

# 植酸/植酸钠在食品工业上的应用研究进展

沙如意<sup>1</sup>, 崔艳丽<sup>2</sup>, 王少林<sup>3</sup>, 毛建卫<sup>1</sup>, Krystyna Malińska<sup>4</sup>

(1. 浙江科技学院生物与化学工程学院/轻工学院, 浙江省农产品化学与生物加工技术重点实验室, 浙江省农业生物资源生化制造协同创新中心, 浙江杭州 310023) (2. 浙江大学化学系, 浙江杭州 310027)

(3. 桐乡鑫洋食品添加剂有限公司, 浙江桐乡 314515) (4. 琴斯托霍瓦理工大学, 波兰 琴斯托霍瓦)

**摘要:** 植酸/植酸钠广泛存在于谷类、豆类和油料作物等中, 应用非常广泛, 在食品工业上可用作食品抗氧化剂、抑菌剂、护色剂、螯合剂和保鲜剂等。本文简述了植酸/植酸钠的结构、组成和理化特性, 并且综述其在食品工业中的应用与研究进展。重点介绍了植酸/植酸钠在果蔬制品、饮料、发酵食品、酿造酒、油脂和脂肪制品、水产品、肉制品、焙烤制品和面制品等加工中的应用及研究进展。同时探讨了目前植酸/植酸钠在食品工业应用中存在的问题及解决对策, 并对其发展趋势进行展望。指出目前高纯度植酸和固体植酸的生产成本较高, 将来可以在植酸的色谱层析分离材料上进行改进。同时, 为了增加植酸在油性食品中的应用范围, 可以通过植酸的改性或借助于乳化、微乳化技术制备植酸/植酸钠的乳液和微乳液产品, 是将来的发展方向。

**关键词:** 植酸; 抗氧化; 护色; 保鲜; 防腐

文章篇号: 1673-9078(2018)06-293-309

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.6.041

## Application Advances of Phytic Acid/Sodium Phytate in Food Industry

SHA Ru-yi<sup>1</sup>, CUI Yan-li<sup>2</sup>, WANG Shao-lin<sup>3</sup>, MAO Jian-wei<sup>1</sup>, Krystyna Malińska<sup>4</sup>

(1. School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Zhejiang Provincial Key Lab for Chemical and Biological Processing Technology of Farm products, Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of Agricultural Biological Resources Biochemical Manufacturing, Hangzhou 310023, China)

(2. Department of Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China) (3. Tongxiang Xinyang Food Additives CO., LTD, Tongxiang 314515, China) (4. Czêstochowa University of Technology, Czêstochowa Poland)

**Abstract:** Phytic acid/sodium phytate is widely spread in cereals, beans, oil crops and so on, which is widely applied in the food industry used as the food antioxidant, antibacterial agents, color protection agents, chelating agents and preservative. In this paper, the structure, composition, physical and chemical properties of phytic acid/sodium phytate were briefly reviewed, and the application and research progress of phytic acid/sodium phytate in the food industry were reviewed. The application and research progress of phytic acid/sodium phytate in the processing of fruit and vegetable products, beverages, fermented foods, brewed wine, fat and fat products, aquatic products, meat products, bakery products and pasta products were mainly introduced. At the same time, the existing problems in the application of phytic acid/sodium phytate in food industry and the countermeasures were discussed, and the development trend of phytate/sodium phytate was prospected. It was pointed out that the current high-purity phytic acid and solid phytic acid had high production costs and could be improved by phytic acid chromatographic separation materials in the future. In the meantime, in order to increase the application range of phytic acid in oil-soluble foods, phytic acid/sodium phytate emulsions and microemulsion products can be prepared by the modification of phytic acid or by the means of emulsification and microemulsification technology, which is the future development direction.

**Key words:** phytic acid; antioxidation; color protection; preservation; antisepsis

收稿日期: 2017-10-31

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2015C02031、2017C02009); 科技部国家星火计划(2015GA700079); 浙江省农业生物资源生化制造协同创新中心开放基金项目(2016KF0107、2016KF0106); 桐乡市科技计划项目(201402037); 浙江省自然科学基金项目(LQY18B060002)

作者简介: 沙如意(1982-), 男, 博士, 研究方向: 农业生物资源利用和加工

通讯作者: 毛建卫, 教授, 研究方向: 农业生物资源利用和加工

植酸作为一种天然植物化合物, 又名肌醇六磷酸(PA, IP<sub>6</sub>), 最早于1855年由Harting发现, 至今已有100多年的历史。植酸常以游离酸、植酸钠、菲汀(植酸钙/镁)等形式广泛存在于谷类、豆类、油料作物、花粉、孢子和有机土壤中等<sup>[1]</sup>。植酸主要存在于植物中, 近年来在哺乳动物细胞和原核细胞中也发现了植酸的存在。在几乎所有的种子中, 植酸是磷酸盐和肌醇的主要储存形式。在谷类和豆类植物中, 植酸

形式的磷占总磷的 18%~88%；在谷粒、油料种子和豆类中，植酸盐态的磷占总磷的 60~97%。在不同植物中，植酸含量差异较大，大约在 0.4~10.7%之间。在谷物中，植酸含量为 0.50%~1.89%（精米除外）；豆类植物中植酸含量为 0.40%~2.06%，在除大豆和花生以外的油料种子中含量为 2.0%~5.2%，在蛋白产品中含量为 0.4%~7.5%<sup>[2]</sup>。

很长一段时间以来，人们一直认为植酸是一种抗营养剂，随着对其体内和体外实证研究的发展，证实其有益于人类健康的效果，才认为植酸是一种天然食品添加剂和营养品<sup>[3]</sup>。植酸作为防腐剂、抗氧化剂、护色剂、除重金属剂和稳定剂等广泛应用于食品行业，医药和化工行业，近年来引起了越来越多专家和学者的注意与研究。而且植酸钠在 2016 年被批准成为新食品添加剂，拓宽了植酸和植酸钠在食品工业上的应用范围。然而，目前还未见对植酸和新食品添加剂植酸钠在食品工业上的应用进展进行系统性和全面性研究的报道。

本文就植酸在果蔬、饮料、发酵食品、酿造酒、油脂和脂肪制品、水产品、肉制品、焙烤制品和面制品及加工中的应用及研究进展作了阐述，综述了植酸在多个食品加工工业中的具体应用现状，并就植酸在食品工业应用中遇到的问题、解决办法和发展趋势进行了论述。

## 1 植酸的结构和性质

### 1.1 植酸的结构和组成

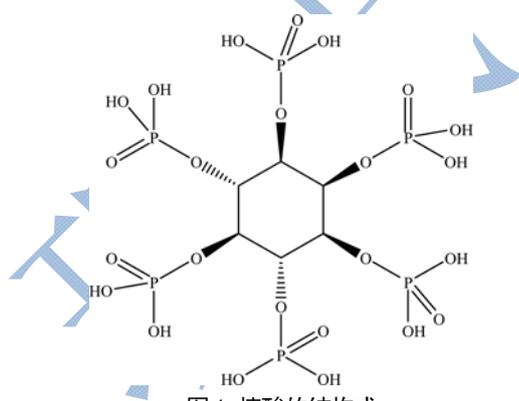


图1 植酸的结构式

Fig.1 Structural formula of phytic acid

植酸的基本结构是由肌醇环和六个磷酸盐基团组成，分子式为  $C_6H_{18}O_{24}P_6$ ，分子量 660.08，其结构式见图 1。植酸具有 12 个可取代的质子，能够与多价阳离子和带正电荷的蛋白质结合形成复合物。植酸具有多种形式，表 1 列出了常见食品中植酸的含量及其它形式植酸（ $IP_5$ ， $IP_4$ ， $IP_3$ ）的含量<sup>[4]</sup>。植酸完全水解

终产物是无机磷酸和肌醇，发生不彻底水解时就会产生五、四、三、二和单磷酸肌醇的一系列混合物<sup>[5]</sup>。

表 1 不同食品、豆类和谷物产品中植酸含量

Table 1 Phytic acid content in different foods, legumes and cereals

原料	植酸/%	相对含量/%			
		$IP_6$	$IP_5$	$IP_4$	$IP_3$
大麦(Betzes)	0.56	69	22	6	3
大北方豆	1.12	93	5	2	0
利马豆	0.84	87	9	4	0
海军豆	1.09	91	6	4	0
斑马豆	0.93	90	5	5	0
荞	1.08	91	8	0.6	0.4
玉米浸泡液	0.08	74	20	3	3
马齿型玉米	0.72	82	16	2	0
玉米(烘烤)	0.07	60	22	10	8
玉米粉	0.10	26	38	25	11
粟	0.81	87	11	1	1
燕麦(烘烤)	0.38	51	32	13	5
燕麦	0.62	81	16	2	1
米糠(0.55%油)	8.70	93	7	-	-
米糠(22%油)	6.55	92	8	-	-
黑麦	0.57	54	31	11	4
高粱	0.81	76	19	4	1
大豆浓缩液	10.7	88	12	0	0
脱脂大豆饼	1.64	92	7	0.5	0.5
菠菜	0.008	100	0	0	0
硬红冬小麦	0.77	88	11	1	0
软白冬小麦	0.65	83	15	2	0
小麦(烘烤)	0.76	70	24	5	1
野生稻米	0.42	60	26	10	4

注：\*引自 Lehrfeld 等利用 HPLC 测定的结果。

### 1.2 植酸的理化和生理活性

植酸易溶于水、95%乙醇、甘油和丙酮，可溶于乙醇-醚的水溶液，微溶于无水乙醇和甲醇，不溶于苯、氯仿和无水乙醚等有机溶剂，是磷元素最稳定的化合物。植酸的水溶液在高温下受热会分解，热稳定性与其浓度具有正相关性，其热变性温度为  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[6]</sup>。

植酸具有特殊的理化特性，磷酸酯部分可用于微生物细胞膜的合成，也具有一些耐温、抗静电和防汽雾等特性；有机磷部分是微生物自身组成成分和其生长发育的一种有效营养物质，而肌醇部分具有维生素 B 族类和生物素的生理功能和活性。植酸的毒性极低，小白鼠经口的  $LD_{50}$  为  $4924\text{ mg/kg}$ ，介于乳酸和山梨酸

之间, 高于氯化钠的半数致死剂量 (4000 mg/kg), 因此比食盐作为食品添加剂更安全<sup>[7]</sup>。对人、畜等进行多种试验如急性毒性试验、蓄积毒性试验、致突变试验等结果表明, 食品级植酸属于低毒弱积蓄类物质, 对生殖细胞和体细胞未见遗传危害作用<sup>[8]</sup>。

由于植酸分子中含有 12 个酸性氢原子, 具有极强的螯合能力, 可以与矿物质、蛋白质、淀粉等组分结合形成不溶性复合物, 进而改变溶解性、功能特性、消化性和吸附特性等。植酸分子通常可以与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  等形成复合物, 通过净电荷作用与蛋白质相结合, 也可以通过氢键相互作用与淀粉结合<sup>[1]</sup>。

植酸的螯合作用、抗氧化性、防腐、防癌等作用一直受到学者和专家的极大关注。在生物体内, 六磷酸肌醇 ( $\text{IP}_6$ ) 及其他形式的降解产物 ( $\text{IP}_5$ ,  $\text{IP}_4$ ,  $\text{IP}_3$ ) 在钙离子和氯离子通道、DNA 和 mRNA 活性以及蛋白质活性上发挥着重要作用<sup>[9-11]</sup>, 植酸的强螯合能力决定着较强的抗氧化活性, 因而具有预防炎症、防止病理性钙化、抗菌、抗肿瘤等生理学活性<sup>[12,13]</sup>。

## 2 植酸在食品工业中的应用及进展

植酸具有独特的化学特性和特殊的生理、药理功能, 广泛用于农业、食品、医药、日化等各个领域。自从人们发现植酸以来, 国外对植酸/植酸盐的理论基础研究和应用研究已达 100 多年, 直到上个世纪 60 年代, 国内科研工作者才开始重视植酸的研究。我国食品添加剂使用标准 (GB 2760-2014) 中规定植酸 (又名肌醇六磷酸) 和植酸钠可以用于以下产品 (最大允许使用量为 0.2 g/kg): 基本不含水的脂肪和油、加工水果、加工蔬菜、装饰糖果 (如工艺造型, 或用于蛋糕装饰)、顶饰 (非水果材料) 和甜汁、腌腊肉制品类

