

# 聚谷氨酸对食品的功能性影响研究进展

彭敏, 张迎庆\*, 王婷, 童雅琴

(湖北工业大学生物工程与食品学院, 武汉 430000)

**摘要:**  $\gamma$ -聚谷氨酸是由谷氨酸经酰胺键连接成的线型聚合物, 其良好的吸水保湿性和生物可降解性是其被广泛应用于食品行业的基本性质。 $\gamma$ -聚谷氨酸是一种优质的食品添加剂, 并且由于其对人体健康具有很多有益作用, 如降低总胆固醇, 增强免疫功能, 增加钙吸收等而得到研究者的广泛关注。所以综述了聚谷氨酸的基本结构以及其用于食品行业的研究进展, 其中重点论述了其对食品的物理特性功能和保健作用功能两个方面所产生的功能性影响的最新研究进展。

**关键词:**  $\gamma$ -聚谷氨酸; 基本结构; 食品; 功能性影响

**中图分类号:** TS202.3/TS218

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-2513 (2021) 07-0138-06

**doi:** 10.19804/j.issn1006-2513.2021.07.022

## Research progress of polyglutamic acid on functional foods

PENG Min, ZHANG Yingqing\*, WANG Ting, TONG Yaqing

(School of Bioengineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan 430000)

**Abstract:**  $\gamma$ -Polyglutamic is a linear polymer connected by glutamic acid via amide bonds. Its good water absorption and moisture retention and biodegradability make it widely used in the food industry.  $\gamma$ -Polyglutamic acid has many beneficial effects on human health, such as lowering total cholesterol, enhancing immune function, and increasing calcium absorption. Therefore, the basic structure of  $\gamma$ -polyglutamic acid and research progress of its application in food industry are reviewed; the latest research of its effects on the physical properties and health functions of food are focused in the paper.

**Key words:**  $\gamma$ -polyglutamic acid ( $\gamma$ -PGA); basic structure; food; functional effects

$\gamma$ -聚谷氨酸 ( $\gamma$ -polyglutamic acid,  $\gamma$ -PGA), 又称为纳豆菌胶、多聚谷氨酸, 它是一种无色无味、无毒安全、可生物降解、可食用的生物高分子<sup>[1]</sup>。 $\gamma$ -PGA最初是作为炭疽芽孢杆菌胶囊的一种成分发现的, 它也存在于“纳豆”(日本传

统食品发酵的大豆)的黏液中<sup>[2]</sup>。目前 $\gamma$ -PGA主要有四种制备方法: 化学合成法、提取法、酶转化法、微生物发酵法<sup>[3]</sup>。但是由于微生物发酵法具有对环境污染小, 生产条件较简单, 且目标产物纯度较高等优点, 所以目前工业上生产

收稿日期: 2021-03-17

作者简介: 彭敏(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然化学产物, E-mail: pengmin13358332728@163.com。

王婷(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 生物工程, E-mail: stopwang19990921@163.com。

\*通信作者: 张迎庆(1969-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 天然化学产物, E-mail: yingqingzhang@163.com。

$\gamma$ -PGA 采用的最多的方法是微生物发酵法<sup>[4]</sup>。作为一种高分子生物材料,  $\gamma$ -PGA 具有良好的成膜性、生物相容性、水溶性、可降解性、可修饰性, 并且对人的身体健康和自然环境都不会造成不利影响, 它也对人体健康具有保健作用<sup>[5]</sup>, 所以  $\gamma$ -PGA 被广泛应用于食品、化妆品、农业、环保、生物医学等行业<sup>[6]</sup>。

