

食品加工对蛋清致敏性的影响研究进展

李 艺, 夏 娴, 胡 颖, 麻小娟*

(遵义医科大学公共卫生学院, 遵义 563000)

摘 要: 鸡蛋是人们日常生活中不可或缺的营养品, 然而, 鸡蛋也是最常见的引起过敏反应的食物之一。婴儿和儿童是鸡蛋过敏的高发人群, 鸡蛋过敏反应主要是由血清免疫球蛋白 E (immunoglobulin E, IgE) 介导的, 引发皮肤、消化道、呼吸道相关的症状, 甚至可导致危及生命的严重过敏反应。鸡蛋过敏目前尚无特效治愈方法, 患者严格避免摄入鸡蛋成分被认为是最有效的预防手段。但严格避食会影响患者的生活质量和膳食营养。食品加工技术作为从鸡蛋致敏的源头上控制过敏反应的方法, 近年来发展迅速。本文综述了传统食品加工方法如热处理法、酶解法、糖基化法、发酵法和新兴食品加工方法如辐照、静高压处理法、超声处理法、电场技术、酶法交联对蛋清致敏性的影响, 为后续开发低致敏鸡蛋产品提供思路。

关键词: 鸡蛋; 致敏性; 食品加工方法

Research progress on the effects of food processing on egg white allergenicity

LI Yi, XIA Xian, HU Ying, MA Xiao-Juan*

(School of Public Health, Zunyi Medical University, Zunyi 563000, China)

ABSTRACT: Eggs are an indispensable nutrient source in daily life, however, eggs are also one of the most common foods that cause allergic reactions. Infants and children are a high-risk group of egg allergy. Egg allergy is mainly mediated by serum immunoglobulin E (IgE), causing symptoms related to skin, digestive tract, respiratory tract, and even life-threatening severe allergic reactions may happen. There is currently no specific cure for egg allergy. Strictly avoiding the intake of egg ingredients is considered to be the most effective prevention method. However, strict avoidance of egg will affect the patient's quality of life and dietary nutrition. Food processing technology has developed rapidly in recent years as a method to control allergic reactions from the source of allergen intakes. This paper reviewed the change of egg white allergenicity by traditional food processing methods such as heat treatment, enzymatic hydrolysis, glycation, fermentation and emerging food processing methods such as irradiation, static high pressure treatment, ultrasonic treatment, electric field technology, enzymatic hydrolysis and cross-linking impact, providing ideas for the subsequent development of hypoallergenic egg products.

KEY WORDS: egg; allergenicity; food processing methods

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660443)、遵义医科大学优秀青年人才项目(18zy-009)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31660443), and the Young Talents Program of Zunyi Medical University (18zy-009)

*通信作者: 麻小娟, 博士, 教授, 主要研究方向为食物过敏。E-mail: martha_ok@126.com

*Corresponding author: MA Xiao-Juan, Ph.D, Professor, School of Public Health, Zunyi Medical University, Xuefuxi Road 6, Zunyi 563000, China. E-mail: martha_ok@126.com

0 引言

鸡蛋是人们餐桌上的常见美食,它价格低廉,营养丰富,是日常优质蛋白质的良好来源。鸡蛋蛋白质还具有很多功能性质,如起泡性、乳化性、凝胶特性等,因此在食品工业中有广泛的应用^[1]。此外,鸡蛋成分如溶菌酶还可作为食品添加剂,扩展了它在食品工业的用途,如欧盟在 2000 年已经允许在海产品、奶酪等乳制品、豆类产品、葡萄酒等酒类及红肠等肉类中添加溶菌酶,作为一种安全广谱的杀菌防腐剂^[2]。

在鸡蛋及其成分涌入餐桌的同时,需要指出的是,鸡蛋也是最容易引起过敏反应的食物之一。鸡蛋过敏在任何年龄段均可发生,尤其是婴幼儿,其发病率约在 1%~2%,仅次于牛奶过敏,在一些国家鸡蛋过敏的发病率甚至高于牛奶过敏,位居食物过敏首位^[3-4]。对比近年相关流行病学调查结果发现,鸡蛋过敏患病率持续增长^[5]。鸡蛋过敏的应对方面,目前尚无特效治愈方法,通常建议患者严格避免摄入鸡蛋成分。然而,鸡蛋作为婴幼儿最早添加的辅食,避食会影响婴幼儿的生长发育和生活质量。此外,虽然食物过敏原标识已在很多国家推行,因意外摄入含有鸡蛋成分的食物导致入院的情况仍屡屡发生^[6-7]。有鉴于此,通过食品加工技术降低鸡蛋致敏性,被认为是应对鸡蛋过敏较有前景的方法。

鸡蛋致敏的物质基础是过敏表位的存在,分为线性表位和构象表位两种^[8-9]。在鸡蛋加工过程中,过敏原可能会发生聚集或去折叠,从而破坏构象表位、修饰/掩蔽线性表位,降低鸡蛋致敏性。然而,鸡蛋加工也可能导致隐蔽表位暴露或新表位产生,造成致敏性升高的后果^[10-11]。加工后鸡蛋致敏性的变化与加工方法、加工条件、食物基质的存在等密切相关^[12-13]。而且在鸡蛋成分中,蛋清蛋白比蛋黄蛋白更容易引起过敏反应,即卵白蛋白、卵类黏蛋白、卵转铁蛋白和溶菌酶,分别占蛋清蛋白质总量的 54%、11%、12%和 3.5%^[14]。