(如咸肉、腊肉、板鸭、中式火腿、腊肠)、酱卤肉制品类、熏、烧、烤肉类、油炸肉类、西式火腿 (熏烤、烟熏、蒸煮火腿) 类、肉灌肠类、发酵肉制品类、鲜水产 (仅限虾类)、调味糖浆、果蔬汁 (浆) 类饮料。国家标准 GB 1886.250-2016 规定了以米糠、玉米芽胚等为原料, 经提取、纯化、结晶分离、干燥而成的食品添加剂植酸钠的新国家标准, 同时 GB 1886.237-2016 也对食品添加剂植酸国家标准进行修订, 均已于 2017 年 1 月 1 日起开始实施, 这为食品添加剂植酸和植酸钠的生产和使用提供了依据。在美国, 植酸被认为是 GRAS (Generally recognized as safe, 公认安全), 植酸 (浓度 50%) 在功能性饮料、运动饮料、等渗饮料、非牛奶和牛奶替代品、酸奶、冷冻蔬菜和泡菜中使用量在 0.02%~0.2% 之间, 作为膳食补充剂的最大使用量为 8% (如表 2 所示)。食用一定剂量的植酸不存在安全性问题, 在美国的男性奶蛋制品素食者中, 植酸摄入量高达 5577 mg/d, 一些欧洲成年人也摄入大量的植酸。在英国, 年龄大于 40 岁的男性摄入植酸量达 2191 mg/d, 而以素食饮食的瑞典成年人对植酸的摄入量达 2027 mg/d。在欧盟, 植酸被批准为抗氧化剂和酸度调节剂 (E391) 而用于食品工业中。在日本, 植酸作为新型食品添加剂被广泛用于食品加工工业。在澳大利亚和新西兰, 澳新食品标准法典 (1.3.3) 加工助剂中规定, 特定量的植酸盐 (包括植酸、植酸镁和植酸钙) 可在任何食品加工中用作护色剂、澄清剂、过滤剂和吸附剂。在意识到植酸/植酸盐特殊的功效后, 世界各国加强对植酸研究和开发的力度。欧美等发达国家不断地研发植酸新型提取工艺, 目前世界上工业化生产植酸产量最大的公司是日本三井东压化学公司, 植酸产量在 60~85 t, 而且关于植酸/植酸盐的相关文献和专利申请量也在逐年增加。

表 2 美国建议植酸在食品工业上的使用范围和使用量\*

Table 2 The use scope and usage of Phytic Acid in food industry proposed by United States

食品种类	建议应用范围	原始最大使用量/%	新的最大使用量/%
饮料和饮料主剂	功能饮料、运动饮料、等渗饮料	0.02	0.2
	非母乳替代品	0.02	0.2
奶制品	牛奶代餐	0.02	0.2
	酸奶	0.02	0.2
加工蔬菜和蔬菜汁	冷冻蔬菜	0.02	0.2
	泡菜	0.02	0.2
补充剂	软胶囊	8.0	8.0

注: \*数据源自 FDA-GRAS Notice 000381。

### 2.1 在果蔬及加工中的应用

#### 2.1.1 保鲜剂

果蔬经鲜切造成机械和物理损伤, 使其贮藏过程中切口容易发生褐变现象, 常需要利用保鲜剂破坏过氧化物酶活性, 抑制微生物生长繁殖。国内外诸多研

究结果表明植酸可作为一种有效的果蔬保鲜剂, 闫晓坤等<sup>[14]</sup>采用浓度为 0.15% 的植酸浸泡鲜切水芹, 在低温 ( $5 \pm 1$  °C) 下, 可有效抑制鲜切水芹褐变和衰老。王健等<sup>[15]</sup>利用 0.2~0.6% 的植酸处理鲜切紫甘蓝, 能显著改善鲜切紫甘蓝在贮藏过程中的品质恶化, 而且对大肠菌群和酵母具有显著的抑菌效果。植酸不仅对果蔬具有保鲜作用, 对于果蔬中营养组分的保持也具有显著作用, 如王纪忠等<sup>[16]</sup>利用 0.01% 的植酸溶液对草莓进行保鲜, 结果表明植酸处理明显减缓草莓果实的维生素 C、可溶性糖、可滴定酸和可溶性固形物含量的下降, 抑制草莓腐烂和失水。祝美云等<sup>[17]</sup>则采用 0.1% 的植酸对草莓进行预浸处理, 可有效降低草莓的质量损失率和呼吸强度, 推迟可溶性固形物出现峰值的时间, 延缓其后熟衰老过程, 抑制其硬度、可滴定酸和维生素 C 含量的下降, 采用 1-甲基环丙烯(1-MCP) 和植酸复合处理更加能显著改善草莓在贮藏期间的果实品质。

为了增强植酸的保鲜效果, 常将植酸与其他护色剂复合应用。张秀玲等<sup>[18]</sup>利用 0.30% 植酸溶液、1.0% 的壳聚糖溶液和 0.30% 抗坏血酸溶液组成复配保鲜剂, 该复配剂对鲜切油豆角的失重率、叶绿素含量、维生素 C 及多酚氧化酶 (PPO) 的含量具有较优的效果。李新楠等<sup>[19]</sup>利用臭氧水与植酸组成复合保鲜剂 (0.2% 植酸+0.5% 氯化钠+0.2% 氯化钙) 处理鲜切藕片, 能够降低鲜切莲藕的失重率和菌落总数, 有效延缓丙二醛含量的上升和藕片 L\* 值的下降, 抑制 PPO 的活性, 防止褐变, 同时使可溶性固形物和硬度维持在较高水平, 提高鲜切藕片贮藏期间的品质。类似地, 许金蓉等<sup>[20]</sup>研究结果表明植酸低温真空条件下对鲜切莲藕贮藏和保鲜具有较好效果, 以 0.2% 植酸+0.4% 乙二胺四乙酸二钠+0.2% L-半胱氨酸+0.25% 的抗坏血酸组成的复合保鲜剂可有效抑制莲藕褐变, 提高贮藏期间产品品质。王蓉蓉等<sup>[21]</sup>将漂烫过的鲜切荸荠浸入由 1.0% 氯化钙溶液、0.15% 亚硫酸氢钠溶液和 0.3% 植酸组成的混合溶液中浸泡 20 min, 对鲜切荸荠具有较好的护色效果。钟政昌等<sup>[22]</sup>利用 EDTA (0.002%)、柠檬酸 (0.01909%)、Vb-Na (0.04%)、植酸 (0.019%)、NaCl (0.159%) 混合组成复合保鲜剂, 对西藏光核桃果浆贮藏 4 个月原后仍然具有较好的保鲜效果。同样地, Zhang 等<sup>[23]</sup>利用修正的气调包装与臭氧预处理和可食用涂膜预处理相结合, 对草莓进行预处理, 结果表明利用聚乙烯醇、植酸 (0.05%)、山梨糖醇和海藻酸盐等相结合, 可以有效地延长草莓的货架寿命。在多数条件下, 利用植酸的复配产品比单一利用植酸具有较好的保鲜效果, 目前现存的问题是如何实现不同

保鲜剂的复配, 如何针对特定的果蔬采用比较精准的配方, 以及在复配过程中, 植酸和其它保鲜剂相互作用机理也还需要进一步研究。

对于植酸的保鲜机理, 国内外科研工作者进行了系列研究, 目前主要归结于如下几个原因: 利用其抗氧化作用, 防止果蔬氧化变质; 封闭果蔬表皮的气孔抑制果蔬呼吸作用, 降低 PPO 的活性, 减少果蔬水分散失, 同时抑制和抵御真菌的繁殖; 与食品辅助添加剂中的金属离子螯合, 抑制或减缓酶促反应的发生, 抑制霉变, 起到一定增色保鲜作用<sup>[24]</sup>。姜丽等<sup>[25]</sup>以紫背天葵为试验材料的研究结果表明, 0.5 mmol/L 植酸处理可以有效减小丙二醛(MDA)和超氧阴离子自由基( $O_2^{\cdot-}$ )的积累, 维持较好的细胞膜完整性, 在抑制呼吸速率和 PPO 活性、增强过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶 SOD 活性方面也效果显著, 可以有效提高紫背天葵贮藏生理品质, 延缓衰老。Li 等<sup>[26]</sup>研究了植酸对鲜切板栗褐变的抑制作用及其对 PPO 和 POD 活性的影响, 结果表明经植酸溶液浸泡后, 抑制了板栗 PPO 和 POD 活性, 从而抑制了板栗内外表面的酶促褐变, 确定植酸 PPO 和 POD 酶的竞争性抑制剂<sup>l</sup>。植酸可能通过螯合钙离子抑制果蔬内各种酶的活力, 从而实现减缓果实的新陈代谢活动, 但对植酸和植酸盐如何影响各种果蔬中的 PPO 酶, 如何保护 SOD 等酶的机理还有待于进一步研究, 此外, 植酸和各种保鲜剂的复配产品与果蔬相关酶的相互作用也需要进一步系统地探索, 以为植酸在果蔬保鲜剂的应用上提供理论支撑。

### 2.1.2 护色剂

许多水果、蔬菜中含有大量酚类物质, 在 pH 6~7 时, 常因为 PPO 的作用, 通过酶促褐变将其催化氧化成不稳定的醌类物质, 进而经过非酶促反应最终会生成黑色素。尽管酶促褐变对某些果蔬食品的颜色和风味是有益的, 但它也不利于水果和蔬菜等食品的加工和贮藏。添加酸性物质如柠檬酸、抗坏血酸和植酸等可以降低水果体系的 pH 或螯合金属离子起到抑制褐变的效果。

#### 2.1.2.1 干燥果蔬及加工中的应用

果蔬干燥过程中常因酶促褐变而影响产品的色泽和品质。传统的护色是采用亚硫酸盐类溶液浸泡处理, 现代的发展趋势是采用无硫护色技术 (如植酸和植酸盐), 可提高干制果蔬食品品质和食用安全性。为提高香蕉片干制后的颜色品质, 陈晓利等<sup>[27]</sup>利用 1.2% 的植酸处理, 护色 20 min 后得到的干制香蕉片具有较好的颜色品质, 与柠檬酸、EDTA、氯化钠和抗坏血酸等单一护色剂相比较, 植酸具有最好的护色效果,

以 0.9%植酸和 0.3%柠檬酸组成的复合护色液对干制后的香蕉片护色, 可达到传统护色剂相似的效果。

为了提高植酸和植酸盐的护色效果, 常利用复合护色剂进行果蔬制品的护色, 可以取得较优的效果。赵光远等<sup>[28]</sup>利用 0.06%的植酸与 0.4%二水合氯化钙、0.6%柠檬酸、0.3%氯化锌组成复合护色液, 用于猕猴桃脆片加工过程中的护绿, 护色 2 h 可获得最佳效果。何胜生等<sup>[29]</sup>对红薯切块后采用 0.2%的柠檬酸和 0.1%的植酸组成无硫复合护色剂, 护色处理 2.5 h 时, 褐变度最低, 护色效果显著。李伟昆等<sup>[30]</sup>以红富士苹果为原料, 经过切片、护色、预冻等预处理和干燥, 利用 0.3%的异 Vc 钠, 0.9%的柠檬酸和 0.018%的植酸钠组成复合护色剂, 对冻干苹果脆片具有较好的护色效果。张贞贞等<sup>[32]</sup>以鲜山药为原料, 采用热风干燥法制备山药粉, 结果表明热风干燥法制备山药粉的最优护色工艺条件为: 柠檬酸浓度 1.28%、L-抗坏血酸浓度 0.05%, 植酸浓度 0.12%, 氯化钙浓度 0.3%<sup>[31]</sup>。黄艳斌等研究了鲜山药片在干制过程中的无硫护色剂配方, 结果表明植酸的护色效果好于 Vc 和 EDTA, 其中以 1.99 g/100 mL 氯化钠、0.84 g/100 mL 柠檬酸和 0.06 g/100 mL 植酸组成的复配护色剂效果最佳。