## 1 聚谷氨酸的基本结构

$\gamma$ -聚谷氨酸 ( $\gamma$ -PGA) 是由 D-谷氨酸单体和 L-谷氨酸单体组成 (图 1), 通过  $\alpha$ -氨基和  $\gamma$ -羧基之间进行结合, 形成了带有酰胺键的同型聚酰胺<sup>[7]</sup>。通常是由 500 到 5000 个左右的谷氨酸单体组成, 由于其分子聚合度的差异, 其相对分子量一般在 10 ~ 1000kDa 之间, 但有时会增加到 2000kDa<sup>[8]</sup>, 并且相对分子量不同的  $\gamma$ -PGA 的特性和功能会有所差异。其具有三种立体构型, 分别为 L-谷氨酸组成的均聚物 ( $\gamma$ -聚 L-谷氨酸,  $\gamma$ -L-PGA)、D-谷氨酸组成的均聚物 ( $\gamma$ -聚 D-谷氨酸,  $\gamma$ -D-PGA) 和 D-谷氨酸和 L-谷氨酸混合组成的均聚物 ( $\gamma$ -聚 D/L-谷氨酸,  $\gamma$ -D/L-PGA)<sup>[9]</sup>。采用热重分析法和差示扫描量热仪法得出  $\gamma$ -PGA 的热分解温度为 235.9℃, 熔点为 223.5℃<sup>[10]</sup>。 $\gamma$ -PGA 在溶液中的构象会受其本身立体结构和浓度, 以及溶液的离子强度和 pH 等因素的影响<sup>[11]</sup>。 $\gamma$ -PGA 的邻羧基沿主链的空间排列结构从本质上影响着  $\gamma$ -PGA 在酸性介质中的  $\gamma$ -PGA 整体构象<sup>[12]</sup>。地衣芽孢杆菌产生的  $\gamma$ -PGA 在低浓度时和高浓度分别呈现  $\alpha$ -螺旋构型和  $\beta$ -折叠结构; 在低离子强度下是  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -折叠结构, 在高离子强度下是  $\beta$ -折叠结构为主; 在低酸性时是  $\alpha$ -螺旋构型, 在中偏碱性时是  $\beta$ -折叠结构, 在碱性时呈伸展状<sup>[13]</sup>。

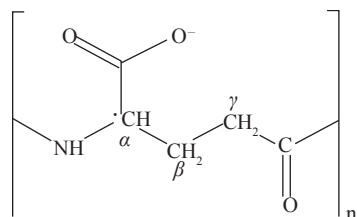


图 1  $\gamma$ -聚谷氨酸结构图<sup>[14]</sup>  
Figure 1 Structural of  $\gamma$ -PGA

## 2 对食品的功能性影响

在食品工业中,  $\gamma$ -PGA 是一种新型健康的食品添加剂。其不仅可以改善食品风味, 营养、增强质感、保持形体, 还能被消化成单一的谷氨酸, 在人体的胃肠道中被吸收<sup>[15]</sup>。在淀粉类食品中加入适量的  $\gamma$ -PGA, 可以维持食品的外形、增强质地和延长食品货架期, 并且还可以改变面筋蛋白的流变性能, 提高面食的持水分能力<sup>[16]</sup>; 在一些高矿物质食品中加入适量的  $\gamma$ -PGA 或其降解产物可以促进小肠对矿物质的吸收<sup>[17]</sup>, 尤其可以提高肠道内对钙的吸收。同时  $\gamma$ -PGA 比糖类、无机盐和蛋白质等常用的一些防冻剂的气味更淡, 对食品本身的风味基本上没有影响, 并且同时能减少氨基酸、奎宁、肽和咖啡因等苦味物质的苦涩味<sup>[18]</sup>, 还可以作为保鲜剂、增稠剂、抗冻剂、稳定剂等<sup>[19]</sup>。食用适量的  $\gamma$ -PGA 还可以减少人体内脂肪和血糖的沉积, 可以降低血脂、血糖含量。

### 2.1 改善食品的物理特性功能

#### 2.1.1 掩味和增强食品风味口感

$\gamma$ -PGA 可作为掩味剂, 它能够遮掩氨基酸、肽、矿物质、维生素和咖啡因等苦味物质的绝大部分苦味。氯化钠、氯化钾在食品中的作用巨大, 但其金属苦味妨碍了其更加广泛的应用, 加入适量的  $\gamma$ -PGA 就可以遮掩其苦涩味, 可以消除不良气味, 改善产品风味, 提高其在食品中的应用<sup>[20]</sup>。有研究表明 0.5%  $\gamma$ -PGA 凝胶的苦味抑制能力大于 1.0% 琼脂的苦味抑制能力, 并且 0.5%  $\gamma$ -PGA 凝胶对基础苦味物的苦味抑制强于 0.5% PGA 凝胶对酸性苦味物的苦味抑制<sup>[21]</sup>。因此  $\gamma$ -PGA 凝胶也许有望成为食疗方法中有用的辅食材料, 它不仅可以增加了吞咽的便捷性, 而且可以掩盖苦味。 $\gamma$ -PGA 还可通过缩短阿斯巴甜、蔗糖素等高强度甜味剂的甜味持续时间, 改善味觉平衡<sup>[22]</sup>。