已报道的改变鸡蛋致敏性的食品加工技术可大致归类为物理方法、化学方法和生物方法^[15]。本研究就近年来食品加工技术热处理法、静高压处理法、辐照法、超声处理法、电场技术、酶解法和酶法交联、糖基化法、发酵法对鸡蛋尤其是蛋清致敏性的影响进行综述,以期对低敏鸡蛋产品的研发提供依据。

1 物理方法

1.1 热处理法

热处理法通过破坏氢键影响蛋白质的二级和三级结构,导致蛋白质去折叠,该过程可能暴露过敏原的隐蔽表位或解离构象表位,从而引起蛋白质致敏性变化;另一方

面,去折叠会增加蛋白质内疏水性巯基的可及性,巯基间发生相互作用可能会使过敏原多聚,导致表位的掩蔽或新表位的形成,进一步对鸡蛋过敏原致敏性造成影响^[16-17]。鸡蛋加工涉及的热处理方法很多,煮、煎、烤、蒸等都是常用的方法。如 PABLOS-TANARRO 等^[18]研究发现蛋清在 80°C 加热 10 min 后对小鼠的致敏性显著降低; TONG 等^[19]研究发现蒸鸡蛋羹能够降低鸡蛋致敏性,与鸡蛋蛋白质构象改变和消化稳定性的降低有关;临床工作中发现 55%~88% 的鸡蛋过敏患者能够耐受烘焙的鸡蛋,充分说明了烘焙对鸡蛋过敏原致敏性降低的有效作用^[20]。

热处理对鸡蛋中主要过敏原致敏性的影响方面,多项研究表明,热处理能够降低卵白蛋白的致敏性。如 BLOOM 等^[21]发现随着烘焙时间的延长,卵白蛋白与鸡蛋过敏患者血清免疫球蛋白 E (immunoglobulin E, IgE) 的结合能力逐渐变弱; OKON 等^[22]发现热处理能降低卵白蛋白的抗原性,而且在小鼠口服致敏实验中抑制了特异性 IgE 的产生; STĂNCIUC 等^[23]研究表明在 pH 9.5, 反应温度超过 80°C (加热 20 min) 时,卵白蛋白抗原性可降低超过 82%,与该过敏原的构象改变密切相关。除了构象变化, CLAUDE 等^[17,24]发现加热导致的多聚也是卵白蛋白致敏性降低的重要原因,且不同加热条件导致卵白蛋白聚集状态不同,也会对加工产物的致敏性造成影响。

虽然热处理能够有效降低卵白蛋白的致敏性,然而常规热处理方法对于卵类黏蛋白致敏性的降低效果不佳,可能与该过敏原构象由 9 对二硫键固定有关。如 WEN 等^[25]对卵类黏蛋白进行过热蒸汽处理(120~200°C),发现处理后该过敏原的构象改变,产生三聚体和四聚体,然而其 IgE 结合能力并未出现大幅度降低。STĂNCIUC 等^[26]将卵类黏蛋白在 pH 为 7 的环境中加热 20 min (80°C 和 100°C),该过敏原的抗原性并未发生显著变化。该研究还在酸性和碱性条件下对卵类黏蛋白进行了热处理(pH 分别为 4.5 和 9.5),发现当 pH 为 9.5 时,在 100°C 条件加热 20 min 能使卵类黏蛋白抗原性降低 90% 以上,提示碱性条件下热处理可能是降低卵类黏蛋白致敏性的有效方法。

热处理对鸡蛋中其他过敏原致敏性的影响方面, TONG 等^[27]发现卵转铁蛋白在 55~60°C 处理后出现了可逆的展开结构,在 70~80°C 处理后出现了二级结构的丧失。当加热到 80°C 以上时,二硫键发生裂解和重排,伴随卵转铁蛋白的 IgE 结合能力下降。SHIN 等^[28]对蛋清进行油炸、煮沸 10 min、煮沸 30 min 和 170°C 烘烤 20 min 处理,发现鸡蛋过敏患者血清 IgE 与热处理后的溶菌酶都没有有效反应,说明热加工能够降低溶菌酶的潜在致敏性。鸟-蛋综合征的患者对未煮熟的蛋黄过敏,却能够耐受煮熟的蛋黄,说明热处理能够降低蛋黄过敏原的致敏性^[29]。可见热处理是降低鸡蛋中多种过敏原致敏性的有效方法,然而,由于卵类黏蛋白的热稳定性强,通过热处理对该过敏原致敏性

的控制可能需要更为特殊的条件。

1.2 静高压处理法

静高压处理食品的技术也被称为高静水压加工技术,它是非热加工技术的一种,相比传统的热加工技术,静高压处理最大限度地减少了食品处理中的化学反应,对食品的颜色、风味和营养价值的影响小,顺应了部分加工食品对杀灭食品中微生物、延长货架期、加工出高质量安全食品的要求。静高压处理主要破坏蛋白质三级结构和四级结构,通过引起可逆或不可逆的结构修饰导致蛋白质聚集或变性,从而可能对食物过敏原的致敏性造成影响^[30]。