除了采用植酸复配护色剂, 还可以与其它处理相结合, 会取得较好的护色效果。张良清等<sup>[33]</sup>采用热烫处理与护色剂相结合, 对龙眼肉的护色工艺进行研究, 在 85 °C 下热烫 4 min 后置于 0.1%植酸和 0.2%L-抗坏血酸组成的复合护色剂中护色 40 min, 在此条件下, 龙眼肉 PPO 完全失活, 过氧化物酶 (POD) 残余酶量 5%, 护色效果最佳。对于不同的干燥果蔬, 还可以采用植酸复配剂和热风干燥、微波干燥、烫漂等工艺相结合, 具体的工艺参数和条件还需要进一步研究和探索。

#### 2.1.2.2 新鲜果蔬及加工中的应用

为防止芒果果汁在酶法生产过程中发生褐变, 尚朝杰等<sup>[34]</sup>研究了不同时间添加褐变抑制剂对芒果果汁褐变的影响, 结果表明酶解前添加植酸对芒果果汁褐变具有明显抑制效果, 在最佳复合抑制剂 D-异抗坏血酸钠用量 0.047%, L-半胱氨酸用量 0.06%, 植酸用量 0.017%条件下, 果汁的褐变变化率为 12.19%。张延琦等<sup>[35]</sup>利用植酸对速冻草莓进行预处理 (-20 °C), 发现 0.5%的植酸对色泽的保护作用优于 0.5%抗坏血酸, 但不及 0.9%的柠檬酸对草莓褐变抑制效果。刘俊围等研究了不同护色剂对速冻香蕉褐变抑制效果, 结果表明植酸比 EDTA-2Na、D-异抗坏血酸钠、L-半胱氨酸、氯化钙和柠檬酸等对速冻香蕉褐变抑制效果好, 采用 0.14%的 L-半胱氨酸, 1.32%的植酸和 1.28%的

EDTA-2Na 和 1.70%的 D-异抗坏血酸钠组成混合护色剂, 对速冻香蕉褐变抑制率可达 61.1722%<sup>[36]</sup>。张婷婷等研究了双孢菇切片预处理和罐头汤汁中添加植酸对双孢菇罐头的护色作用, 结果表明, 预煮前以最佳复合护色剂 0.2%柠檬酸, 0.03%柠檬酸亚锡二钠(DSC), 0.02%植酸和 0.03% Vc 护色液浸泡预处理可有效防止菇片褐变, 汤汁复合护色剂的最佳参数组合为 0.03% DSC, 0.02%植酸, 0.3% CaCl<sub>2</sub> 和 0.1%柠檬酸, 复合护色剂可有效抑制双孢菇罐头褐变, 可作为蘑菇罐头中替代焦亚硫酸钠的新型安全高效护色剂<sup>[37]</sup>。此外, 王蕊<sup>[38]</sup>在洋姜泡菜去皮到腌制及切分到脱盐过程中, 添加 0.4%柠檬酸+0.15%抗坏血酸+0.4%氯化钙+0.3% EDTA-2Na+0.6%植酸组成复合抑制剂, 结果表明可以完全抑制褐变现象。

植酸具有抑制 PPO 的作用, 因而可用于防止新鲜果蔬的褐变, 国内外诸多研究报道了植酸对于新鲜果蔬的护色机理。国内吕艳芳等<sup>[39]</sup>以蘑菇 PPO 为原料, 对植酸抑制酶促褐变机理进行研究, 结果表明植酸浓度达到 6.8 mmol/L 时, PPO 相对酶活性仅为原酶活性的 5.97%, 添加植酸增加了反应体系的  $\Delta E$  和  $L^*$  值, 推测植酸是通过竞争性抑制作用于 PPO 而抑制褐变。易建华等<sup>[40]</sup>研究植酸对模拟苹果汁酶促褐变的抑制作用, 结果表明添加 10~80 mmol/L 的植酸明显降低苹果 PPO 的酶促反应速率, 植酸对 PPO 的作用不符合可逆抑制类型中的任一模式, 属于混合型抑制。Du 等<sup>[41]</sup>研究了植酸对于苹果汁酶促和非酶促褐变的影响, 发现 0.1 mM 的植酸对苹果汁中 PPO 的抑制率为 99.2%, 在室温条件下可以显著降低果汁的褐变。目前, 对于植酸抑制酶促和非酶促褐变的机理, 仍然缺乏统一的定论, 还需要针对多个目标体系进行系统地研究。

#### 2.1.3 营养保持剂

植酸在对果蔬制品保鲜和护色的同时, 也有利于营养成分的保持。高原军等研究了微波干燥前不同的抗氧化剂处理对秋葵花生四烯酸 (AA) 和二十二碳六烯酸 (DHA) 保存率的影响。结果表明, 植酸处理能够有效地抑制 Vc 的氧化, 使用 0.07%的植酸与茶多酚、EDTA-2Na 组成复合抗氧化剂对秋葵中的 AA 和 DHA 具有最高的保存率<sup>[42]</sup>。

#### 2.1.4 生物防治剂

此外, 植酸在果蔬生物防治上也具有潜在应用价值。Zhang 等<sup>[43]</sup>研究利用植酸与胶红酵母结合对扩展青霉菌和棒曲霉素污染苹果生物防治的影响, 结果表明, 相比较于对照组, 4  $\mu$ M 的植酸可以降低苹果灰霉病发病率从 86.1%到 62.5%, 采用 4  $\mu$ M 植酸与胶红酵

母结合可取得更好的防治效果, 体外实验结果显示植酸的添加增强了胶红酵母对于扩展青霉菌的防治效果, 为植酸在降低采后果蔬生物污染提供了新的生物防治策略。植酸在果蔬采后保鲜上具有潜在应用, 还可以与常用的生物保鲜剂相结合, 但对于植酸如何影响污染微生物菌群和群落, 如何影响果蔬产品棒曲毒素的污染, 随着代谢组学和宏基因组学等学科的发展, 可望为植酸在生物保鲜剂产品开发上提供新的理论支撑。

## 2.2 在饮料加工中的应用

果蔬饮料加工和贮藏过程中经常因褐变和 Vc 损失而影响产品外观和品质。植酸的抗氧化性、护色性等特性使其在饮料加工上具有广泛的应用价值。丁筑红等研究了植酸对加热杀菌和高温储藏的刺梨果汁中维生素 C 含量和褐变影响, 发现添加植酸 (0.02~0.08%) 的刺梨果汁中, 经加热杀菌处理后 (90 °C, 30 min), 显著提高了果汁中维生素 C 的保存率, 明显降低了褐变程度; 将植酸添加到杀菌后的果汁中恒温贮藏 (50 °C), 维生素 C 的损失和褐变也得到改善<sup>[44]</sup>。王立霞<sup>[45]</sup>以生姜、雪梨为主要研究对象, 对生姜雪梨复合果蔬汁加工工艺进行研究, 结果表明雪梨汁护色剂最优组合为柠檬酸 7 g/L、Vc 0.6 g/L、植酸 0.15 g/L。陈伟<sup>[46]</sup>通过添加褐变抑制剂和微波结合灭酶对甘薯饮料色泽进行保护, 得到最佳褐变抑制的工艺条件: 柠檬酸 0.40%, Vc 0.035%, 植酸 0.020%。Li 等<sup>[47]</sup>研究了 0.1 mM 植酸对于苹果汁抗氧化活性, 维生素 C 和多酚含量的影响, 结果表明植酸可以降低苹果汁贮藏期间 Vc 和多酚含量下降。植酸抗氧化剂作为良好的金属螯合剂, 对铁有较高的亲和力, 即使在铁浓度低达 6 nmol/L 时, 也能形成螯合物阻止其不发生反应, 从而抑制氧化反应速度, 且植酸的添加使饮料样品 pH 降低, 也有利于抑制基质的氧化损失和褐变, 因而可以提高饮料产品的质量。

## 2.3 在发酵食品加工中的应用

植酸作为一种非离子表面活性剂对细胞生长具有一定的影响, 作为发酵促进剂可以积累在细胞膜表面的植酸可以有效地改善细胞的呼吸及物质的传递, 从而促进营养物质的消耗及产物的生成和分泌, 增加菌体生长的酶系<sup>[48]</sup>。

丁筑红等<sup>[48]</sup>发现添加植酸能缩短发酵周期降低刺梨果酒的残糖量, 提高发酵的酒精度, 促进酵母菌的增殖, 促进酵母细胞出芽使其提前进入对数生长期, 也可以使酵母的耐酒精能力提高, 而且植酸的最佳添

加量为 0.08%。该课题组同时研究不同浓度的植酸对根霉、总状毛霉、汉逊酵母在培养过程中生长状况的影响, 通过对微生物菌落总数、菌落形态、pH 值等生化指标的测定, 发现植酸浓度在 0.01%~0.05% 时能促进根霉、总状毛霉增殖, 随着植酸浓度的增加效果明显; 当植酸浓度达到 0.1% 时, 2 株菌生长受到抑制; 在植酸浓度 0.01%~0.1% 时能促进汉逊酵母的生长, 尤其是浓度为 0.1% 时效果最佳, 但当植酸浓度达到 0.3% 时几株菌均不能生长<sup>[49]</sup>。

在微生物发酵食品中, 特别是具有植酸水解酶 (如酵母菌中的肌醇六磷酸-3-磷酸水解酶) 的微生物发酵中, 分解得到肌醇和磷酸两种产物, 肌醇作为一种生物激素, 能够激活微生物体内的酶类, 增加代谢产物的产量, 磷酸则可以作为细菌代谢的磷源物质。Tamang 等<sup>[50]</sup>研究表明, 微生物在发酵过程中, 植酸的含量减少, 有研究认为微生物是利用一定浓度植酸分解代谢产物来促进自身繁殖, 但具体的代谢机理还有待进一步探索。

对于植酸促进发酵原理, 目前普遍认为是植酸可以打破细胞内酶合成的“反馈平行”, 改善细胞膜通透性, 增加膜内外物质交换, 能量转化, 代谢调节等<sup>[3]</sup>。植酸是磷元素的丰富来源, 而磷是核酸和磷脂的成分, 组成多磷化合物及许多酶的活性物质, 微生物对磷的需要量也很高, 一般为 0.005~0.01 mol/L。磷进入细胞后即迅速同化为有机磷化合物, 同时形成 ATP、ADP 等, 用于调节微生物细胞生长及发酵过程的能量代谢。同时, 植酸还是一种非离子型表面活性剂, 积累在细胞膜的表面, 可以改善氧的通透性及物质传递性, 从而加快菌体繁殖速度, 进而加快营养物质的消耗及产物的生成和分泌。El-Batal 等<sup>[51]</sup>报道了植酸作为发酵促进剂能促进某些酶、抗生素等的生物合成, 如植酸盐对蜡状芽孢杆菌草状变种的  $\alpha$ -1,6-葡萄糖苷酶和  $\beta$ -淀粉酶, 隐球菌属某些种的磷酸酶, 枯草芽孢杆菌、绿脓假单胞菌和灰色链霉菌等的蛋白酶, 桔青霉的核糖核苷酶的产生都具有明显的促进作用, 并能使小单胞菌属的某些种如庆大霉素产量提高 7 倍。植酸/植酸盐作为发酵促进剂, 可用于提高菌体的生长繁殖, 加快微生物发酵速度, 提高产品产量等方向。

## 2.4 在酿造酒加工中的应用

### 2.4.1 护色剂

酿造酒在贮藏过程中会发生非酶褐变反应, 从而导致产品的色泽变暗, 风味变差, 不利于营养价值的保持。植酸是一种天然的护色剂, 向果酒中添加植酸可以螯合参与酶褐变体系的金属离子, 对果酒的非酶

褐变也有一定的抑制作用。闫公昕等<sup>[52]</sup>研究了 0.01~0.08 g/L 的植酸溶液、维生素 C、L-半胱氨酸和 EDTA-2Na 等四种抑制剂对沙棘酒贮藏中非酶褐变的抑制作用,发现植酸添加量为 0.08 g/L 时褐变抑制率最大,但是添加植酸总的抑制效果不明显,不及添加量为 1.0 g/L 的维生素。舒念辉<sup>[53]</sup>的研究发现植酸对野木瓜果酒褐变的抑制效果显著优于 EDTA-2Na、抗坏血酸和 L-半胱氨酸,得出最佳的抑制剂组合配方为: 0.08 g/L 的植酸、0.3 g/L 的 EDTA-2 和 1 g/L 的抗坏血酸。因此,在果酒护色上,植酸具有良好的应用前景。