#### 2.1.2 增强抗冻性

$\gamma$ -PGA 的抗冻性与其保水性相关, 聚合物链之间形成大量氢键、固定水、糖和无机盐分子, 从而具有较强的保水能力, 大多数具有高防冻性能的物质还具有低温保护功能<sup>[23]</sup>, 其效果比常用

的蔗糖、山梨糖、葡萄糖等常用抗冻剂还要好，能有效延长食品的保质期<sup>[24]</sup>。在冷藏面制食品中使用 $\gamma$ -PGA能有效减弱冻藏对面团网络的破坏，提升面团的冻藏稳定性，提高食品品质<sup>[25]</sup>。JIN等<sup>[26]</sup>发现低温下带有 $\gamma$ -PGA的酵母细胞的存活率显著高于相应的对照组，面包冷冻储存8周后含0.5%、1%和3% $\gamma$ -PGA的冷冻甜面团体积分别增加了6.3%、8.9%和3.3%，所以 $\gamma$ -PGA有效提高了酵母细胞和面团的抗冻性。另外田璐<sup>[27]</sup>和TAO等<sup>[28]</sup>都发现 $\gamma$ -PGA可以在低温情况下也可以提高鱼糜的品质，减少冷冻过程中鱼糜凝胶的劣化，在 $-20^{\circ}\text{C}$ 下特别是浓度为0.8%的 $\gamma$ -PGA对草鱼鱼糜抗冻性最好，凝胶强度、盐溶性蛋白浓度、腺苷三磷酸钙酶活性较对照组相比都明显提高了50%以上。此外，也有研究表明， $\gamma$ -PGA的抗冻能力随分子量的减小而增强。

## 2.2 改善食品的保健功能

### 2.2.1 增强肠道内钙的吸收

首先食物中的植酸盐和草酸盐在肠道内与钙形成不溶解和不易吸收的复合物，会降低肠道内钙的吸收，而 $\gamma$ -PGA可以延缓磷酸钙的形成，并且当 $\gamma$ -PGA含量达到一定浓度时还可以减少磷酸钙的形成<sup>[29]</sup>。再者 $\gamma$ -PGA本身也可以与体内游离的钙离子形成可溶性螯合物，有利于增加小肠中钙的溶解性，促进钙的吸收，维持机体中的钙平衡，保证机体正常的生理代谢<sup>[30]</sup>。因此 $\gamma$ -PGA可以明显促进人体对钙的吸收和贮存，并能增强骨质密度促进青少年的骨骼发育，还能减少中老年体内的钙流失，预防骨质疏松的发生<sup>[25]</sup>。并且与 $\text{CaCO}_3$ 相比， $\gamma$ -PGA-Ca具有更高的吸收率和利用率，因此有研究者认为其可作为钙补充剂使用<sup>[31]</sup>。有很多学者都研究了 $\gamma$ -PGA对钙吸收的影响研究。比如：TANNIMOTO等<sup>[32]</sup>首次检验了 $\gamma$ -PGA对人体钙吸收的影响，研究了 $\gamma$ -PGA对绝经后妇女钙吸收的急性作用。发现与未加 $\gamma$ -PGA组相比，加 $\gamma$ -PGA的两组平均钙吸收显著提高，分别为39.1%、34.6%。表明接受单剂量 $\gamma$ -PGA的绝经后妇女增加了她们的肠道钙吸收，特别是那些基础吸收能力较低的人。玉蕾叶等<sup>[33]</sup>发现 $\gamma$ -PGA-Ca与碳酸钙均可使小鼠骨钙及骨磷

总量/骨重比值增大，但是与碳酸钙对照组相比， $\gamma$ -PGA-Ca组小鼠中骨钙总量/骨重增加了31.40%，骨磷总量/骨重增加了37.32%。两者数值的增加说明 $\gamma$ -PGA-Ca能促进机体对钙的吸收，增加体内钙的含量。