静高压处理对鸡蛋致敏性的影响方面,PABLOS-TANARRO 等^[18]用静高压(400 MPa, 37°C, 10 min)处理蛋清,并通过动物实验检测处理后蛋清在体内致敏性变化情况,结果表明高压处理后的蛋清致敏的小鼠与未加工蛋清致敏组相比,IgE 水平和血清免疫球蛋白 G1 (immunoglobulin G1, IgG1)水平均相似。MA 等^[31]用静高压(400 MPa, 40°C, 30 min)处理卵白蛋白,结果表明处理后卵白蛋白的 IgE 结合能力未发生显著变化,且用静高压处理后的卵白蛋白刺激蛋清致敏 Balb/c 小鼠的脾细胞和肠系膜淋巴结细胞后,与未加工卵白蛋白刺激组相比,白细胞介素(interleukin, IL)-5、IL-13 和干扰素 γ (interferon-gamma, IFN γ)等细胞因子水平没有显著性差异。ZHANG 等^[32]研究发现静高压处理 (400、500、600 MPa, 20°C, 10 min)后,卵转铁蛋白与兔血清结合的半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC₅₀)值保持不变,而卵类黏蛋白的 IC₅₀ 值降低,表明免疫反应性增强,可能是由于超高压作用破坏了卵类黏蛋白的空间结构,暴露了线性表位。可见虽然已报道静高压处理可以降低多种食物过敏原的致敏性,该技术用于降低鸡蛋致敏性的效果并不理想。

1.3 辐照法

辐照对蛋白质作用的分子机制较为复杂,主要通过促使蛋白质分子发生脱氨、脱羧、氨基酸氧化、二硫键断裂或重建、肽链的降解或交联等一系列反应,使蛋白质分子的高级结构及分子间的聚集方式发生变化,通过消除或改变食物过敏原中的构象和线性表位来影响致敏性^[33]。此外,辐照过程中还可能发生美拉德反应,通过改变蛋白质结构影响致敏性^[34]。研究发现辐照是降低牛乳过敏原、开心果过敏原、花生过敏原、虾过敏原致敏性较为有效的方法^[35-38]。

辐照对鸡蛋过敏原致敏性的影响方面,研究表明在 3~10 kGy 的辐照剂量下,电子和 X 射线、 γ 射线照射均能改变卵白蛋白的潜在致敏性^[39-40]。SEO 等^[41]以 10、100 kGy 的剂量辐照卵白蛋白溶液,结果表明处理后的卵白蛋白诱导小鼠产生特异性 IgE 的能力显著降低,且脾脏 T 细胞增殖、辅助性 T 细胞 1 (T helper 1 cell, Th1)型细胞因子(IFN- γ 和 IL-2)和辅助性 T 细胞 2 (T helper 2 cell, Th2)型细胞因子

(IL-4 和 IL-6)的分泌显著减少,提示辐照能够有效降低卵白蛋白的致敏性。辐照对鸡蛋中其他过敏原致敏性的影响方面,LEE 等^[42]将卵类黏蛋白溶液在 10 kGy 下进行 γ 辐照,发现处理后的卵类黏蛋白潜在致敏性减低约 50%。YANG 等^[43]用 γ 射线辐照卵白蛋白(剂量为 1 kGy)并致敏小鼠,结果表明小鼠的血清特异性 IgE 水平较未加工卵白蛋白致敏组降低,Th2 免疫反应降低,IL-2 水平增加,IL-6 分泌减少。综上所述,辐照可能是一种有效的降低蛋清过敏原致敏性的食品加工方法,然而该方法对于鸡蛋过敏原卵转铁蛋白和溶菌酶的致敏性影响有待研究。

1.4 超声处理法

高强度超声作为一种新型的非热加工技术被广泛应用于食品工业,它主要通过改变蛋白质的构象和引发多聚影响食物过敏原致敏性^[44-45]。XIONG 等^[46]研究表明,卵白蛋白经高强度超声处理后三级结构部分展开,疏水性增加。如研究显示在 Tween 80 存在的情况下,超声处理 30 min 后酪蛋白形成 100 nm 以下的胶体,伴随构象的变化,处理后酪蛋白的 IgE 结合能力及导致肥大细胞脱颗粒的能力显著降低^[47]。此外,超声处理在虾原肌球蛋白、猕猴桃过敏原 Act d 2 等致敏性的控制方面也有不错的效果^[48-49]。

超声处理对鸡蛋过敏原致敏性的影响方面,YANG 等^[50]发现卵白蛋白经 200、400、600、800 W 的超声处理(15 min)后,其 IgG 和 IgE 结合能力显著增加,在 600 W 时观察到最高值。当功率从 200 W 提高到 600 W 时,游离巯基含量、表面疏水性和紫外吸收值逐渐增加,即卵白蛋白分子发生了去折叠,提示该过敏原 IgG 和 IgE 结合能力的升高与隐蔽表位的暴露或新表位的产生有关。当功率升高至 800 W 时,卵白蛋白 IgG 和 IgE 结合能力较 600 W 略有下降,与该过敏原分子发生多聚有关。基于超声处理能够去折叠卵白蛋白的实验结果,该课题组后续研究将卵白蛋白样品先在 600 W 超声预处理 15 min,后经甘露糖糖基化修饰,所得卵白蛋白产物 IgG 和 IgE 结合的 IC₅₀ 值分别是 28.02、18.22 $\mu\text{g/mL}$ (处理前 IgG 和 IgE 结合的 IC₅₀ 值分别是 3.1、2.15 $\mu\text{g/mL}$),即超声预处理结合糖基化反应显著降低了卵白蛋白的潜在致敏性^[51]。

1.5 电场技术

脉冲电场是一种比较新颖的食品加工方法,它可以作用于蛋白质构象,改变其展开机制、聚集和相互作用模式,从而影响食物过敏原的致敏性^[52]。目前脉冲电场在食品工业的应用主要在杀菌、酶灭活、食物均质等方面,该技术对食物过敏原致敏性的影响开展较少,然而脉冲电场对鸡蛋过敏原致敏性的影响已有研究。如 LI 等^[53-54]研究表明 35 kV/cm 脉冲电场处理能够使卵类黏蛋白的 IgG1 和 IgE 结合能力分别降低 2.93% 和 6.57%,使卵白蛋白的 IgG1 和 IgE 结合能力分别降低 10.32% 和 3.61%。YANG 等^[55]