#### 2.4.2 抗氧化剂

为降低果酒发酵过程中抗氧化剂二氧化硫的使用量,有研究者在果酒发酵中添加植酸作为抗氧化剂。王琪等<sup>[54]</sup>发现植酸添加量从 0.02‰增至 0.12‰时,猕猴桃果酒的 Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) 值显著提高,当添加量为 0.14‰时,FRAP 值最高为 4.457±0.011 g/L,采用正交试验得出最优复合抗氧化剂的配方为:植酸 0.14‰,竹叶黄酮 0.09‰,EDTA 二钠 0.029‰,茶多酚 0.06‰。

#### 2.4.3 沉淀剂

植酸/植酸盐作为一种发酵促进剂和良好的沉淀剂,在酿造酒工业应用较为广泛。近年来有研究利用植酸作为酒的新型澄清助剂,主要是因为植酸的配位螯合性能,容易螯合酒中的金属将其除去,从而阻止金属参与蛋白质、单宁、高级脂肪酸酯等物质的缔合和絮凝,有利于除浊。

植酸钙较早用于清除葡萄酒中的三价铁离子,强烈的通气有利于  $Fe^{2+}$  氧化成  $Fe^{3+}$ <sup>[55,56]</sup>。Trela 等<sup>[58]</sup>将植酸添加到红葡萄酒、白葡萄酒和模型酒中(添加量为 0.018 mM),发现植酸可以选择性地去除酒中过多的铁离子和钙离子,而且不影响酒的色泽和酚类物质含量<sup>[57]</sup>。陈晓芸等通过添加 0.06%~0.08%的植酸对番荔枝果酒的澄清去的较好效果。陈珊<sup>[59]</sup>利用 0.04%的植酸处理黄酒,对黄酒具有较好的澄清效果。最近江松涛<sup>[60]</sup>利用各种澄清剂对 5 年陈封缸酒进行澄清处理,结果表明 0.4 g/L 的植酸澄清效果较好,优于高岭土和壳聚糖的效果,利用植酸(0.4 g/L),皂土(0.4 g/L)和明胶-单宁(0.1 g/L)组成的复合澄清剂,更加能够保持封缸酒的稳定性。针对白酒在生产、贮存或运输过程中,常因接触铁器腐蚀,铁离子溶于酒中而使酒体出现浑浊和污染的问题,李立行等<sup>[61]</sup>人利用植酸与金属离子具有很强的螯合作用的特点对白酒进行除锈脱锈技术的研究,结果表明植酸(70%含量)在添加量为 0.03%时,可有效降低白酒中铁离子的含量,改

善白酒品质,使口感和风味更佳。植酸螯合金属离子的特性比较明显,但对于植酸如何在酒中与蛋白质、单宁和不同金属离子相结合,目前还缺乏系统性的研究。

植酸不仅作为酿造酒的澄清助剂,还有助于酿造酒微生物的生长和发酵速度的缩短。丁筑红等<sup>[48]</sup>将植酸应用于刺梨果酒发酵中,研究其作为发酵促进剂对酵母菌的生长繁殖及刺梨酒发酵作用的影响,结果表明在添加 0.08%的植酸能通过促进酵母菌的增殖和促进酵母细胞出芽,使其提前进入对数生长期,而且缩短果酒发酵周期,降低刺梨果酒的残糖量,提高发酵的酒精度,增强酵母菌对于酒精的耐受性。植酸还可以作为改善啤酒风味的助剂,Uchida 等<sup>[62]</sup>报道啤酒中的氧自由基参与啤酒的老化过程,氧化是导致啤酒风味老化的主要原因之一,啤酒风味老化与羟基的出现有关。金属离子是形成羟基的重要催化剂,植酸通过络合金属离子形成稳定性很高的化合物,抑制氧化作用,有效延缓羟基的生成,防止和减缓啤酒中氧化反应的进行,从而使啤酒保持新鲜口感。

#### 2.5 在油脂和脂肪制品中的应用

油脂和脂肪制品在生产和储藏过程中,因微生物、光、水分、热和金属离子等作用导致的氧化酸败会影响食品的风味和品质,可以通过添加抗氧化剂抑制或阻止脂质过氧化反应。随着许多研究表明人工抗氧化剂潜在的致癌性,人们越来越重视对天然提取抗氧化剂的研究。抗氧化剂主要通过自由基清除、金属离子螯合或还原氢过氧化物形成较稳定的羟基复合物抑制油脂的过氧化反应。植酸主要是螯合可促进氧化作用的金属离子,同时释放出氢离子,破坏分解油脂在自动氧化过程中产生的过氧化物,阻止其继续形成醛、酮等有害物,作为抗氧化剂用于油脂和脂肪制品。

有研究表明,植酸对羟自由基的清除效果优于 Vc,对猪油的酸败和过氧化有一定的抑制作用,效果优于抗氧化剂 BHT<sup>[63]</sup>,因此它用于食品抗氧化剂有一定的发展潜力。赵颖等<sup>[64]</sup>以 95%猪脂肪和 5%金龙鱼大豆油组成混合油相,采用 Rancimat 油脂氧化稳定法,研究了不同抗氧化剂对脂肪氧化稳定性的影响,发现 0.01%植酸的氧化诱导时间小于特丁基对苯二酚(TBHQ)、2,6-二叔丁基对甲酚(BHT)、迷迭香酸和 D-异抗坏血酸钠,采用乳化剂和抗氧化剂协同使用可能可以明显延长脂肪的诱导期。目前越来越多的研究表明,植酸对于菜籽油、大豆油、猪油、花生油等油脂具有较好的抗氧化效果。在实际工业化生产和使用过程中,现存的主要问题是水溶性植酸在油脂中的溶

解度过小,还需要进一步通过结构修饰成脂溶性产物,或者通过乳化作用、微乳化制剂等形式将水溶性植酸分散于油脂中。

植酸对金属离子具有螯合作用,对常用的油脂抗氧化剂具有增效和协同作用。魏决等<sup>[65]</sup>在相同浓度的TBHQ、茶多酚和BHT与0.02%植酸复配的增效实验中,发现苹果籽油的氧化稳定性分别增加了41.6%、20.9%和29.9%,植酸对抗氧化剂的增效作用略好于柠檬酸。谭志强等<sup>[66]</sup>研究了植酸等复配抗氧化剂对低能量类可可脂的抗氧化效果,结果表明,组成比例为BHT 0.11%,植酸 0.11%和VE 0.13%的复配抗氧化剂各组间具有显著的协同增效作用。黄克等<sup>[67]</sup>的研究表明采用天然抗氧化剂的复配方迷迭香提取物0.07%、茶多酚0.03%、植酸0.02%、抗坏血酸棕榈酯0.02%,此配方对花生油的抗氧化能力优于TBHQ。范柳萍等<sup>[68]</sup>对高温煎炸棕榈油体系抗氧化剂进行选择,结果表明添加浓度0.004%~0.020%的植酸能够显著降低煎炸棕榈油的过氧化值,且效果优于TBHQ、茶多酚和维生素E,过氧化值只是衡量油脂初期氧化酸败程度的指标,但是植酸在较高添加量时引起油脂酸值和羰基值的上升,将3种天然抗氧化剂进行复配0.02%茶多酚+0.016%植酸+0.65%维生素E与TBHQ具有相同的抗氧化效果,因而可以代替化学合成的人工抗氧化剂。胡林子等<sup>[69]</sup>研究结果表明0.025%的植酸对非洲山毛豆油具有良好的抗氧化效果,且随存放时间的延长抗氧化效果更明显,植酸对TBHQ和BHT复合而成的抗氧化剂表现出较强的抗氧化协同增效作用。目前,植酸复配抗氧化剂仍然面临着各种复配组分在油脂中的溶解性问题,而植酸的增效作用机理也还需要进一步研究。

植酸作为油脂抗氧化剂的重要机制是可以螯合或使催化过氧化物分解和参与Fenton反应的过渡金属元素失活。Sakac等<sup>[70]</sup>利用脂肪模型评价了植酸对油脂的抗氧化活性,结果表明在植酸浓度为0.076~0.30 mM范围内,并不能抑制过氧化物富集的大豆油热氧化,但是对于铁离子诱导的催化氧化表现出较强的抑制效果,从而认为植酸是通过螯合铁离子抑制油脂的催化氧化,结果显示植酸对于亚铁离子的螯合能力远高于EDTA,浓度为117  $\mu\text{M}$ 的植酸可以螯合96%的亚铁离子(菲咯嗪/硫酸亚铁体系),其 $\text{IC}_{50}$ (33.8  $\mu\text{M}$ )远低于EDTA(144  $\mu\text{M}$ )。更进一步地,Zajdel等<sup>[71]</sup>利用HPLC/MS在体内和体外分别研究了植酸对于亚油酸自氧化和催化氧化抑制,以及对人Caco-2细胞 $\text{Fe}^{2+}$ /抗坏血酸诱导的脂质过氧化抑制效果,结果表明高浓度的植酸(100  $\mu\text{M}$ , 500  $\mu\text{M}$ )对于亚铁离子具有

较强的螯合能力(菲咯嗪/硫酸亚铁体系),能清除亚油酸在自氧化过程中活性氧自由基的形成,进而阻止脂质过氧化。

植酸/植酸盐可以改变二价铁离子形成三价铁离子的电势,进而阻止因铁离子和抗坏血酸驱动的脂肪酸的脂质过氧化<sup>[72]</sup>,对辐射后的植酸在脂肪模型中能够更加明显地表现出抗氧化活性<sup>[73]</sup>。而另一方面,早期有研究表明植酸不能抑制链式反应,不能清除自由基,因而不能作为抗氧化剂阻止脂质过氧化,这点与植酸的结构有关,因其缺乏能够转移到过氧自由基上的氢原子,这一点在Sakac等<sup>[70]</sup>研究中也得到了证实,即植酸在浓度为3.7~58.6  $\mu\text{M}$ 范围内,利用 $\beta$ -胡萝卜素/亚油酸模型的 $\beta$ -胡萝卜素漂白法评价中并未显示出明显效果。

Empson等<sup>[74]</sup>在植酸对透明水溶液和水包油乳液两种体系中抗坏血酸的降解的影响效果的研究中发现,1 mmol/L的植酸即可显著地抵抗氧化损伤,乳液的货架期也提高了四倍;其研究小组进而以冷冻鸡肉作为一完整食品体系,植酸显著抑制了氧气的摄入、丙二醛的形成以及重新加热气味的产生,这就为植酸作为抗氧化剂用于油脂的保藏提供了理论依据。Sorour和Ohshima<sup>[75]</sup>证实纯植酸钠和从小麦麸皮中提取的植酸抗氧化活性,该课题组在黑暗条件下40  $^{\circ}\text{C}$ 的环境中,测定了10%冷鱼油水包油乳液的TBARS水平,氧气吸收量和总脂过氧化物含量,发现4 mM的植酸对总过氧化物和TBARS形成量抑制率分别为62%和67%(相对于对照组),效果优于抗坏血酸,该研究为利用植酸延长鱼油和鱼肉的氧化稳定性提供了新的应用方向。植酸对于油脂过氧化保护作用在体内实验也得到验证,如对摄入中等水平铁的猪<sup>[76]</sup>、大鼠<sup>[77]</sup>和小鼠<sup>[78]</sup>饲喂玉米或大豆膳食中的固有植酸,可以显著地降低油脂的氧化作用。在另一项研究中,对高脂饮食小鼠饲喂米糠或纯植酸,通过检测血浆和红细胞中TBARS的水平,发现植酸可显著抑制脂质过氧化<sup>[79]</sup>。目前,对于植酸在体外抗油脂氧化作用上的研究比较多,而对于体内抗油脂氧化作用的研究尚且不多,进一步系统地利用体内模型研究植酸的抗氧化可以为植酸在食品和医药领域的应用提供基础依据。