### 2.2.2 降低血糖

$\gamma$ -PGA具有改善细胞胰岛素敏感性和促进胰岛素分泌的作用<sup>[34]</sup>，所以 $\gamma$ -PGA可通过降低血糖水平从而预防和缓解II型糖尿病和阿尔茨海默病的症状等代谢综合征<sup>[35]</sup>。日本传统发酵豆制品纳豆中富含 $\gamma$ -PGA，食用 $\gamma$ -PGA含量高的纳豆就可以降低饭后血糖峰值<sup>[36]</sup>。ARIKI等<sup>[37]</sup>评估了食用低含量 $\gamma$ -PGA(LPGA)和高含量 $\gamma$ -PGA(HPGA)的纳豆米饭对餐后血糖水平和胰岛素反应的抑制作用，HPGA餐后45min内血糖和胰岛素的曲线的增量面积均低于LPGA餐后。TAMURA等<sup>[38]</sup>研究了在28d的时间里，给KK-Ay/TaJcl雄性小鼠喂食含有0.5%的 $\gamma$ -PGA和空白对照饲料。实验最后一天取样发现 $\gamma$ -PGA组内脏脂肪明显少于对照组，粪便中油脂的量(干重)以及盲肠乳酸菌计数明显高于对照组。这些结果表明，饮食中 $\gamma$ -PGA可以影响MCA(Y)/TaJcl2型糖尿病小鼠的盲肠微生物群，并改善其内脏脂肪的积累。

### 2.2.3 抗氧化和抗衰老

人体中的自由基具有强氧化性，可损害机体的组织和细胞，会加速机体的衰老，还有皮肤中的透明质酸在一定程度上也会导致皮肤衰老<sup>[39]</sup>。LEE等<sup>[40]</sup>首次报道了细菌产生的 $\gamma$ -PGA的抗氧化性， $\gamma$ -PGA具有清除自由基的能力和可以良好的抑制透明质酸酶的活性，具有抗氧化和抗衰老的作用。不同分子量的 $\gamma$ -PGA对自由基都具有清除能力，都能一定程度的修复光老化细胞损伤并能减少光老化细胞中氧自由基、氮自由基的增加，有研究表明，分子量 $3.0 \times 10^5 \text{kDa}$ 的 $\gamma$ -PGA修复光老化细胞损伤的效果最佳<sup>[41]</sup>。LEE等<sup>[42]</sup>研究了分子量为400kDa的 $\gamma$ -PGA钠盐通过清除3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸基和还原钼表现出抗氧化活性，最大清除活性为0.5mg/mL，还原活性为1mg/mL(相当于20 $\mu\text{g}$ 抗坏血酸)。LEE等<sup>[43]</sup>还在对 $\gamma$ -PGA的抗氧化作用和细胞保护

作用的研究中发现分子量为 400kDa 的  $\gamma$ -PGA 浓度为 1mg/mL 时, 其对羟基自由基的吸附能力达到 85.2%, 对超氧阴离子自由基清除活性达到 94.1%, 对脂质过氧化抑制活性 96.0%。这些结果都表明  $\gamma$ -PGA 具有抗氧化特性, 可应用于功能性食品行业。还有研究者发现在皮肤中存在一种胶原酶, 该酶可以降解胶原、降低皮肤弹性、形成皱纹, 而  $\gamma$ -PGA-VC 复合物可以抑制这种酶的活性<sup>[37]</sup>。但是  $\gamma$ -PGA 作为一种膳食补充剂, 对其抗氧化性能的研究还有待进一步开展。

#### 2.2.4 维护牙齿口腔健康

$\gamma$ -PGA 具有促进牙本质矿化的作用<sup>[44]</sup>, 具有维持牙釉质完整性, 牙齿富钙化和预防龋齿的功效。有人研究聚谷氨酸对人牙釉质的脱矿抑制作用和再矿化潜力及其可能的作用机制, 发现用 1%、2% 聚谷氨酸溶液处理的牙釉质和羟基磷灰石表面与聚谷氨酸粉末处理的牙釉质和羟基磷灰石表面相似, 并且该研究表明, 2% 的聚谷氨酸比氟化钠更有效, 因为它能形成一层涂层, 防止牙齿表面的脱矿化和促进再矿化<sup>[45]</sup>。 $\gamma$ -PGA 也可以作为催涎剂应用到口香糖、糖果、饮料等食品中防止口臭和龋齿。 $\gamma$ -PGA 可促进唾液分泌, 与商用漱口水中使用的氟化物盐和其他蛋白质(它们需要特定的储存温度才能保持效力)等化合物相比, 它在中性 pH 下稳定, 即使在高剂量下也对人体无害<sup>[46]</sup>。