研究表明当卵白蛋白样品在低电场强度(低于 25 kV/cm, 持续 180 μ s)或短时间(低于 60 μ s, 在 35 kV/cm)下处理时, 由于卵白蛋白的部分去折叠, IgG 和 IgE 结合能力逐渐增加。然而, 当卵白蛋白样品在高电场强度(超过 25 kV/cm, 持续 180 μ s)或长时间(超过 60 μ s, 在 35 kV/cm)下处理时, 由于卵白蛋白的聚集, IgG 和 IgE 结合能力显著降低, 约降至处理前的 70%。可见脉冲电场作为一种新颖的食品加工方法, 在电场强度和处理时间的合理选择下对降低蛋清蛋白质致敏性有一定的前景。

2 化学方法

2.1 酶解法

利用合适的蛋白酶水解过敏原, 使其分子质量减小、结构变得简单、破坏或消除过敏表位, 或可有效地降低食物的致敏性, 这一作用过程可以分为两个方面: 一是断裂酰胺键, 减少过敏原的分子质量, 通过破坏线性表位降低致敏性; 二是改变过敏原的三级结构, 或者断裂一些化学键使之失去原有的活性, 从而影响构象表位, 降低其致敏性^[56]。如 LIANG 等^[57]研究发现牛乳经碱性蛋白酶、复合蛋白酶或风味蛋白酶水解后, IgE 结合能力分别可降低 56.31%、50.62% 和 56.45%, 且酶解后的牛乳致敏小鼠较未加工牛乳致敏组, 产生的过敏反应更弱, 肺部、肠道、脾脏炎症反应均更轻, CD4⁺T/CD8⁺T 细胞失衡的状况也有所改善。此外, 研究显示酶解处理还能够降低小麦醇溶蛋白、花生过敏原、蚕蛹过敏原等的致敏性^[58-60]。然而, 并非所有食物过敏原经酶解处理后致敏性均能显著下降。部分过敏原由于酶解过程破坏蛋白质分子构象, 导致隐蔽表位暴露或新表位产生, 综合的效果是不影响致敏性甚至导致致敏性升高。如研究显示虾原肌球蛋白经木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶和无花果蛋白酶酶解后, IgE 结合能力并未降低^[61]。

在酶解对鸡蛋致敏性的影响方面, GAZME 等^[62]利用固定化形式的中性蛋白酶和嗜热菌蛋白酶水解蛋清, 发现在最适酶解条件下, 蛋清 IgE 结合能力可降低约 90%。YANG 等^[63]研究表明用游离或固定化碱性蛋白酶水解蛋清能够使其 IgG 和 IgE 结合能力显著下降。YUAN 等^[64]研究发现蛋清在 95℃水浴中加热 10 min 使蛋清蛋白质变性后, 利用胰蛋白酶、 α -糜蛋白酶、胃蛋白酶、中性蛋白酶和碱性蛋白酶水解变性后的蛋清, 产生的低分子量肽产物(<3 kDa)的 IgE 结合能力显著低于加热的蛋清。然而, 酶解对于鸡蛋中过敏原的致敏性并不都是降低的。LOZANO-OJALVO 等^[65]用胃蛋白酶和碱性蛋白酶水解卵白蛋白、卵类黏蛋白和溶菌酶, 结果表明卵白蛋白和溶菌酶水解物激发小鼠过敏反应的能力降低, 而卵类黏蛋白水解产物的致敏性与未处理样品无显著差异。此外, 研究结果显示胃蛋白酶水解对卵白蛋白致敏性降低的效果最好, 且相应的水解产物减少了脾细胞培养物中鸡蛋过敏原诱导

的 Th2 反应(释放 IL-4 和 IL-5), 增强了 Th1 反应[肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor- α , TNF α) 和 IFN- γ 的释放], 提示胃蛋白酶水解后的卵白蛋白在鸡蛋过敏治疗方面有一定的潜力。但蛋白质酶解产物往往具有苦味, 酶解产物的应用是否受到限制有待探讨^[66]。

2.2 酶法交联

酶法交联是非热加工技术的一种, 常在酪氨酸酶、漆酶、过氧化物酶或转谷氨酰胺酶的参与下改变食物蛋白质的构象或生化特性。其中酪氨酸酶、漆酶和过氧化物酶催化氧化酪氨酸侧链启动蛋白质交联, 而转谷氨酰胺酶启动赖氨酸和谷氨酰胺残基之间的异肽键合, 从而产生交联聚合物, 伴随过敏原致敏性的改变^[67]。已有研究发现酶法交联有效降低了牛乳过敏原 α -乳白蛋白、花生过敏原 Ara h 2、虾过敏原原肌球蛋白的致敏性^[68-71], 且转谷氨酰胺酶交联后的虾原肌球蛋白不仅致敏性大大降低, 还具备了促进调节性 T 细胞增殖的能力, 即显示出了应用于口服耐受诱导的潜力^[72]。