## 2.6 在水产品加工中的应用

植酸可以作为水产品的保鲜剂,保持水产品的鲜度,防止水产品在贮藏过程中腐败变质,延长产品货架期。黎柳等使用含0.05%、0.1%和0.15%的植酸保鲜剂冰处理鲳鱼,其感官质量、菌落总数、TVB-N、K值、TBA值等指标显著低于普通自来水冰组,植酸

处理组的货架期较自来水冰组延长 1~3 d<sup>[80]</sup>。何丽等<sup>[81]</sup>利用 5 g/L 的植酸浸泡鲜切草鱼鱼腩, 结果表明经植酸保鲜剂处理后鱼腩颜色正常, 保持原有鱼香味, 组织形态和弹性无不良影响, 但在后包装贮藏上, 采用  $\epsilon$ -聚赖氨酸处理后的草鱼鱼腩品质较佳。

采用植酸和其它保鲜剂复配, 可以取得更优效果。王庆丽等<sup>[82]</sup>评价了复合保鲜剂 4 g/L 壳聚糖和 0.4 g/L 植酸对在 -2 °C 冷藏条件下鱼丸品质的影响, 结果表明保鲜剂处理能延长鱼丸货架期, 降低菌落总数, 提高产品的感官品质。谢晶等<sup>[83]</sup>为解决南美白对虾易腐易黑变问题, 利用复配保鲜剂植酸 0.07%、壳聚糖 1.5%、 $\epsilon$ -聚赖氨酸 0.1% 处理南美白对虾, 结果表明复合保鲜剂能够有效地保持南美白对虾的品质, 延长货架期。冯家敏等<sup>[84]</sup>研究表明, 流化冰结合 1.0 g/L 的植酸钠对南美白对虾保鲜, 对虾头部仅轻微褐变, 肌肉紧密有弹性, 感官品质显著优于单纯流化冰保鲜效果。类似地, 熊青等<sup>[85]</sup>为提高冷藏南美白对虾的贮藏品质, 研究了植酸的保鲜效果, 结果表明 0.1% 的植酸能有效抑制对虾的黑变, 和溶菌酶具有相似的抑制总菌效果, 对 PPO 具有温和的抑制效果。谢晶等<sup>[86]</sup>则结合植酸对南美白对虾的保鲜, 以虾体优势腐败菌-腐败希瓦氏菌为研究对象, 利用植酸溶液处理, 以揭示植酸对虾制品保鲜的基本机理, 结果表明植酸对腐败希瓦氏菌有较强的抑菌效果, 最低抑菌浓度为 0.2% (V/V), 植酸能够影响细菌的生长规律, 使细胞破损, 使碱性磷酸酶 AKP 及电导率增大, 初步阐述了植酸对腐败希瓦氏菌的抑菌机理。植酸在水产品保鲜上具有较明显的效果, 但是对于抑制腐败菌机理研究还只限于基础层面, 在将来的研究中还可以研究植酸对腐败希瓦氏菌等群体感应菌株信号分子和群体感应相关基因表达的影响, 从而从分子和基因层面上揭示植酸的保鲜防腐作用。

## 2.7 在肉制品加工中的应用

### 2.7.1 防腐剂

因植酸/植酸盐较强的螯合金属离子活性, 在肉制品工业上可作为防腐剂使用。聂乾忠等<sup>[87]</sup>利用植酸钠等天然抗氧化剂对冷却獭兔肉进行抗氧化及保鲜研究, 结果表明 0.2 g/kg 植酸钠可有效抑制冷鲜兔肉脂肪氧化, 延缓氧化酸败异味的产生, 从而有效延长冷鲜兔肉货架期。刘明芹<sup>[88]</sup>从冷鲜鸭肉中分离出两株肠杆菌, 发现植酸对于肠杆菌的抑制作用非常显著, 而且用于冷鲜鸭肉固体基质保鲜剂具有显著保鲜效果。有研究探讨植酸保鲜剂对冷鲜猪肉中的优势菌属假单胞菌属的抑菌机理, 发现植酸 (1 g/L) 的添加能显著

增加培养液的电导率和碱性磷酸酶活力, 通过破坏假单胞菌细胞膜的通透性和完整性, 造成菌体内环境紊乱, 抑制其生长<sup>[89]</sup>。张赟彬等<sup>[90]</sup>利用 0.5% 植酸钠做成水包肉桂精油微乳液, 能够降低冷藏期间酱牛肉中挥发性盐基氮含量, 并且可以明显减慢细菌总数和大肠菌群总数的增长, 延缓酱牛肉的腐败变质。杨万根等<sup>[91]</sup>研究发现, 调理鸭肉经柔性杀菌 (110 °C, 30 min) 后, 添加 0.05% 的植酸可有效地抑制铝箔、PVC、尼龙复合材料和 PET 等材质包装的调理鸭肉熟食中微生物的生长, 使调理鸭肉的挥发性盐基氮值、硫代巴比妥酸值与空白组相比有显著下降。

延长冷鲜肉制品货架期的常用方法是使用保鲜剂, 但单一的保鲜剂很难单独、有效、安全地抑制所有细菌而用于肉制品中, 比较合适的工艺是采用抑菌原理不同的复合保鲜剂, 通过其协同效应, 增强抑菌效果。杨万根等<sup>[92]</sup>采用 0.1% 的植酸用于冷鲜牛肉保鲜研究, 发现对细菌总数的抑菌效果好于相同浓度下的壳聚糖和乳酸, 将植酸和 Nisin 按照 3:1 比例复配后 (质量浓度 0.15%), 对冷鲜牛肉存在着协同减菌作用。植酸的防腐与其较强的抑菌作用有关<sup>[93]</sup>, 植酸对大肠杆菌有较强的抑菌效果, 最低抑菌浓度 (V/V) 为 0.4%, 可能是植酸改变了大肠杆菌的生长规律, 使细胞破损严重, 细胞壁和细胞膜通透性增加, 细胞质外渗, 菌液中碱性磷酸酶 AKP 含量和电导率增大, 具体的影响机制还需要进一步地研究。

### 2.7.2 抗氧化剂

在肉制品冷却、冷冻和预煮加工过程中, 过热味 (warmed-over flavour, WOF) 的形成一直被认为是其质量恶化的主要原因之一, 这种气味的发展与肉制品中的多不饱和脂肪酸密切相关, 加热促进了铁从肌红蛋白和含铁蛋白中释放, 从而加速了脂肪酸的氧化。目前, 维生素 E, 丁基羟基茴香醚 (BHA) 和 2,6-二叔丁基对甲酚 (BHT) 等抗氧化剂可用于抑制肉制品过热味的发展, 但因其较低的水溶性限制了在烤熟肉制品中的应用。三聚磷酸盐具有水结合特性, 也常用于阻止肉类脂肪的氧化。

利用螯合铁的特性, 将水溶性植酸/植酸钠用于抑制肉制品脂肪氧化具有潜在优势, Lee 等<sup>[94]</sup>在研究中发现植酸可有效抑制牛肉匀浆中铁诱导或非铁诱导的脂质过氧化, 效果优于常用的抗氧化剂抗坏血酸、BHT 和 EDTA, 而且具有剂量依赖性和 pH 依赖性。Louren 等<sup>[95]</sup>研究表明植酸 (2 mM) 对于利用维生素 E 降低鸡胸肉的过热味 (WOF) 具有显著的协同增效作用, 主要也是因为植酸具有抗脂肪氧化的作用。Stodolak 等<sup>[96]</sup>进一步地利用植酸增强肉制品的氧化稳

定性,发现添加浓度为 0.1, 1.0 和 5.0 mM 的植酸可以有效降低原料肉和熟猪肉中硫代巴比妥酸反应产物(TBARS)含量,而且植酸与生牛肉中高铁肌红蛋白的形成呈明显的剂量相关性,在熟肉中添加植酸的作用比生猪肉更加明显。

为了增强植酸的抗氧化特性,可以将植酸和其它抗氧化剂复配,顾仁勇<sup>[97]</sup>采用由 0.36 g/kg 的维生素 C, 0.06 g/kg 的植酸和 0.14 g/kg 的茶多酚组成复配抗氧化剂,结合真空包装可使湘西香肠保藏期限达 160 d,发现茶多酚和植酸之间存在抗氧化协同增效效应,维生素 C 和植酸间无增效作用。王文艳<sup>[98]</sup>则等探索了蜂花粉、蜂花粉复合物(0.6%蜂花粉、0.05%异抗坏血酸钠、0.005%植酸钠)对中式香肠抗氧化和防腐效果的影响,发现蜂花粉复合物与 0.01%竹叶提取物、0.05%异抗坏血酸钠抗氧化性不显著,但具有较好的防腐效果。

植酸具有特殊的抗氧化等生理活性,其低磷酸降解产物四磷酸肌醇(IP<sub>4</sub>)和三磷酸肌醇(IP<sub>3</sub>)在调节细胞响应上发挥着重要作用,具有细胞第二信号转导功能。基于此,有研究者利用 $\gamma$ 射线辐射植酸,发现其降解产物在水溶液模型中的抗氧化性明显增强<sup>[73]</sup>。Park 等<sup>[99]</sup>研究结果证实了辐射照射的植酸能显著抑制牛肉和猪肉匀浆中的脂质氧化,而且能防止肉制品储藏过程中血红素铁和肌红蛋白形成的损失。目前,在如何控制植酸各组分降解产物的比例还未见报道,对于单个降解产物的生物学活性和功能特性的研究尚且不多,对各降解产物的功能特性相关作用机制有待于进一步加强研究。

### 2.7.3 护色剂

鲜肉和肉制品中的颜色是一个非常重要的质量指标,许多因素,包括包装、氧分压、pH 值、温度和细菌等都会影响其颜色稳定性。一些具有抗氧化性或还原性的添加剂可以稳定肉的颜色,从而延长肉和肉制品的货架期。肉和肉制品中的脂质过氧化产物和自由基参与氧合肌红蛋白到高铁肌红蛋白的转变,从而引起棕色变色。植酸/植酸钠作为金属螯合剂和脂质过氧化合成抑制剂可以用于保护肉的颜色。

Lee 等<sup>[100]</sup>在新鲜牛肉和熟牛肉模型系统中,比较了植酸和肌肽的抗氧化性和护色效果,发现两种化合物均能提高僵直后肌肉的 pH 下降速率,抑制原样品在贮存过程中肌红蛋白的形成,植酸能够增加屠宰后糖原分解代谢,比肌肽更加能够抑制脂质过氧化作用,护色效果更好;在烹调过程中具有抑制血红素释放铁的作用,在熟肉制品植酸盐是一种比肌肽更加有效的抗氧化剂。Allen 等<sup>[101]</sup>研究结果表明植酸钠通过阻止

脂质过氧化物的形成,抑制新鲜牛肉色变,且效果明显优于常用的抗氧化剂三聚磷酸盐,但对抑制微生物菌落的形成效果不显著,利用辐射后的植酸处理牛肉和猪肉比抗坏血酸具有更加的护色效果<sup>[99]</sup>。赵颖等<sup>[102]</sup>研究了植酸钠等抗氧化剂对冷冻牛肉的护色效果,结果表明植酸钠对冷冻牛肉护色效果优于烟酰胺和 D-异抗坏血酸钠,利用抗氧化剂的组合物烟酰胺 0.22%、D-异抗坏血酸钠 0.019%、植酸钠 0.033%、茶多酚 0.027%对于冷冻牛肉的护色效果最佳。Brum 等<sup>[103]</sup>研究了植酸对汉堡肉制品色泽和货架期指标的影响,发现 0.20%植酸处理在贮藏后期表现出最低的色泽改变,pH 未发生明显变化,在 30 d 保藏期内, TBARS 值保持在一个较低水平,这为植酸在汉堡类肉制品中的应用提供了理论支撑。

### 2.8 在焙烤制品和面制品加工中的应用

将少量的植酸加入到面包等食品中,可以增强食品中天然色素和合成色素的稳定性。面粉中含有 PPO,在适当条件下可将酚类化合物转变为醌类或其聚合物,使鲜湿面在保存过程中非常容易褐变,针对这一问题,有研究者采用植酸等酸性化合物抑制面制品的褐变,发现 0.06%的植酸可以有效的抑制面条的褐变反应<sup>[104]</sup>,为植酸在焙烤制品和面制品加工中的应用提供了新的思路。