### 3 总结和展望

聚谷氨酸的研究已有几十年的历史, 在所有的生产方法中, 微生物发酵法生产  $\gamma$ -PGA 的技术已经很成熟, 但生产成本, 包括基质成本和工艺成本仍然很高, 因此很多的研究者主要集中研究生产  $\gamma$ -PGA 的优化工艺条件以提高产量和改变其分子质量<sup>[47]</sup>。在食品工业中, 可作为保湿剂、抑菌剂、防冻剂、掩味剂等, 更重要的是, 现在很多的研究都表明  $\gamma$ -PGA 具有很多的功能性保健作用, 这对研究保健品新产品的研发具有很大意义, 但是  $\gamma$ -PGA 功能的一些作用机理仍未得到很确定的解释, 这些领域仍需人们深入的研究, 并且这些研究将有利于开发  $\gamma$ -PGA 在更多领域的应用。有关于聚谷氨酸的功能性产品

的开发还是处于初期阶段, 不过国内  $\gamma$ -PGA 已经由几家公司商业化生产, 包括中国台湾省的 Vedan 生物技术公司、中国大陆的光华时代生物技术公司以及南京闪光生物技术公司, 他们的产品主要用于化妆品、农业和食品。相信聚谷氨酸在未来很长一段时间仍然会是研究热点, 并且随着研究的不断深入,  $\gamma$ -PGA 一定能应用于更多的领域,  $\gamma$ -PGA 新产品也将会不断地被开发出来。

#### 参考文献:

- [1] CAMPOS V, PIMENTEL FIHO N J, Medeiros T A M. Study of bacillus spp. strains used in the production of  $\gamma$ -polyglutamic acid in submerged culture [J]. International Food Research Journal, 2020, 27 (3): 427-434.
- [2] Anju A J, Sindhu R, Parameswaran B, et al. Production, characterization, and applications of microbial poly- $\gamma$ -glutamic acid [J]. Biosynthetic Technology and Environmental Challenges, 2018: 105-126.
- [3] Hsueh Y H, Huang K Y, Kunene S, et al. Poly- $\gamma$ -glutamic acid synthesis, gene regulation, phylogenetic relationships, and role in fermentation [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18 (12): 2644.
- [4] Wang D X, Hwang J S, Kim D H, et al. A newly isolated *Bacillus siamensis* SB1001 for mass production of poly- $\gamma$ -glutamic acid [J]. Process Biochemistry, 2020 (92): 164-173.
- [5] GHOSH K, SENEVIRATHEN A, KANG H S, et al. Complete nucleotide sequence analysis of a novel bacillus subtilis-infecting bacteriophage BSP10 and its effect on poly- $\gamma$ -glutamic acid degradation[J]. Viruses, 2018, 10 (5): 240-257.
- [6] Zhu R Y, Ma X Z, Liu J Y. Optimization of  $\gamma$ -polyglutamic acid synthesis using response surface methodology of a newly isolated glutamate dependent *Bacillus velezensis* Z3 [J]. International Microbiology, 2018, 21 (3): 143-152.
- [7] Ogunleye A, Bhat A, Irorere V U, et al. Poly- $\gamma$ -glutamic acid: Production, properties and applications [J]. Microbiology: Reading, England, 2015, 161 (Pt 1): 1-17.
- [8] Chettri R, Bhutia M O, Tamang J P. Poly- $\gamma$ -glutamic acid (PGA) -producing *Bacillus* species isolated from kinema, Indian fermented soybean food [J]. Frontiers in Microbiology, 2016 (7): 971. doi: 10.3389/fmicb.2016.00971.
- [9] Halmschlag B, Steurer X, Putri S P, et al. Tailor-made poly- $\gamma$ -glutamic acid production [J]. Metabolic Engineering, 2019 (55): 239-248.
- [10] 朱学亮, 罗文亚, 李光, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸水凝胶对  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  的吸附性能 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (13): 255-259.
- [11] Luo Z T, Guo Y, Liu J D, et al. Microbial synthesis of poly- $\gamma$ -glutamic acid: Current progress, challenges, and future perspectives [J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9

