.50 a	270.29 ± 67.11 a	165.16 ± 22.88 a	257.18 ± 14.93 c	377.38 ± 26.04 a
T2	73.63 ± 3.72 b	230.28 ± 5.37 a	301.49 ± 59.61 a	172.09 ± 10.33 a	325.40 ± 35.15 ab	356.28 ± 29.55 a
T3	83.36 ± 0.53 a	215.87 ± 16.0 a	274.05 ± 22.22 a	156.24 ± 6.83 a	353.83 ± 4.53 a	346.25 ± 32.11 a
T4	75.27 ± 2.67 b	225.33 ± 13.9 a	301.78 ± 55.31 a	170.46 ± 21.81 a	296.98 ± 30.45 bc	366.28 ± 59.98 a
T5	81.38 ± 4.22 a	246.50 ± 33.28 a	310.03 ± 29.42 a	169.53 ± 29.60 a	282.08 ± 30.10 bc	393.37 ± 19.96 a

注（Note）：同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 (n = 8) Values followed by different small letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level.

表 7　γ-PGA 不同处理菜心养分累积量 (mg/pot)

Table 7　Nutrient accumulation of Chinese flowering Cabbage affected by γ-PGA treatments

处理 Treatment	N		P_2O_5		K_2O	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	1131.55 ± 66.30 b	1155.15 ± 106.39 b	271.52 ± 17.01 a	324.04 ± 24.37 b	2038.82 ± 192.99 b	1289.53 ± 121.03 b
T2	1273.19 ± 115.27 ab	1296.87 ± 104.66 ab	301.42 ± 40.09 a	358.12 ± 40.50 ab	2378.07 ± 52.96 ab	1413.80 ± 75.21 ab
T3	1301.46 ± 108.78 ab	1394.52 ± 89.49 a	307.15 ± 33.93 a	407.28 ± 33.32 a	2505.01 ± 349.73 a	1637.75 ± 109.94 a
T4	1296.50 ± 102.09 ab	1393.10 ± 73.18 a	321.47 ± 22.13 a	412.90 ± 48.99 a	2520.10 ± 135.73 a	1677.13 ± 301.18 a
T5	1376.36 ± 111.66 a	1475.89 ± 120.68 a	310.48 ± 35.94 a	403.19 ± 31.10 a	2554.98 ± 181.44 a	1596.48 ± 153.75 ab

处理 Treatment	Ca		Mg		Cu	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	504.60 ± 66.09 b	314.27 ± 28.19 b	83.23 ± 7.32 b	65.70 ± 4.89 c	182.50 ± 12.21 b	207.40 ± 15.79 c
T2	728.67 ± 73.22 a	346.10 ± 20.75 ab	110.45 ± 9.32 a	69.72 ± 4.10 bc	206.73 ± 7.19 ab	226.40 ± 9.91 bc
T3	714.86 ± 61.60 a	395.02 ± 33.37 a	105.29 ± 10.65 a	83.56 ± 6.48 ab	214.32 ± 32.34 ab	257.13 ± 23.22 ab
T4	738.81 ± 91.38 a	405.34 ± 49.26 a	124.21 ± 12.93 a	86.22 ± 11.70 a	225.13 ± 17.98 a	268.43 ± 26.43 a
T5	724.89 ± 79.73 a	395.28 ± 40.24 a	118.97 ± 14.28 a	84.27 ± 8.92 a	225.57 ± 17.12 a	267.50 ± 20.61 a

处理 Treatment	Zn		Fe		Mn	
	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil	酸性土壤 Acid soil	强酸性土壤 Strong acid soil
T1	1645.47 ± 166.45 c	5190.28 ± 457.03 b	6.34 ± 1.59 b	3.66 ± 0.66 b	5.99 ± 0.38 c	8.33 ± 0.97 c
T2	1917.32 ± 103.45 bc	5566.43 ± 352.16 ab	7.83 ± 1.22 ab	4.17 ± 0.38 ab	8.46 ± 0.65 ab	8.61 ± 0.75 bc
T3	2278.44 ± 209.01 a	5994.79 ± 443.01 ab	7.45 ± 0.30 ab	4.35 ± 0.36 ab	9.66 ± 0.77 a	9.65 ± 1.24 abc
T4	2118.47 ± 170.55 ab	6350.07 ± 568.38 ab	8.51 ± 1.65 ab	4.82 ± 0.78 a	8.37 ± 1.09 ab	10.28 ± 1.26 ab
T5	2297.40 ± 250.33 a	6765.36 ± 1273.56 a	8.77 ± 1.29 a	4.65 ± 0.91 ab	7.99 ± 1.26 b	10.72 ± 0.82 a

注（Note）：同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 (n = 8) Values followed by different small letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level.