## 3 结论

3.1 目前,人们已经从对植酸/植酸盐的抗营养认识开始转变<sup>[2,105,106]</sup>,植酸的生理学和生物学特性逐渐得到各国科研工作者的普遍关注<sup>[107,108]</sup>。植酸在食品、药品和化妆品等领域表现出潜在的应用价值和发展前景。随着对植酸及其盐类物质研究的不断深入,植酸将更为广泛地应用于食品、医药和化妆品等领域<sup>[109,110]</sup>。但是,目前植酸的广泛应用价值和现状与其优势还不甚符合,主要是高纯度植酸和固体植酸的生产成本较高,将来可以在植酸的色谱层析分离材料等生产工艺上进行改进,进一步降低其生产成本<sup>[111]</sup>。其次,植酸的稳定性还需要进一步研究,液体植酸较强的螯合特性,可以紧密与蛋白质、糖类和金属离子等螯合,使得制备的液体植酸容易螯合蛋白质和金属离子等杂质<sup>[112,113]</sup>,解决植酸提取物原料(如米糠、玉米浆和豆粕等)中蛋白质的脱除,同时回收蛋白质类高附加值产品是获得高品质植酸的关键基础。另外,植酸的水溶性<sup>[114]</sup>,决定其用于水溶性食品的巨大潜力,但是不利于在脂肪或油性食品中的广泛使用,进一步地,可以通过植酸的改性,将其改性加工成植酸的

酯类化合物以增强植酸在油性食品中的应用能力<sup>[115]</sup>,或者借助于乳化和微乳化技术,通过植酸乳液和微乳液产品的制备,增强植酸在油性食品体系中的溶解度。

3.2 尽管早期有很多关于植酸影响机体吸收以矿物质和蛋白质为主的营养元素的研究报道和争议,但随着科学技术研究的深入,植酸显著的抗氧化、防腐抑菌、抗肿瘤等生理、生物学活性功效越来越被科研工作者重视。而且,植酸作为一种天然、绿色、安全、营养、健康的多功能食品添加剂,具有非常广阔的应用前景。在植酸作为食品添加剂的应用和开发上还有许多研究和工作要做。首先,需要扩大植酸提取原料的来源。我国是稻米大国,米糠可作为生产植酸的优质原料,此外,玉米加工废弃物玉米浆、农作物麸皮、酒糟等许多农产品加工的废弃物和工业加工下脚料中富含大量的植酸,充分利用农业加工废弃物资源,为食品工业综合利用和农产品增值提供了新的途径,也有利于产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效和生活富裕的乡村振兴。第二,在植酸的提取工艺和纯化方法上有待于进一步提高,高产率和高纯度植酸的制备工艺有待于进一步研发。特别是在纯化植酸所用的离子交换树脂筛选和改性上,还有诸多问题需要解决,如树脂的工业化放大生产中膨胀炸裂,原料中蛋白质对于离子交换层析的影响,蛋白质对植酸钠结晶的影响等。第三,在植酸作为食品添加剂或食品的应用上,还有很大的发展空间,开发推广也是今后的工作重点。植酸在食品工业上功效较多,还需要扩大其在食品添加剂中的应用范围。通过将植酸和其它食品添加剂进行复配,可以更加充分地发挥植酸的功效。第四,为了增加植酸在油性食品中的应用范围,对植酸进行改性或对植酸进行包埋处理,也是今后的研究方向。随着对植酸研究的深入和应用范围的拓展,随着生物工程、化学工程、食品科学工程等各学科和技术的快速协调发展,植酸在食品工业领域中将发挥更大的作用,其市场前景必将十分广阔,在不远的将来一定会产生愈来愈显著的经济和社会效益。

### 参考文献

- [1] Oatway L, Vasanthan T, Helm J H. Phytic acid [J]. Food Reviews International, 2001, 17(4): 419-431
- [2] Silva E O, Bracarense A P F R L. Phytic acid: from antinutritional to multiple protection factor of organic systems [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(6): R1357
- [3] Reddy N R, Sathe S K, Salunkhe D K. Phytates in legumes and cereals [J]. Advances in Food Research, 1982, 28(4): 1
- [4] Lehrfeld J. Hplc separation and quantification of phytic acid and some inositol phosphates in foods: problems and solutions [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1995, 42(12): 2726-2731
- [5] 吴澎,田纪春,王凤成. 谷物中植酸及其应用的研究进展[J]. 中国粮油学报,2009,24(3):137-143  
WU Peng, TIAN Ji-chun, WANG Feng-cheng. Present situation and application of phytic acid in cereal [J]. Journal of the Chinese Cereals & Oils Association, 2009, 24(3): 137-143
- [6] Daneluti A, Velasco M, Baby A, et al. Thermal behavior and free-radical-scavenging activity of phytic acid alone and incorporated in cosmetic emulsions [J]. Cosmetics, 2015, 2(3): 248
- [7] 高延芬,徐虹,宋焕禄. 植酸及其生理活性研究进展[J]. 食品工业科技,2013,34(1):368-371  
GAO Yan-fen, XU Hong, SONG Huan-lu. Research progress of phytic acid and its bioactivities [J]. Science & Technology of Food Industry, 2013, 34(1): 368-371
- [8] 吴谋成,袁俊华. 植酸的毒理学特性和食用安全性[J]. 适用技术市场,1997,3:27-29  
WU Mou-cheng, YUAN Jun-hua. Toxicological properties of phytic acid and food safety [J]. Applicable Technology Market, 1997, 3: 27-29
- [9] Duong Q H, Clark K D, Lapsley K G, et al. Determination of myo-inositol phosphates in tree nuts and grain fractions by HPLC-ESI-MS [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 5974-82
- [10] Monserrate J P, York J D. Inositol phosphate synthesis and the nuclear processes they affect [J]. Current Opinion in Cell Biology, 2010, 22(3): 365-373
- [11] Sauer K, Cooke M P. Regulation of immune cell development through soluble inositol-1,3,4,5- tetrakisphosphate [J]. Nature Reviews Immunology, 2010, 10(4): 257-271
- [12] Raina K, Ravichandran K, Rajamanickam S, et al. Inositol hexaphosphate inhibits tumor growth, vascularity, and metabolism in TRAMP mice: a multiparametric magnetic resonance study [J]. Cancer Prevention Research, 2013, 6(1): 40-50
- [13] Grases F, Perelló J, Prieto R M, et al. Dietary myo-inositol hexaphosphate prevents dystrophic calcifications in soft tissues: a pilot study in Wistar rats [J]. Life Sciences, 2004, 75(1): 11-9
- [14] 闫晓坤,靳晓琳,杨润强,等. 贮藏温度及护色剂对鲜切水芹

- 贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2015,36(20):344-347  
YAN Xiao-kun, JIN Xiao-lin, YANG Run-qiang, et al. Effect of storage temperature and color fixative on the quality of fresh-cut cress [J]. Science & Technology of Food Industry, 2015, 36(20): 344-347
- [15] 王健,宋亚,方佳宁,等.植酸处理对鲜切紫甘蓝品质的影响[J].浙江农业学报,2015,27(11):2017-2023  
WANG Jian, SONG Ya, FANG Jia-ning, et al. Effect of phytic acid on the quality of fresh cut red cabbage [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(11): 2017-2023
- [16] 王纪忠,张绍铃,周青,等.几种常用保鲜方法对草莓保鲜效果的研究[J].食品研究与开发,2012,33(1):179-181  
WANG Ji-zhong, ZHANG Shao-ling, ZHOU Qing, et al. The effect of six post harvest treatment methods on strawberry fruit quality [J]. Food Research & Development, 2012, 33(1): 179-181
- [17] 祝美云,白欢,魏征,等.1-MCP 与植酸处理对草莓果实采收后生理品质的影响[J].食品科学,2011,32(24):296-300  
ZHU Mei-yun, BAI Huan, WEI Zheng, et al. Effects of individual and combined 1-MCP and phytic acid treatments on physiological characteristics of postharvest strawberry [J]. Food Science, 2011, 32(24): 296-300
- [18] 张秀玲, EVGENIIA, 闫怡, 等.一种复配保鲜剂对鲜切油豆角贮藏品质的影响[J].食品工业,2016,10:147-151  
ZHANG Xiu-ling, Evgeniia, YAN Yi, et al. The effect of a complex preservative on the storage qualities of fresh-cut oil beans [J]. The Food Industry, 2016, 10: 147-151
- [19] 李新楠,王洪斌,严守雷,等.臭氧水对鲜切藕片保鲜效果的影响[J].食品研究与开发,2016,37(8):178-184  
LI Xin-nan, WANG Hong-bin, YAN Shou-lei, et al. Effects of ozonated water on storage properties of fresh-cut lotus root [J]. Food Research & Development, 2016, 37(8): 178-184
- [20] 许金蓉.鲜切莲藕复合保鲜剂的研究[J].食品工业,2014,1:139-142  
XU Jin-rong. Study on preservative for fresh-cut lotus root [J]. The Food Industry, 2014, 1: 139-142
- [21] 王蓉蓉,汪振炯.鲜切荸荠的护色工艺研究[J].食品科技,2015,10:339-344  
WANG Rong-rong, WANG Zhen-jiong. Conditions of color protection technology of fresh-cut Chinese water chestnuts [J]. Food Science & Technology, 2015, 10: 339-344
- [22] 钟政昌,王腾飞,方江平.均匀设计法优化西藏光核桃原果浆保鲜配方[J].食品科技,2014,5:47-52  
ZHONG Zheng-chang, WANG Teng-fei, FANG Jiang-ping. Optimum ingredient of compound antioxidant for Prunus mira koehne pulps by uniform design method [J]. Food Science & Technology, 2014, 5: 47-52
- [23] Zhang M, Xiao G, Salokhe V M. Preservation of strawberries by modified atmosphere packages with other treatments [J]. Packaging Technology & Science, 2006, 19(4): 183-191
- [24] 冯屏,冯小兵,徐玉佩.植酸与金属离子络合的研究[J].中国油脂,2006,31(8):63-66  
FENG Ping, FENG Xiao-bing, XU Yu-pei. Complexation of phytic acid with metal ions [J]. China Oils & Fats, 2006, 31(8): 63-66
- [25] Jiang Li, Jiang Juan, Zhang Li, et al. Physiological and Biochemical Responses of *Gynura bicolor* D.C to Phytic Acid during Storage [J]. Food Science, 2014, 35(2): 316-321
- [26] LI G P, ZHOU D, KAN L N, et al. Competitive inhibition of phytic acid on enzymatic browning of chestnut (*Castanea mollissima* Blume) [J]. Acta Alimentaria, 2017, 46(1): 100-108
- [27] 毕家钰,代曜伊,郑炯.褐变抑制剂对干制香蕉片护色效果的影响[J].食品与机械,2016,32(11):194-197  
Bǐ Jia-yu, DAI Yue-yi, ZHENG Jiong. Effects of different browning inhibitors on color preservation of dried banana slices [J]. Food & Machinery, 2016, 32(11): 194-197
- [28] 赵光远,陈美丽,梁晓童,等.猕猴桃脆片护绿和浸糖的工艺研究[J].食品工业,2016,7:101-104  
ZHAO Guang-yuan, CHEN Mei-li, LIANG Xiao-tong, et al. The study of green-maintaining and sugar permeability of kiwi fruit slices [J]. The Food Industry, 2016, 7: 101-104
- [29] 何胜生.红薯葛根复合糊的工艺优化研究[J].食品与生物技术学报,2016,35(4):443-447  
HE Sheng-sheng. Optimization for the production of a mixed paste of sweet potato and kudzu root [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(4): 443-447
- [30] 李伟昆,农绍庄,胡悦,等.冻干苹果脆片的护色及工艺优化[J].食品工业,2015,3:129-132  
LI Wei-kun, NONG Shao-zhuang, HU Yue, et al. The color protection and process optimization for freeze-dried apple crisps [J]. The Food Industry, 2015, 3: 129-132
- [31] 张贞贞,陆启玉,王晶晶,等.响应面法优化山药粉的护色工艺[J].食品工业科技,2014,35(20):336-339  
ZHANG Zhen-zhen, LU Qi-yu, WANG Jing-jing, et al. Optimization of color protection process for yam powder by response surface methodology [J]. Science & Technology of Food Industry, 2014, 35(20): 336-339
- [32] 黄艳斌,李星琪,张洵,等.鲜山药片干制过程中的无硫护色剂配方优化[J].食品工业科技,2014,35(12):324-329