酶法交联对鸡蛋过敏原致敏性的影响方面, TONG 等^[73]利用咖啡酸辅助多酚氧化酶交联卵白蛋白, 结果显示交联产物的 IgE 结合能力低于未加工卵白蛋白, 且在小鼠体内致敏性研究中发现交联卵白蛋白组特异性 IgE、IgG、IgG1 和血清免疫球蛋白 G2a (immunoglobulin G2a, IgG2a) 水平以及血清组胺和小鼠肥大细胞蛋白酶-1 (mouse mast cell protease-1, mMCP-1) 浓度均较未加工卵白蛋白组低, 同时交联卵白蛋白刺激脾细胞产生 IL-4、IL-5、IL-13 和 IFN- γ 的能力也降低, 提示咖啡酸辅助多酚氧化酶催化交联显著降低了卵白蛋白的致敏性。LIU 等^[74]利用双孢蘑菇多酚氧化酶在咖啡酸存在的情况下交联卵白蛋白, 结果也显示交联后产物的潜在致敏性显著降低。此外, TONG 等^[75]研究还发现 100℃加热处理 5 min 后用多酚氧化酶催化交联, 可以使卵白蛋白的 IgE 结合能力降低 80%以上, 即酶法交联尤其是辅助加热预处理可以有效降低鸡蛋卵白蛋白的致敏性。然而, 目前尚缺乏酶法交联对鸡蛋中其他过敏原致敏性的影响作为数据支撑。

2.3 糖基化法

在食品的热处理过程中, 还原糖与含有游离氨基的化合物之间发生的美拉德反应也被称为“糖基化”反应, 可见糖基化与热处理密不可分, 它能够通过引起蛋白质构象的变化影响食物过敏原致敏性, 也能够通过糖链的引入修饰过敏原线性表位, 或在此过程中导致隐蔽表位暴露/形成新的表位, 从而造成食物蛋白质致敏性改变的结果^[76]。已有研究表明糖基化法使牛乳过敏原 α -乳清蛋白和 β -乳球蛋白、虾过敏原原肌球蛋白、鱼过敏原小白蛋白的致敏性显著降低^[77-80]。

糖基化对蛋清致敏性的影响方面, MA 等^[81]研究表明

用低聚半乳糖糖化卵类黏蛋白,能使其 IgE 结合能力显著降低,人肥大细胞脱颗粒实验显示脱颗粒标志物 β -己糖胺酶的释放减少约 20%,表明糖基化反应降低了卵类黏蛋白的潜在致敏性。YANG 等^[82]将 D-葡萄糖及其差向异构体用于卵白蛋白的糖基化修饰,发现该反应将卵白蛋白的 IgG 和 IgE 结合能力分别降低约 28%和 50%。RUPA 等^[83]研究发现甘露糖糖基化的蛋清致敏的小鼠较未加工蛋清致敏组,临床症状减轻、血清组胺和肥大细胞蛋白酶水平降低,小鼠血清 IgG 和 IgE 水平也降低,表明甘露糖糖基化能有效降低蛋清的致敏性。JIMÉNEZ-SAIZ 等^[84]的研究表明,在酸性 pH 条件下卵白蛋白和卵类黏蛋白分别与果胶、阿拉伯树胶和木聚糖相互作用后,产物的 IgE 结合能力显著增加;MA 等^[85]研究表明卵白蛋白与葡萄糖发生糖基化反应后,该过敏原的 IgG 和 IgE 反应性增加。上述研究中糖基化对鸡蛋清过敏原致敏性的影响报道了相反的结果,可能是因为选择的还原糖种类不同,也可能与选择的实验条件不同有关。

另一方面,有研究报道利用超声或谷胱甘肽等预处理蛋清蛋白质后,再进行糖基化处理,可使 IgE/IgG 结合能力进一步降低,这可能与预处理过程中蛋清过敏原去折叠,增加了糖基化位点的可及性有关^[86]。如 YANG 等^[51]研究发现卵白蛋白经 0~600 W 超声波预处理后,与甘露糖发生糖基化反应能够显著降低其 IgG 和 IgE 结合能力,且当超声预处理功率为 600 W 时该过敏原糖基化后的潜在致敏性达到最低值。梁纳^[87]研究表明利用谷胱甘肽还原卵类黏蛋白,使其去折叠暴露线性表位后,对该过敏原进行糖基化修饰,在最优条件下卵类黏蛋白潜在致敏性降至不足加工前的 1%,且动物实验结果也表明去折叠辅助糖基化修饰后卵类黏蛋白的致敏性大幅度下降。可见蛋清蛋白质经过预处理后,再进行糖基化处理对降低蛋清过敏原致敏性较有潜力,目前尚未发现糖基化修饰对溶菌酶和卵转铁蛋白致敏性影响的报道,或可进行深入研究。

3 生物方法

发酵法在食品工业中有着悠久的历史,在许多食品和调味剂的制作中都有应用,而且发酵的过程可能使食物过敏原水解,导致过敏原含量和表位减少,从而降低食物过敏原的致敏性^[88]。已有报道表明发酵有效降低了大豆过敏原、花生过敏原和牛乳过敏原的致敏性^[89-91]。

发酵对鸡蛋致敏性的影响方面,LI 等^[92]发现用米曲霉发酵蛋清 24 h 后,蛋清产物的 IgE 结合能力显著降低,质谱结果显示卵类黏蛋白 N 端减少了约 1700 Da,推测该片段的缺失影响了卵类黏蛋白的构象,从而造成了蛋清致敏性的降低。另有研究表明通过乳酸菌发酵能够降低蛋清的 IgE 结合能力,且蛋清 IgE 结合能力的降低也主要与发酵对卵类黏蛋白的作用有关^[93-94]。可见发酵法应用于降低蛋