- (1) : 1-12.
- [12] Muroga Y, Nakaya A, Inoue A, et al. Conformation of poly ( $\gamma$ -glutamic acid) in aqueous solution [J]. *Biopolymers*, 2016, 105 (4) : 191-198.
- [13] Wang L L, Chen J T, Wang L F, et al. Conformations and molecular interactions of poly- $\gamma$ -glutamic acid as a soluble microbial product in aqueous solutions [J]. *Scientific Reports*, 2017 (7) : 12787.
- [14] 张二伟, 刘宁, 吴涛, 等.  $\gamma$ -PGA 的基本特性、生产方法及相关应用 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39 (16) : 318-324.
- [15] Hu Z Z, Sha X M, Ye Y H, et al. Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on the gelling properties and non-covalent interactions of fish gelatin [J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51 (3) : 511-520.
- [16] Xie X H, Wu X Y, Shen Y, et al. Effect of poly- $\gamma$ -glutamic acid on hydration and structure of wheat gluten [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85 (10) : 3214-3219.
- [17] Yang L C, Wu J B, Ho G H, et al. Effects of poly- $\gamma$ -glutamic acid on calcium absorption in rats [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2008, 72 (12) : 3084-3090.
- [18] Zhang C, Wu D J, Jia J, et al. Fishmeal wastewater as a low-cost nitrogen source for  $\gamma$ -polyglutamic acid production using *Bacillus subtilis* [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10 (4) : 789-795.
- [19] 王国良, 关阳, 张秀荣, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸在食品中的功能性研究进展 [J]. *食品工业*, 2013, 34 (10) : 210-213.
- [20] Wang Q, Wei X, Chen S. Production and application of poly- $\gamma$ -glutamic acid[M]//Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Amsterdam : Elsevier, 2017 : 693-717.
- [21] Kojima H, Ikegami S, Nakamura S, et al. Preparation and evaluation of poly- $\gamma$ -glutamic acid hydrogel mixtures with basic drugs or acidic drugs : Effect on ease of swallowing and taste masking [J]. *Pharmacology & Pharmacy*, 2019, 10 (10) : 427-444.
- [22] 白登荣, 董唯, 齐昕宇, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对鸡肉肌原纤维蛋白功能特性的影响 [J]. *食品与机械*, 2017, 33 (9) : 35-40.
- [23] Yu H Y, Liu H, Wang L, et al. Effect of poly- $\gamma$ -glutamic acid on the stability of set yoghurts [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55 (11) : 4634-4641.
- [24] Bhat A R, Irorere V U, Bartlett T, et al. *Bacillus subtilis* natto : A non-toxic source of poly- $\gamma$ -glutamic acid that could be used as a cryoprotectant for probiotic bacteria [J]. *AMB Express*, 2013, 3 (1) : 1-9.
- [25] 谢新华, 毋修远, 仵军红, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对冻藏面团及馒头品质的影响 [J]. *食品科学*, 2020, 41 (22) : 22-27.
- [26] Jia C L, Huang W N, Tang X J, et al. Antifreeze activity of  $\gamma$ -polyglutamic acid and its impact on freezing resistance of yeast and frozen sweet dough [J]. *Cereal Chemistry Journal*, 2016, 93 (3) : 306-313.
- [27] 田璐.  $\gamma$ -聚谷氨酸的分离纯化及其对鱼糜抗冻性的影响 [D]. 沈阳 : 沈阳农业大学, 2018.
- [28] Tao L, Tian L, Zhang X S, et al. Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on the physicochemical properties and microstructure of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi during frozen storage [J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2020, 134 (7) : 1-8.
- [29] Tanimoto H, Mori M, Motoki M, et al. Natto mucilage containing poly- $\gamma$ -glutamic acid increases soluble calcium in the rat small intestine [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2001, 65 (3) : 516-521.
- [30] Su Y S, Li X, Liu Q Z, et al. Improved poly- $\gamma$ -glutamic acid production by chromosomal integration of the *Vitreoscilla* hemoglobin gene (vgb) in *Bacillus subtilis* [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101 (12) : 4733-4736.
- [31] Xu T T, Zhan S Y, Yi M H, et al. Degradation performance of polyglutamic acid and its application of calcium supplement [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, 29 (7) : 1966-1973.
- [32] Tanimoto H, Fox T, Eagles J, et al. Acute effect of poly- $\gamma$ -glutamic acid on calcium absorption in post-menopausal women [J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2007, 26 (6) : 645-649.
- [33] 玉蕾叶, 孙洪敏, 杜朝, 等. 聚谷氨酸对小鼠钙吸收的影响 [J]. *华北农学报*, 2014, 29 (S1) : 202-205.
- [34] Jeong S Y, Jeong D, Kim D, et al. Chungkookjang with high contents of poly- $\gamma$ -glutamic acid improves insulin sensitizing activity in adipocytes and neuronal cells [J]. *Nutrients*, 2018, 10 (11) : 1588.
- [35] Tamura M, Hori S, Inose A, et al. Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on blood glucose and caecal short chain fatty acids in adult male mice [J]. *Food and Nutrition Sciences*, 2020, 11 (1) : 8-22.
- [36] Araki R, Fujie K, Yuine N, et al. The possibility of suppression of increased postprandial blood glucose levels by gamma-polyglutamic acid-rich natto in the early phase after eating : A randomized crossover pilot study [J]. *Nutrients*, 2020, 12 (4) : 915.
- [37] Araki R, Yamada T, Maruo K, et al. Gamma-polyglutamic acid-rich natto suppresses postprandial blood glucose response in the early phase after meals : A randomized crossover study [J]. *Nutrients*, 2020, 12 (8) : 2374-2385.
- [38] Tamura M, Hoshi C, Kimura Y, et al. Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on the cecal microbiota and visceral fat in KK-a<sup>+/+</sup>TaJcl male mice [J]. *Food Science and Technology Research*, 2018, 24 (1) : 151-157.
- [39] 张天娇, 刘霞, 邓观杰, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸体外抗氧化性及抑制透明质酸酶活性的研究 [J]. *食品与药品*, 2017, 19 (3) : 153-157.
- [40] Lee N R, Lee S M, Cho K S, et al. Improved production of poly- $\gamma$ -glutamic acid by *Bacillus subtilis* D7 isolated from doenjang, a Korean traditional fermented food, and its antioxidant activity [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2014, 173 (4) : 918-932.
- [41] 王薛雪, 李莎, 任战坤, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸的抗氧化及对UV辐射致皮肤细胞老化的修复作用 [J]. *生物加工过程*, 2020, 18 (5) : 561-566.