- HUANG Yan-bin, LI Xing-qi, ZHANG Xun, et al. Optimization of non-sulfur color-preservation formulation in the process of the fresh yam slices dried [J]. Science & Technology of Food Industry, 2014, 35(12): 324-329
- [33] 张良清,邱佳容,康彬彬,等.龙眼肉护色工艺的优化[J].食品工业,2015,11:128-131
- ZHANG Liang-qing, QIU Jia-rong, KANG Bin-bin, et al. Optimization on the Color Preserved Technology of Longan Pulps [J]. The Food Industry, 2015, 11: 128-131
- [34] 尚朝杰,王维民,谌素华,等.芒果果汁抗褐变工艺优化[J].食品与发酵工业,2014,40(9):232-237
- SHANG Chao-jie, WANG Wei-min, CHEN Su-hua, et al. Optimization on anti-browning process of mango juice by response surface methodology [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(9): 232-237
- [35] 张延琦,赵金红,倪元颖.不同预处理方式对速冻草莓冻藏品质的影响[J].食品工业,2016,5:145-150
- ZHANG Yan-qi, ZHAO Jin-hong, NI Yuan-ying. Effect of different pre-treatment on the quality of frozen strawberry [J]. The Food Industry, 2016, 5: 145-150
- [36] 刘俊围,王维民,谌素华,等.速冻香蕉护色剂的研究[J].食品与发酵工业,2015,41(2):129-134
- LIU Jun-wei, WANG Wei-min, CHEN Su-hua, et al. The response surface method optimization quick-frozen banana color fixative research [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(2): 129-134
- [37] 张婷婷,夏文水,姜启兴,等.柠檬酸亚锡二钠对双孢菇罐头的护色作用[J].食品与生物技术学报,2013,32(1):82-88
- ZHANG Ting-ting, XIA Wen-shui, JIANG Qi-xing, et al. Research on anti-browning of disodium stannous citrate in canned *Agaricus bisporus* [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2013, 32(1): 82-88
- [38] 王蕊.洋葱泡菜褐变环节及其控制方法的研究[J].食品研究与开发,2014,11:35-38
- WANG Rui. Study on browning of jerusalem artichoke pickle and its inhibition method [J]. Food Research & Development, 2014, 11: 35-38
- [39] 吕艳芳,迟乾苏,徐芳,等.植酸对多酚氧化酶的抑制作用[J].中国食品学报,2016,16(5):82-88
- LV Yan-fang, CHI Qian-su, XU Fang, et al. Inhibition effect of phytic acid against polyphenol oxidase [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(5): 82-88
- [40] 易建华,董新玲,朱振宝,等.褐变抑制剂对苹果多酚氧化酶抑制机理研究[J].食品与机械,2015,4:122-125
- YI Jian-hua, DONG Xin-ling, ZHU Zhen-bao, et al. Mechanism of different inhibitors on apple polyphenol oxidase in a model system [J]. Food and Machinery, 2015, 4: 122-125
- [41] DU Y, DOU S, WU S. Efficacy of phytic acid as an inhibitor of enzymatic and non-enzymatic browning in apple juice [J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 580-582
- [42] 高原军,张亚晓,周婧琦,等.抗氧化剂处理对秋葵微波干燥过程中Vc变化的影响[J].食品科技,2015,2:333-336
- GAO Yuan-jun, ZHANG Ya-xiao, ZHOU Jing-qi, et al. Effect of antioxidants on the Vc of okra in microwave drying [J]. Food Science & Technology, 2015, 2: 333-336
- [43] YANG Q, ZHANG H, ZHANG X, et al. Phytic acid enhances biocontrol activity of *rhodotorula mucilaginosa* against *penicillium expansum* contamination and patulin production in apples [J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6(8)
- [44] 丁筑红,谭书明,吴翔.植酸对不同热处理刺梨果汁Vc含量及褐变的影响[J].食品研究与开发,2004,25(5):58-60
- DING Zhu-hong, TAN Shu-ming, WU Xiang. Influence of Pa on Vc contents and browning of bur fruit juice with different heating treatment [J]. Food Research & Development, 2004, 25(5): 58-60
- [45] 王立霞.生姜雪梨复合果蔬汁加工工艺研究[J].食品工业科技,2013,34(21):219-223
- WANG Li-xia. Research of processing technology of compound juice made from ginger and snow pear [J]. Science & Technology of Food Industry, 2013, 34(21): 219-223
- [46] 陈伟.甘薯饮料褐变抑制工艺的研究[J].食品研究与开发,2012,33(10):187-190
- CHEN Wei. Study oil brown-restraining technics of sweet potato beverage [J]. Food Research & Development, 2012, 33(10): 187-190
- [47] Weiqin Li, Shaoying Zhang, Li C. Effects of phytic acid on nutrients and antioxidant activities of apple juice [J]. Sch. J. Eng. Tech., 2015, 3(7): 667-671
- [48] 丁筑红,谭书明,伍佳琪,等.植酸对刺梨果酒发酵作用及酵母菌生长影响研究[J].食品科学,2006,27(4):129-133
- DING Zhu-hong, TAN Shu-ming, WU Jia-qi, et al. Study on effects of phytic acid on yeast growth and fermentation of *rosa roxburghii* tratt wine [J]. Food Science, 2006, 27(4): 129-133
- [49] 丁筑红,谭书明,何绪晓,等.植酸对几株真菌促生长作用的研究[J].中国酿造,2008,3:9-13

- DING Zhu-hong, TAN Shu-ming, HE Xu-xiao, et al. Effect of phytic acid on growth enhancement of fungi [J]. China Brewing, 2008, 3: 9-13
- [50] Tamang B, Tamang J P. Lactic acid bacteria isolated from indigenous fermented bamboo products of arunachal pradesh in india and their functionality [J]. Food Biotechnology, 2009, 23(2): 133-147
- [51] El-Batal A I, Abdel K H. Phytase production and phytic acid reduction in rapeseed meal by *Aspergillus niger* during solid state fermentation [J]. Food Research International, 2001, 34(8): 715-720
- [52] 闫公昕, 牛广财, 朱丹, 等. 沙棘酒非酶褐变抑制方法的研究 [J]. 中国酿造, 2016, 35(8): 57-60
- YAN Gong-xin, NIU Guang-cai, ZHU Dan, et al. Non-enzymatic browning inhibition method of sea buckthorn wine [J]. China Brewing, 2016, 35(8): 57-60
- [53] 舒念辉. 野木瓜发酵酒褐变机理及控制研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2012
- SHU Nian-hui. Study on the browning mechanism and control in stanuntonia chinensis DC wine [D]. Chongqing: Southwest University, 2012
- [54] 王琪, 辜义洪, 刘琨毅, 等. 几种抗氧化剂在猕猴桃酒中应用效果研究 [J]. 中国食品添加剂, 2016, 11: 149-154
- WANG Qi, GU Yi-hong, LIU Kun-yi, et al. Study on the application effect of several antioxidants in Kiwi wine [J]. China Food Additives, 2016, 11: 149-154
- [55] M A Joslyn, Lukton A. Prevention of copper and iron turbidities in wine [J]. Hilgardia, 1953, 22(14): 451-453
- [56] Cordonnier R. Removal of iron from white wine by calcium phytate. (Added for clearing purpose and comparison with the treatment with potassium ferrocyanide) [J]. Ann. Falsifications Fraudes, 1952, 45415-45426
- [57] TRELA B C. Iron stabilization with phytic acid in model wine and wine [J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2010, 61(2): 253-259
- [58] 陈晓芸, 曹郁生. 番荔枝果酒酿造工艺研究 [J]. 农产品加工·学刊, 2012, 5: 58-60
- CHEN Xiao-yun, CAO Yu-sheng. Brewing process of sugar apple wine [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2012, 5: 58-60
- [59] 陈珊. 黄酒澄清新技术开发及非生物稳定性研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015
- CHEN Shan. Development of new clarification technology and study on non-biological stability to Chinese rice wine [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015
- [60] 江松涛. 封缸酒中的美拉德反应及稳定性研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015
- JIANG Song-tao. Study of maillard action in jar-sealed rice wine and its stability research [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015
- [61] 李立行, 崔海灏. 应用植酸对白酒除浊脱锈技术的研究 [J]. 酿酒科技, 2008, 11: 73-74
- LI Li-xing, CUI Hai-hao. Research on turbidity removal & rust cleaning of liquor by use of phytic acid [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2008, 11: 73-74
- [62] Uchida M, Ono M. Improvement for oxidative flavor stability of beer-role of OH-radical in beer oxidation [J]. American Society of Brewing Chemists, 1996, 54(4): 198-204
- [63] 兰文菊, 彭密军, 彭胜, 等. 莱籽粕脱毒液中植酸的提取及其抗氧化活性 [J]. 食品科学, 2011, 32(17): 172-175
- LAN Wen-ju, PENG Mi-jun, PENG Sheng, et al. Extraction and antioxidant activity of phytic acid from detoxified rapeseed meal solution [J]. Food Science, 2011, 32(17): 172-175
- [64] 赵颖, 孙焕, 冯伟, 等. 抗氧化剂与乳化剂对提升脂肪氧化稳定性的研究 [J]. 中国食品添加剂, 2015, 7: 53-57
- ZHAO Ying, SUN Huan, FENG Wei, et al. Study on how antioxidants and emulsifiers enhance fat oxidation stability [J]. China Additives, 2015, 7: 53-57
- [65] 魏决, 万萍. 常用抗氧化剂及增效剂对苹果籽油氧化稳定性的比较 [J]. 食品科技, 2014, 8: 234-237
- WEI Jue, WAN Ping. Comparative investigation of antioxidants and metal deactivators on oxidation stability of apple seed oil [J]. Food Science & Technology, 2014, 8: 234-237
- [66] 谭志强, 吴炜亮, 潘露云, 等. 复配抗氧化剂对低能量类可脂抗氧化作用的研究 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(19): 285-287
- TAN Zhi-qiang, WU Wei-liang, PAN Lu-yun, et al. Study on the antioxidative effect of antioxidant compound on low-calorie cocoa butter equivalent [J]. Science & Technology of Food Industry, 2012, 33(19): 285-287
- [67] 黄克, 崔春, 赵谋明, 等. 天然抗氧化剂的增效作用及其对花生油抗氧化效果研究 [J]. 现代食品科技, 2012, 9: 1139-1141
- HUANG Ke, CUI Chun, ZHAO Mou-ming, et al. Study on synergies of natural antioxidants and their antioxidation functions on peanut oil [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 9: 1139-1141
- [68] 范柳萍, 鲁璐, 刘元法, 等. 高温煎炸棕榈油体系抗氧化剂的选择 [J]. 中国油脂, 2012, 37(3): 40-43