清致敏性有一定的前景。

4 结束语

在报道的鸡蛋过敏原处理方法中,发酵在降低鸡蛋致敏性方面有一定的前景;热加工、电场和糖基化处理在反应条件的精确控制下,也显示出降低鸡蛋致敏性的作用;辐照、超声、酶解和酶法交联对鸡蛋中的部分过敏原有良好的致敏性消减效果;静高压处理对于鸡蛋致敏性的控制效果不理想。然而,单一的食品加工方法对降低鸡蛋致敏性的效果是有限的,加工方法的有效组合,如超声、谷胱甘肽预处理辅助糖基化反应后,鸡蛋致敏性降低的效果显著提升。在过敏原致敏性的检测中,建议综合体外和体内致敏性检测相结合的结果,更好地阐明不同加工方法对鸡蛋致敏性的影响。

参考文献

- [1] XUE H, TU YG, XU M, *et al.* Changes in physicochemical properties, gel structure and *in vitro* digestion of marinated egg white gel during braising [J]. *Food Chem*, 2020, 330: 127321.
- [2] WU TT, JIANG QQ, WU D, *et al.* What is new in lysozyme research and its application in food industry? A review [J]. *Food Chem*, 2019, 274: 698-709.
- [3] BOTHA M, BASERA W, FACEY-THOMAS HE, *et al.* Rural and urban food allergy prevalence from the South African Food Allergy (SAFFA) study [J]. *J Allergy Clin Immunol*, 2019, 143(2): 662-668.
- [4] GOU JK, LIANG R, HUANG HJ, *et al.* Maillard reaction induced changes in allergenicity of food [J]. *Foods*, 2022, 11(4): 530.
- [5] ÖSTERLUND J, WINBERG A, WEST CE. A 10-year review found increasing incidence trends of emergency egg allergy reactions and food-induced anaphylaxis in children [J]. *Acta Paediatr*, 2019, 108(2): 314-320.
- [6] YANAGIDA N, EBISAWA M, KATSUNUMA T, *et al.* Treatment-requiring accidental ingestion and risk factors among nursery children with food allergy [J]. *Pediatr Allergy Immunol*, 2021, 32(6): 1377-1380.
- [7] 杨若婷, 戴智勇, 潘丽娜, 等. 食物过敏原检测标准及标识现状[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(11): 1-10.
- [8] YANG RT, DAI ZY, PAN LN, *et al.* Food allergen testing standards and labeling status [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(11): 1-10.
- [9] ZHOU FL, HE SD, SUN HJ, *et al.* Advances in epitope mapping technologies for food protein allergens: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 107: 226-239.
- [10] 肖娜, 刘育颖, 刘熙文, 等. 鸡蛋过敏原表位研究进展[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(3): 6.
- [11] XIAO N, LIU YY, LIU XW, *et al.* Research of egg allergen epitope [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(3): 6.
- [12] VAPOR A, MENDONÇA A, TOMAZ CT. Processes for reducing egg allergenicity: Advances and different approaches [J]. *Food Chem*, 2022, 367: 130568.
- [13] COSTA J, VILLA C, VERHOECKX K, *et al.* Are physicochemical properties shaping the allergenic potency of animal allergens? [J]. *Clin*