30% 以上；其次是铁、锌、铜、钾元素累积量，较常规施肥处理提高了 20% 以上；氮、磷元素累积量的增幅最低。γ-PGA 以基肥淋施处理 (T4、T5) 的菜心钙、镁、铜、铁累积量显著高于 γ-PGA 包裹肥料分次施用处理 (T2、T3) ($P < 0.05$)。γ-PGA 添加比例为 800 mg/kg 处理 (T3、T5) 的锌元素累积量显著高于 γ-PGA 添加比例为 400 mg/kg 处理 (T2、T4) ($P < 0.05$)。施用 γ-PGA 对菜心氮、磷养分累积量的增幅在强酸性土壤上更明显，而对钙、镁、锌、锰养分累积量的增幅在酸性土壤上更显著。

2.3　施用 γ-PGA 对菜心叶片可溶性蛋白和 MDA 含量、SOD、POD、CAT 活性的影响

从图 2 可见，强酸性土壤上 T2、T3、T4、T5 处理的菜心叶片可溶性蛋白含量均高于 T1， T4、T5 的增幅又大于 T2、T3。酸性土壤上不同处理的菜心叶片可溶性蛋白含量没有差异。说明施用 γ-PGA 有助于提高菜心叶片可溶性蛋白含量，且以 γ-PGA 基肥淋施效果更佳。酸性、强酸性土壤上，T3、T4 处理的菜心叶片 SOD 活性显著高于 T1，强酸土壤上 T2、T5 处理的菜心叶片 SOD 活性也呈现出高于 T1 的趋势。不同处理的菜心叶片 POD 活性没有差异，强酸性土壤上施用 γ-PGA 处理 (T2、T3、T4、T5) 的菜心叶片 POD 活性有一定提高的趋势。强酸性土壤上，T2、T3、T4、T5 处理的菜心叶片 CAT 活性显著高于 T1；酸性土壤上，T3 处理的菜心叶片 CAT 活性也显著高于 T1。从图 2 可见，强酸性土壤上 T3 处理的菜心叶片 MAD 含量显著低于 T1。说明施用