- FAN Liu-ping, LU Lu, LIU Yuan-fa, et al. Selection of the antioxidant on the high temperature fried palm oil system [J]. *China Oils and Fats*, 2012, 37(3): 40-43
- [69] 胡林子,李新华,马永全,等.非洲山毛豆油抗氧化稳定性研究[J]. *食品科技*,2011,6:213-216
- HU Lin-zi, LI Xin-hua, MA Yong-quan, et al. Anti-oxidation stability of *T.vogelii* Hook f. seed oil [J]. *Food Science & Technology*, 2011, 6: 213-216
- [70] Sakač M, Čanadanović-Brunet J, Mišan A, et al. Antioxidant activity of phytic acid in lipid model system [J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2010, 48(4): 524-529
- [71] Zajdel A, Wilczok A, Weglarz L, et al. Phytic acid inhibits lipid peroxidation *in vitro*[J]. *Biomed Research International*, 2013, 6. 10.1155/2013/147307
- [72] Graf E, Empson K L, Eaton J W. Phytic acid. A natural antioxidant [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1987, 262 (24): 11647-50
- [73] Ahn H J, Kim J H, Yook H S, et al. Irradiation effects on free radical scavenging and antioxidant activity of phytic acid [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 68(7): 2221-2224
- [74] Empson K L, Labuza T P, Graf E. Phytic acid as a food antioxidant [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 56(2): 560-563
- [75] Sorour M A, Ohshima T. Inhibitory effects of phytic acid as a natural antioxidant in prevention of fish oil peroxidation [J]. 2010, 53
- [76] Porres J M, Stahl C H, Cheng W H, et al. Dietary intrinsic phytate protects colon from lipid peroxidation in pigs with a moderately high dietary iron intake [J]. *Proceedings of the Society for Experimental Biology & Medicine Society for Experimental Biology & Medicine*, 1999, 221(1): 80-6
- [77] Nelson R L, Yoo S J, Tanure J C, et al. The effect of iron on experimental colorectal carcinogenesis [J]. *Anticancer Research*, 1990, 9(6): 1477-82
- [78] Singh A, Singh S P, Bamezai R. Modulatory influence of arecoline on the phytic acid-altered hepatic biotransformation system enzymes, sulfhydryl content and lipid peroxidation in a murine system [J]. *Cancer Letters*, 1997, 117(1): 1-6
- [79] Kang M Y, Kim S M, Rico C W, et al. Hypolipidemic and antioxidative effects of rice bran and phytic acid in high fat-fed mice [J]. *Food Science & Biotechnology*, 2012, 21(1): 123-128
- [80] 黎柳,谢晶,苏辉,等.含茶多酚、植酸生物保鲜剂冰对鲳鱼保鲜效果的研究[J]. *食品工业科技*,2015,36(1):338-343
- LI Liu, XIE Jing, SU Hui, et al. Fresh keeping effect of the icing with tea polyphenols and phytic acid on pomfret [J]. *Science & Technology of Food Industry*, 2015, 36(1): 338-343
- [81] 何丽,侯温甫,艾有伟.鲜切草鱼鱼腩保鲜剂筛选与货架期[J]. *食品科学*,2016,37(4):260-265
- HE Li, HOU Wen-fu, AI You-wei. Preservative screening for prolonged shelf life of fresh-cut grass fish belly during cold storage [J]. *Food Science*, 2016, 37(4): 260-265
- [82] 王庆丽,励建荣,朱军莉,等.壳聚糖和植酸复合生物保鲜剂对冷藏鱼丸品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*,2012,31(12):1239-1244
- WANG Qing-li, LI Jian-rong, ZHU Jun-li, et al. Influence on quality of fish meatballs by the chitosan and phytic acid [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2012, 31(12): 1239-1244
- [83] 谢晶,侯伟峰,朱军伟,等.复合生物保鲜剂在南美白对虾防黑变中的应用[J]. *农业工程学报*,2012,28(5):267-272
- XIE Jing, HOU Wei-feng, ZHU Jun-wei, et al. Application of combined preservative in anti-melanosis of *penaeus vannamei* [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(5): 267-272
- [84] 冯家敏,张宾,蒋林珍,等.流化冰结合防黑剂、抑菌剂对南美白对虾的保鲜效果[J]. *食品科学*,2016,37(2):244-249
- FENG Jia-min, ZHANG Bin, JIANG Lin-zhen, et al. Quality preservation of fresh shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by employment of slurry ice in combination with bacteriostatic agent and melanosis inhibitor [J]. *Food Science*, 2016, 37(2): 244-249
- [85] 熊青,谢晶,高志立,等.不同生物保鲜剂对冷藏南美白对虾的保鲜效果[J]. *食品工业科技*,2014,35(1):270-274
- XIONG Qing, XIE Jing, GAO Zhi-li, et al. Effects of natural preservatives on shrimp (*Penaeus vannamei*) during cold storage [J]. *Science & Technology of Food Industry*, 2014, 35 (1): 270-274
- [86] 谢晶,侯伟峰,汤毅,等.植酸对腐败希瓦氏菌的抑菌机理[J]. *食品工业科技*,2011,10:85-88
- XIE Jing, HOU Wei-feng, TANG Yi, et al. Antimicrobial mechanisms of phytic acid against *Shewanella putrefacens* [J]. *Science & Technology of Food Industry*, 2011, 10: 85-88
- [87] 聂乾忠,夏延斌,曾晓楠.三种天然抗氧化剂对冷鲜兔肉保鲜效果研究[J]. *食品与机械*,2012,28(5):155-158
- NIE Qian-zhong, XIA Yan-bin, ZENG Xiao-nan. Study on antioxidative effects of 3 natural antioxidants On chilled rabbit meat [J]. *Food and Machinery*, 2012, 28(5): 155-158

- [88] 刘明芹.基于肠杆菌控制的冷鲜鸭肉保鲜方法研究[D].武汉:武汉轻工大学,2014  
LIU Ming-qin. A simplified method for selecting preservation methods of chilled duck meat based on the growth control of enterobacter [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2014
- [89] 孔萍,陈振青,易阳,等.三十种保鲜剂对冷鲜猪肉中假单胞菌细胞膜的影响[J].食品工业,2015,11:207-210  
KONG Ping, CHEN Zhen-qing, YI Yang, et al. Effect of the preservative on pseudomonas migula from chilled pork [J]. The Food Industry, 2015, 11: 207-210
- [90] 张赟彬,李维迪,王一非,等.肉桂精油复合微乳体系构建及其在酱牛肉加工中的应用[J].现代食品科技,2016,8:156-162  
ZHANG Yun-bin, LI Wei-di, WANG Yi-fei, et al. Fabrication of cinnamon essential oil-based composite microemulsions and their applications in braised beef [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 8: 156-162
- [91] 杨万根,李冠霖,曹泽虹,等.乳酸链球菌素、植酸及包装材料对调理鸭肉的保鲜效果比较[J].食品与发酵工业,2016,42(12):217-221  
YANG Wan-gen, LI Guan-lin, CAO Ze-hong, et al. Comparison on preservation effect of Nisin, phytic acid and packaging materials for pretreated duck meat [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(12): 217-221
- [92] 杨万根,李满凤,朱秋劲,等.冷鲜牛肉复合天然减菌剂的筛选及优化[J].食品与发酵工业,2015,41(2):30-34  
YANG Wan-gen, LI Man-feng, ZHU Qiu-jing, et al. Selection and optimization of a natural complex preservative for chilled beef [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(2): 30-34
- [93] 侯伟峰,谢晶,蓝蔚青,等.植酸对大肠杆菌抑菌机理的研究[J].江苏农业学报,2012,28(2):443-447  
HOU Wei-feng, XIE Jing, LAN Wei-qing, et al. Antimicrobial mechanisms of phytic acid against *Escherichia coli* [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 2012, 28(2): 443-447
- [94] Lee B J, Hendricks D G. Phytic acid protective effect against beef round muscle lipid peroxidation [J]. Journal of Food Science, 1995, 60(2): 241-244
- [95] Louren S A, Rubison O, Massamiida S, et al. Synergism between dietary vitamin E and exogenous phytic acid in prevention of warmed-over flavour development in chicken breast meat, *Pectoralis major* M [J]. Braz. Arch. Biol. Technol., 2004, 47(1): 57-62
- [96] Stodolak B, Starzyńska A, Czyszczon M, et al. The effect of phytic acid on oxidative stability of raw and cooked meat [J]. Food Chemistry, 2007, 101(3): 1041-1045
- [97] 顾仁勇,杨万根.湘西香肠复配抗氧化剂配方优化[J].食品与发酵工业,2016,42(12):138-143  
GU Ren-yong, YANG Wan-gen. Optimization of mixed antioxidant for Xiangxi sausage by response surface methodology [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42 (12): 138-143
- [98] 王文艳,焦镭,韩二芳,等.油菜蜂花粉及其复合物对中式香肠抗氧化防腐效果的研究[J].食品工业,2014,8:32-35  
WANG Wen-yan, JIAO Lei, HAN Er-fang, et al. Effect of rape bee-pollen and its compound on antioxidant and antimicrobial capability in Chinese-style sausage [J]. The Food Industry, 2014, 8: 32-35
- [99] Park H R, Ahn H J, Kim J H, et al. Effects of irradiated phytic acid on antioxidation and color stability in meat models [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2004, 52(9): 2572
- [100] Lee B J, Hendricks D G, Cornforth D P. Antioxidant effects of carnosine and phytic acid in a model beef system [J]. Journal of Food Science, 1998, 63(3): 394-398
- [101] Allen K, Cornforth D. Comparison of spice-derived antioxidants and metal chelators on fresh beef color stability [J]. Meat Science, 2010, 85(4): 613-619
- [102] 赵颖,李雨林,冯伟,等.抗氧化剂对冷冻牛肉护色效果的应用研究[J].中国食品添加剂,2013,4:165-173  
ZHAO Ying, LI Yu-lin, FENG Wei, et al. The study of antioxidants on the color of frozen beef [J]. China Food Additives, 2013, 4: 165-173
- [103] Brum F B, Macagnan F T, Monego M A, et al. Phytic acid addition into hamburger-type meat product [J]. Revista do Instituto Adolfo Lutz (Impresso), 2011, 70(1): 47-52
- [104] 李华,韩金玉,陆启玉,等.不同有机酸对鲜湿面护色效果的影响[J].河南工业大学学报:自然科学版,2014,35(6):41-44  
LI Hua, HAN Jin-yu, LU Qi-yu, et al. Influences of different organic acids on color protection effect of fresh noodles [J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2014, 35(6): 41-44
- [105] Lee H H, Loh S P, Bong C F, et al. Impact of phytic acid on nutrient bioaccessibility and antioxidant properties of dehusked rice [J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(12): 7806
- [106] Burgos L I, Tong A Z. Determination of phytic acid in juices and milks by developing a quick complexometric-titration method [J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(7): 1-6

- [107] Guo Q, Cao J, Han Y, et al. Biological phytic acid as a multifunctional curing agent for elastomers: towards skin-touchable and flame retardant electronic sensors [J]. *Green Chemistry*, 2017, 19
- [108] Sekita A, Okazaki Y, Katayama T. Dietary phytic acid prevents fatty liver by reducing expression of hepatic lipogenic enzymes and modulates gut microflora in rats fed a high-sucrose diet [J]. *Nutrition*, 2016, 32(6): 720
- [109] Luis A, Daneluti M, Valéria M, et al. Thermal behavior and free-radical-scavenging activity of phytic acid alone and incorporated in cosmetic emulsions [J]. *Cosmetics*, 2015, 2 (2): 248-258
- [110] Kim N H, Min S R. Synergistic bactericidal action of phytic acid and sodium chloride against *Escherichia coli*, O157:H7 cells protected by a biofilm [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 227: 17
- [111] 牟丹,钱海峰,谭志刚,等.利用超滤技术及离子交换法制取高纯度植酸的研究[J].*食品工业科技*,2014,35(5):225-228  
MOU Dan, QIAN Hai-feng, TAN Zhi-gang, et al. Study on the preparation of high purity phytic acid by means of ultrafiltration and ion-exchange [J]. *Science & Technology of Food Industry*, 2014, 35(5): 225-228
- [112] Mothes R, Schwenke K D, Zirwer D, et al. Rapeseed protein-polyanion interactions. Soluble complexes between the 2 S protein fraction (napin) and phytic acid [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2010, 34(4): 375-385
- [113] Nassar M, Hiraishi N, Tamura Y, et al. Phytic acid: an alternative root canal chelating agent [J]. *Journal of Endodontics*, 2015, 41(2): 242
- [114] Croca S, Griffin M, Isenberg D, et al. Assessment of plaque thickness and area in patients with SLE As measures of atherosclerosis-associations with disease activity [J]. *Journal of Food Science*, 2014, 53(1): 107-110
- [115] 江洪,韦庆益,张超,等.植酸氨基酸酯盐的制备及其作为食用油脂抗氧化剂的应用:中国, CN 101390641 B [P] 2011.5.4  
JIANG Hong, WEI Qing-yi, ZHANG Chao, et al. Preparation method of phytic acid amino-acid ester salt and use thereof as edible oil antioxidant: China, CN 101390641 B [P]. 2011.5.4