- Rev Allergy Immunol, 2022, 62(1): 1–36.
- [12] BENEDÉ S, LÓPEZ-EXPÓSITO I, MOLINA E, *et al.* Egg proteins as allergens and the effects of the food matrix and processing [J]. Food Funct, 2015, 6(3): 694–713.
- [13] MA XJ, LIANG R, XING QL, *et al.* Can food processing produce hypoallergenic egg? [J]. J Food Sci, 2020, 85(9): 2635–2644.
- [14] MA XJ, LIANG R, YANG XT, *et al.* Simultaneous separation of the four major allergens of hen egg white [J]. J Chromatogr B, 2020, 1152: 122231.
- [15] YAO Z, KRANTHI VS, WANG J, *et al.* Impact of food processing on the structural and allergenic properties of egg white [J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 78: 188–196.
- [16] GRAVERSEN KB, BALLEGAARD AR, KRAEMER LH, *et al.* Cow's milk allergy prevention and treatment by heat-treated whey-A study in Brown Norway rats [J]. Clin Exp Allergy, 2020, 50(6): 708–721.
- [17] CLAUDE M, LUPI R, BOUCHAUD G, *et al.* The thermal aggregation of ovalbumin as large particles decreases its allergenicity for egg allergic patients and in a murine model [J]. Food Chem, 2016, 203: 136–144.
- [18] PABLOS-TANARRO A, LOZANO-OJALVO D, MARTÍNEZ-BLANCO M, *et al.* Sensitizing and eliciting capacity of egg white proteins in BALB/c mice as affected by processing [J]. J Agric Food Chem, 2017, 65(22): 4500–4508.
- [19] TONG P, XIONG LJ, GAO JY, *et al.* Influence of heat treatment and egg matrix on the physicochemical and allergenic properties of egg custard [J]. J Food Sci, 2020, 85(3): 789–799.
- [20] YANG XT, LIANG R, XING QL, *et al.* Fighting food allergy by inducing oral tolerance: Facts and fiction [J]. Int Arch Allergy Immunol, 2021, 182(9): 852–862.
- [21] BLOOM KA, HUANG FR, BENCHARITIWONG R, *et al.* Effect of heat treatment on milk and egg proteins allergenicity [J]. Pediatr Allergy Immunol, 2014, 25(8): 740–746.
- [22] OKON K, YOSHIDA T, HATTORI M, *et al.* Preparation of hypoallergenic ovalbumin by high-temperature water treatment [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2021, 85(12): 2442–2449.
- [23] STĂNCIUC N, BANU I, TURTURICĂ M, *et al.* pH and heat induced structural changes of chicken ovalbumin in relation with antigenic properties [J]. Int J Biol Macromol, 2016, 93(PtA): 572–581.
- [24] CLAUDE M, BOUCHAUD G, LUPI R, *et al.* How proteins aggregate can reduce allergenicity: Comparison of ovalbumins heated under opposite electrostatic conditions [J]. J Agric Food Chem, 2017, 65(18): 3693–3701.
- [25] WEN PW, TU ZC, HU YM, *et al.* Effects of superheated steam treatment on the allergenicity and structure of chicken egg ovomucoid [J]. Foods, 2022, 11(2): 238.
- [26] STĂNCIUC N, CREȚU AA, BANU I, *et al.* Advances on the impact of thermal processing on structure and antigenicity of chicken ovomucoid [J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(8): 3119–3128.
- [27] TONG P, GAO JY, CHEN HB, *et al.* Effect of heat treatment on the potential allergenicity and conformational structure of egg allergen ovotransferrin [J]. Food Chem, 2012, 131(2): 603–610.
- [28] SHIN M, HAN Y, AHN K. The influence of the time and temperature of heat treatment on the allergenicity of egg white proteins [J]. Allergy Asthma Immunol Res, 2013, 5(2): 96–101.
- [29] INOMATA N, KAWANO K, AIHARA M. Bird-egg syndrome induced by α -livetin sensitization in a budgerigar keeper: Successful induction of tolerance by avoiding exposure to avians [J]. Allergol Int, 2018, 68(2): 282–284.
- [30] MENG XY, BAI YX, GAO JY, *et al.* Effects of high hydrostatic pressure on the structure and potential allergenicity of the major allergen bovine β -lactoglobulin [J]. Food Chem, 2017, 219: 290–296.
- [31] MA XJ, LOZANO-OJALVO D, CHEN HB, *et al.* Effect of high pressure-assisted crosslinking of ovalbumin and egg white by transglutaminase on their potential allergenicity [J]. Innov Food Sci Emerg, 2015, 29: 143–150.
- [32] ZHANG Y, WANG W, ZHOU RR, *et al.* Effects of heating, autoclaving and ultra-high pressure on the solubility, immunoreactivity and structure of major allergens in egg [J]. Food Agric Immunol, 2018, 29(1): 412–423.
- [33] PAN MF, YANG JY, LIU KX, *et al.* Irradiation technology: An effective and promising strategy for eliminating food allergens [J]. Food Res Int, 2021, 148: 110578.
- [34] PI XW, YANG YL, SUN YX, *et al.* Food irradiation: A promising technology to produce hypoallergenic food with high quality [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2021. DOI: 10.1080/10408398.2021.1904822
- [35] YANG F, ZOU L, WU Y, *et al.* Structure and allergenicity assessments of bovine β -lactoglobulin treated by sonication-assisted irradiation [J]. J Dairy Sci, 2020, 103(5): 4109–4120.
- [36] NAEI VY, SANKIAN M, MOGHADAM M, *et al.* The influence of gamma radiation processing on the allergenicity of main pistachio allergens [J]. Rep Biochem Mol Biol, 2019, 7(2): 150–155.
- [37] 罗春萍, 胡纯秋. ^{60}Co - γ 辐照对花生过敏原 Ara h 2 蛋白构象及致敏活性的影响[J]. 核农学报, 2019, (7): 7.
- LUO CP, HU CQ. Effects of ^{60}Co - γ irradiation on the conformation and antigenicity of peanut allergen Ara h 2 [J]. Acta Agric Nucl Sin, 2019, (7): 7.
- [38] 官爱艳, 罗华彬, 梅卡琳, 等. 电子束辐照对中华管鞭虾原肌球蛋白免疫原性及其构象的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 6.
- GUAN AIY, LUO HB, MEI KL, *et al.* Effect of electron beam irradiation on immunogenicity and conformation of tropomyosin from shrimps [J]. Food Sci, 2019, 40(3): 6.
- [39] KIM MJ, LEE JW, SUNG NY, *et al.* Comparison study on changes of antigenicities of egg ovalbumin irradiated by electron beam or X-ray [J]. Korean J Food Sci Anim Res, 2014, 34(5): 570–575.
- [40] LEE JW, SEO JH, KIM JH, *et al.* Comparison of the changes of the antigenicities of a hen's egg albumin by a gamma and an electron beam irradiation [J]. Radiat Phys Chem, 2007, 76(5): 879–885.
- [41] SEO JH, KIM JH, LEE JW, *et al.* Ovalbumin modified by gamma irradiation alters its immunological functions and allergic responses [J]. Int Immunopharmacol, 2007, 7(4): 464–472.
- [42] LEE JW, LEE K, YOON HS, *et al.* Allergenicity of hen's egg ovomucoid gamma irradiated and heated under different pH conditions [J]. J Food Prot, 2002, 65(7): 1196–1199.
- [43] YANG H, LEE J, SEO JH, *et al.* Induction of oral tolerance by gamma-irradiated ovalbumin administration [J]. Korean J Food Sci Anim Res, 2016, 36(1): 14.
- [44] NATARAJAN S, PONNUSAMY V. A review on the applications of ultrasound in food processing [J]. Mater Today Proc, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mtlsonch.2020.105293>
- [45] BHARGAVA N, MOR RS, KUMAR K, *et al.* Advances in application of