- [42] Lee J M, Kim J H, Kim K W, et al. Physicochemical properties, production, and biological functionality of poly- $\gamma$ -d-glutamic acid with constant molecular weight from halotolerant *Bacillus* sp SJ-10 [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018 (108): 598-607.
- [43] Lee J M, Jang W J, Park S H, et al. Antioxidant and gastrointestinal cytoprotective effect of edible polypeptide poly- $\gamma$ -glutamic acid [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020 (153): 616-624.
- [44] 苏青青, 林焕彩, 支清惠. 聚谷氨酸/磷酸三钙复合物对牙本质再矿化的研究 [C] //2019年中华口腔医学会口腔预防医学专业委员会第十九次全国学术年会论文集. 兰州, 2019: 187.
- [45] Qamar Z, Haji Abdul Rahim Z B, Neon G S, et al. Effectiveness of poly- $\gamma$ -glutamic acid in maintaining enamel integrity [J]. Archives of Oral Biology, 2019 (106): 104482.
- [46] QAMAR Z, HAJI Z B, CHEW H P, et al. Poly- $\gamma$ -glutamic acid a substitute of salivary protein statherin[J]. Journal of the Chemical Society of Pakistan, 2016, 38 (4): 730-736.
- [47] Luo Z T, Guo Y, Liu J D, et al. Microbial synthesis of poly- $\gamma$ -glutamic acid: Current progress, challenges, and future perspectives [J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9 (1): 1-12.

## 行业组织 品牌展览

### 2021中国国际天然提取物和健康食品配料展览会 ( FIC-健康展 )

#### 暨第二十一届全国秋季食品添加剂和配料展览会

展出时间: 2021年11月10日~12日

展出地点: 广州中国进出口商品交易会展馆B区

主办单位: 中国食品添加剂和配料协会 《中国食品添加剂》杂志社有限公司  
北京中食添会展中心

地址: 北京市朝阳区朝外大街甲6号万通中心C座1402室

电话: 010-59795833 传真: 010-59071335 59071336

电子信箱: cfaa1990@126.com 联系人: 张越宸 尹胜利 陈艳燕

展会网址: www.cfaa.cn