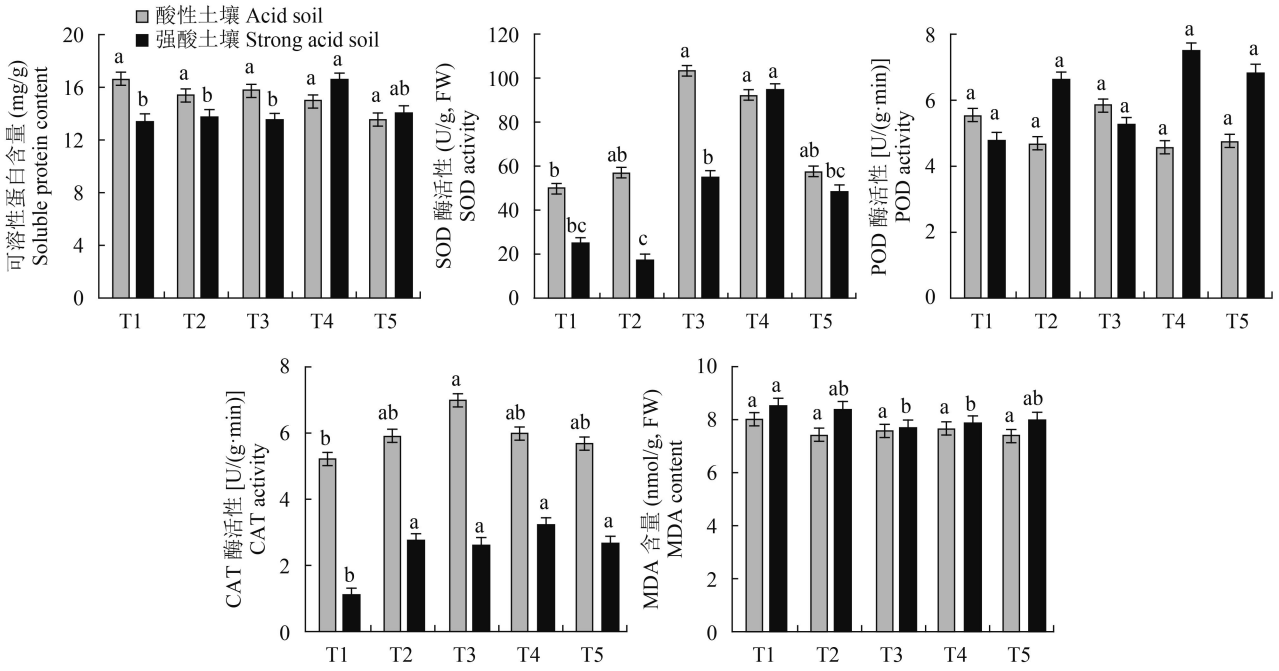

图 2 γ-PGA 对菜心叶片可溶性蛋白和 MDA 含量、SOD、POD、CAT 活性的影响

Fig. 2 Effect of the application of γ-PGA on the soluble protein and MDA contents, SOD, POD and CAT activities in leaves of Chinese flowering cabbage

[注（Note）：柱上不同字母表示相同土壤不同处理间差异达 5% 显著水平

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments in the same soil ($P < 0.05$, $n = 8$).]

γ-PGA 有助于提高菜心叶片 SOD、CAT 活性，降低叶片 MAD 含量，提高菜心抗氧化能力。

3 讨论

3.1 γ-PGA 的养分增效性能

γ-PGA 是一种生物阴离子型高分子聚合物，相对分子质量高达 10^5～10^6 Da，其分子链上含有大量的负电 a-羧基[5]。因此，γ-PGA 对 Ca、Mg、Cu 等多种带正电荷金属离子具极强螯合、活化作用[5, 18–19]。Chang 等[20] 发现 γ-PGA 能有效吸附去离子水中 Cr^{3+}、Cu^{2+}、Pb^{2+} 金属阳离子。Tianmoto 等 [19] 研究发现，添加 γ-PGA 可有效提高小鼠肠道对钙的吸收利用效率。施用 γ-PGA 可有效提高土壤中钙、镁、锰、铜、锌等多种养分离子的有效性，具有一定的肥料增效性能[16]。有研究发现，施用γ-PGA 活化磷矿粉 0～40 天后，土壤中的有效钙和 CEC 显著提高[21]。褚群等[11] 发现，施用 γ-PGA 可以显著提高番茄穴盘育苗基质中交换性钾、交换性镁含量和 EC 值。本研究中，施用 γ-PGA 可有效提高菜心钙、镁、锌、锰养分含量 (表 6)，且钙、锌的增幅最大，也证明了 γ-PGA 对土壤中二价阳离子有显著活化作用。褚群等[11] 还发现，γ-PGA 可显著提高番茄穴盘育苗基质中铵态氮、硝态氮、速效磷和速效钾含量。Inbaraj 等[18] 表明 γ-PGA 对二价金属离子 (如钙) 的结合力显著高于一价金属离子 (如钠和钾)，且对不同二价金属离子的吸附力也不同。本试验结果也表明，施用 γ-PGA 显著提高了菜心中钙、镁、锌等二价金属离子的含量，而对钾含量没有影响。由此可见，γ-PGA 可有效提高土壤钙、镁、锌等养分元素有效性。γ-PGA 的养分活化效能显著受土壤酸性影响，强酸性土壤上施用 γ-PGA 对作物养分离子含量没有显著影响。可能是因为强酸化导致土壤 H^+ 浓度增加，它与 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 等盐基性养分阳离子竞争交换位，导致这些盐基离子大量淋失[22]，从而影响了 γ-PGA 的养分活化效应。然而，目前 γ-PGA 对各种金属离子的吸附动力学尚不清晰，对土壤中各种营养元素离子的螯合活化性能还有待进一步探讨。

作物对土壤养分离子的吸收不仅取决于土壤养分元素有效性，同时也与作物根系生长、活力和构型显著相关。研究表明，施用 γ-PGA 显著提高油菜苗的根系长度、重量，可促进作物根系生长[23–24]。Xu 等[12] 发现，添加 γ-PGA 和钙显著提高了大白菜根系中氮代谢相关酶活性。Zhu 等[25] 研究表明，γ-PGA 可有效缓解 Pb 对作物根系的毒害作用，提高根系生物量。综上，γ-PGA 可能通过参与作物碳氮代谢过

程，和阻控有害物质的毒害作用，促进作物根系生长。同时，研究发现，施用 γ-PGA 显著提高植物根系活力，提高水分和养分吸收能力[11, 23–24]。本研究结果也表明，施用 γ-PGA 显著提高菜心根系伤流强度。因此，γ-PGA 一方面促进了作物根系生长，提高养分吸收面积；另一方面，提高了作物根系活力，提高了养分吸收能力。

3.2　γ-PGA 对作物生长代谢的影响

Xu 等[12]通过水培试验，发现 γ-PGA (分子量为 2 kDa) 显著提高大白菜的硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶和谷氨酸脱氢酶等氮代谢相关酶的活性。他们还发现 γ-PGA 显著提高油菜苗的 SOD、POD、CAT 活性，增强其抗旱性[26]。本研究结果也表明，施用 γ-PGA 有助于提高菜心叶片 SOD、CAT 活性，降低叶片 MAD 含量，提高菜心产量，并改善其品质。Xu 等[12, 26] 认为，γ-PGA 通过促进胞外 Ca^{2+} 内流，产生 Ca^{2+} 信号，经下游级联反应将信号转导放大，参与调节植物的多种生长发育和胁迫适应过程。但目前尚无直接证据表明，作物能直接吸收利用 γ-PGA，并参与到作物各种生理生化反应中。已有相关研究表明，植株根系能直接吸收利用单体氨基酸，是部分作物重要的氮源[27–28]。土壤中蛋白质和多肽类等氨基酸聚合物，在土壤微生物和菌根真菌作用下形成单体氨基酸，成为植物有机氮的主要来源[27]。γ-PGA 极易被各种蛋白酶分解形成谷氨酸。一些生态系统中，有机氮显著影响作物生长[27]。然而，目前尚无直接证据表明，有机氮在植物氮素营养中具有重要贡献作用[27]。因此，目前围绕 γ-PGA 对作物生理生化的影响研究均停留在效果验证阶段，需借助同位素、荧光定位等研究手段，进一步揭示 γ-PGA 的作用机理。

4　结论

γ-PGA 一方面可显著提高土壤 Ca、Mg、Cu、Mg 等带正电荷养分离子有效性，同时促进作物根系生长，提高作物根系活力，从而显著提高作物对养分离子的吸收累积量，具有一定的养分增效作用；另一方面，γ-PGA 提高作物抗逆性，改善作物体内生理生化代谢过程，促进作物生长。

参 考 文 献：

[1] 白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望[J]. 中国农业科学, 2015, 48 (17): 3477–3492.
Bai Y L. Review on research in plant nutrition and fertilizers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48 (17): 3477–3492

[2] 侯翠红, 许秀成, 王好斌, 等. 绿色肥料产业体系构建及其科学问题[J]. 科学通报, 2015, 60 (36): 3535–3542.
Hou C H, Xu X C, Wang H B, *et al*. Establishment of green fertilizer industrial system and its scientific problems[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60 (36): 3535–3542.

[3] 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.

[4] 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, 5 (2): 441–446.
Li J Y, Hu H Q, Li R J, *et al*. Modified phosphate rock by γ-poly glutamic acid and its effects on the growth of rapeseed seedlings and soil properties[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 5 (2): 441–446.

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

[6] Ogunleye A, Bhat A, Irorere V U, *et al*. Poly-glutamic acid: production, properties and applications[J]. Microbiology, 2015, 161(Pt_1): 1–17.

[7] Bajaj I, Singhal R. Poly (glutamic acid)-An emerging biopolymer of commercial interest[J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (10): 5551–5561.

[8] Xu Z, Lei P, Feng X, *et al*. Effect of poly (γ-glutamic acid) on microbial community and nitrogen pools of soil[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B–Soil & Plant Science, 2013, 63 (8): 657–668.

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

[10] Yue J, Liming L, Guangfu L, *et al*. Effect of γ-PGA coated urea on N-release rate and tomato growth[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2014, (4): 335–340.

[11] 褚群, 董春娟, 尚庆茂. γ-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[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (3): 855–862
Chu Q, Dong C J, Shang Q M. Effects of γ-poly glutamic acid on substrate mineral nutrient supply and growth of tomato plug of seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22 (3): 855–862

[12] Xu Z, Lei P, Feng X, *et al*. Calcium involved in the poly(γ-glutamic acid)-mediated promotion of Chinese cabbage nitrogen metabolism[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 80: 144–152.

[13] Fang J, Zhang Y, Yan S, *et al*. Poly(L-glutamic acid)/chitosan polyelectrolyte complex porous microspheres as cell microcarriers for cartilage regeneration[J]. Acta Biomaterialia, 2014, 10 (1): 276–288.

[14] 许宗奇, 万传宝, 许仙菊, 等. 肥料增效剂γ-聚谷氨酸对小青菜产量和品质的影响[J]. 生物加工过程, 2012, 10 (1): 58–62.
Xu Z Q, Wan C B, Xu X J, *et al*. Effects of poly(γ-glutamic acid) application on yield and quality of potted *Brassica chinensi*[J].

Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2012, 10 (1): 58–62.

[15] 李汉涛, 杨国正, 柯云, 等. 聚γ-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, *et al*. Effect of a strengthened compound fertilizer by poly-γ-glutamic acid on the yield and its components of rapeseed(*Brassica napus* L.)[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49 (10): 2395–2397.

[16] 汪少华. 聚γ-谷氨酸增效复合肥产业化开发及应用前景[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24 (6): 52–54.
Wang S H. Industrial development and application prospects of high efficiency compound fertilizer with poly γ-glutamic acid[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2009, 24 (6): 52–54.

[17] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Li L. Plant physiology experiment module[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[18] Inbaraj B S, Wang J S, Lu J F, *et al*. Adsorption of toxic mercury(Ⅱ) by an extracellular biopolymer poly(γ-glutamic acid)[J]. Bioresource Technology, 2009, 100 (1): 200–207.

[19] Tianimoto H, Mori M, Motoki M, *et al*. Natto mucilage containing poly-γ-glutamic acid increases soluble calcium in the rat small intestine[J]. Bioscience, Biotechnology & Biochemistry, 2001, 65 (3): 516–521.

[20] Chang J, Zhong Z, Xu H, *et al*. Fabrication of poly(γ-glutamic acid)-coated Fe_3O_4 magnetic nanoparticles and their application in heavy metal removal[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2013, 21 (11): 1244–1250.

[21] 蔡志坚. γ-聚谷氨酸活化磷矿粉对Pb污染土壤铅形态及小白菜生长的影响[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2010.
Cai Z J. Effect of γ-poly glutamie acid-activated phosphate rock on different forms of Pb in Pb-coniaminated soil and pakchoi growth[D]. Wuhan: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2010.

[22] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47 (2): 238–244.
Xu R K. Research progresses in soil acidification and its control[J]. Soils, 2015, 47 (2): 238–244.

[23] Wang J, Liu Z, Wang Y, *et al*. Production of a water-soluble fertilizer containing amino acids by solid-state fermentation of soybean meal and evaluation of its efficacy on the rapeseed growth[J]. Journal of Biotechnology, 2014, 187: 34–42.

[24] 尹成红, 雍晓雨, 冉炜, 等. 产γ-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, (2): 91–96.
Yi C H, Yong X Y, Ran W, *et al*. Screening for γ-PGA-producing strain and effect of γ-PGA on growth of maize seedlings[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, (2): 91–96.

[25] Zhu J, Cai Z, Su X, *et al*. Immobilization and phytotoxicity of Pb in contaminated soil amended with γ-poly-glutamic acid, phosphate rock, and γ-polyglutamic acid-activated phosphate rock[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22 (4): 2661–2667.

[26] Lei P, Xu Z, Ding Y, *et al*. Effect of poly(γ-glutamic acid) on the physiological responses and calcium signaling of rape seedlings (*Brassica napus* L.) under cold stress[J]. Agricultural and Food Science, 2015, 63: 10399–10406.

[27] Näsholm T, Kielland K, Ganeteg U. Uptake of organic nitrogen by plants[J]. New Phytologist, 2009, 182: 31–48.

[28] Lipson D, Näsholm T. The unexpected versatility of plants: organic nitrogen use and availability in terrestrial ecosystems[J]. Oecologia, 2001, 128 (3): 305–316.