- ultrasound in food processing: A review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 70: 105293.
- [46] XIONG WF, WANG YT, ZHANG CL, *et al.* High intensity ultrasound modified ovalbumin: Structure, interface and gelation properties [J]. *Ultrason Sonochem*, 2016, 31: 302–309.
- [47] WANG C, XIE Q, WANG YB, *et al.* Effect of ultrasound treatment on allergenicity reduction of milk casein via colloid formation [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(16): 4678–4686.
- [48] DONG X, WANG J, RAGHAVAN V. Effects of high-intensity ultrasound processing on the physiochemical and allergenic properties of shrimp [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2020, 65: 102441.
- [49] WANG J, WANG J, VANGA SK, *et al.* Influence of high-intensity ultrasound on the IgE binding capacity of Act d 2 allergen, secondary structure, and *In-vitro* digestibility of kiwifruit proteins [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 71: 105409.
- [50] YANG WH, TU ZC, WANG H, *et al.* High-intensity ultrasound enhances the immunoglobulin (Ig) G and IgE binding of ovalbumin [J]. *J Sci Food Agric*, 2017, 97(9): 2714–2720.
- [51] YANG WH, TU ZC, WANG H, *et al.* Glycation of ovalbumin after high-intensity ultrasound pretreatment: Effects on conformation, immunoglobulin (Ig) G/IgE binding ability and antioxidant activity [J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 98(10): 3767–3773.
- [52] RODRIGUES RM, AVELAR Z, MACHADO L, *et al.* Electric field effects on proteins—Novel perspectives on food and potential health implications [J]. *Food Res Int*, 2020, 137: 109709.
- [53] LI YL, ZHANG SY, JIANG PF, *et al.* Exploration of structure-activity relationship between IgG1 and IgE binding ability and spatial conformation in ovomucoid with pulsed electric field treatment [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 141(23): 110891.
- [54] LI YL, ZHANG SY, DING J, *et al.* Evaluation of the structure-activity relationship between allergenicity and spatial conformation of ovalbumin treated by pulsed electric field [J]. *Food Chem*, 2022, 388: 133018.
- [55] YANG WH, TU ZC, WANG H, *et al.* Immunogenic and structural properties of ovalbumin treated by pulsed electric fields [J]. *Int J Food Prop*, 2017, 20(S3): 3164–3176.
- [56] PARK HY, YOON TJ, KIM HH, *et al.* Changes in the antigenicity and allergenicity of ovalbumin in chicken egg white by N-acetylglucosaminidase [J]. *Food Chem*, 2017, 217: 342–345.
- [57] LIANG XN, WANG ZZ, YANG H, *et al.* Evaluation of allergenicity of cow milk treated with enzymatic hydrolysis through a mouse model of allergy [J]. *J Dairy Sci*, 2022, 105(2): 1039–1050.
- [58] XUE LM, LI Y, LI TT, *et al.* Phosphorylation and enzymatic hydrolysis with alcalase and papain effectively reduce allergic reactions to gliadins in normal mice [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(22): 6313–6323.
- [59] YU J, MIKIASHVILI N, BONKU R, *et al.* Allergenicity, antioxidant activity and ACE-inhibitory activity of protease hydrolyzed peanut flour [J]. *Food Chem*, 2021, 360: 129992.
- [60] HE WY, HE K, SUN F, *et al.* Effect of heat, enzymatic hydrolysis and acid-alkali treatment on the allergenicity of silkworm pupa protein extract [J]. *Food Chem*, 2021, 343: 128461.
- [61] SILKE A. Effect of enzymatic hydrolysis on the allergenic capacity of shrimp tropomyosin [Z]. 2017.
- [62] GAZME B, REZAEI K, UDENIGWE CC. Effect of enzyme immobilization and *in vitro* digestion on the immune-reactivity and sequence of IgE epitopes in egg white proteins [J]. *Food Funct*, 2020, 11(7): 6632–6642.
- [63] YANG AS, LONG CY, XIA JH, *et al.* Enzymatic characterisation of the immobilised alcalase to hydrolyse egg white protein for potential allergenicity reduction [J]. *J Sci Food Agric*, 2017, 97(1): 199–206.
- [64] YUAN J, ZHENG Y, WU Y, *et al.* Double enzyme hydrolysis for producing antioxidant peptide from egg white: Optimization, evaluation, and potential allergenicity [J]. *J Food Biochem*, 2020, 44(2): e13113.
- [65] LOZANO-OJALVO D, MOLINA E, LÓPEZ-FANDIÑO R. Hypoallergenic hydrolysates of egg white proteins modulate allergen responses induced *ex vivo* on spleen cells from sensitized mice [J]. *Food Res Int*, 2016, 89(Pt 1): 661–669.
- [66] ZHAO D, LI H, HUANG MX, *et al.* Influence of proteolytic enzyme treatment on the changes in volatile compounds and odors of beef longissimus dorsi [J]. *Food Chem*, 2020, 333: 127549.
- [67] AHMED I, CHEN H, LI JL, *et al.* Enzymatic crosslinking and food allergenicity: A comprehensive review [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2021, 20(6): 5856–5879.
- [68] LI X, BAI H, WU YY, *et al.* Structural analysis and allergenicity assessment of an enzymatically cross-linked bovine α -lactalbumin polymer [J]. *Food Funct*, 2020, 11(1): 628–639.
- [69] REN LM, WU ZH, ZHANG Y, *et al.* Polyphenol-oxidase-catalyzed cross-linking of Ara h 2: Reaction sites and effect on structure and allergenicity [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(1): 308–314.
- [70] AHMED I, LIN H, LI ZX, *et al.* Tyrosinase/caffeic acid cross-linking alleviated shrimp (*Metapenaeus ensis*) tropomyosin-induced allergic responses by modulating the Th1/Th2 immunobalance [J]. *Food Chem*, 2021, 340: 127948.
- [71] AHMED I, LV LT, LIN H, *et al.* Effect of tyrosinase-aided crosslinking on the IgE binding potential and conformational structure of shrimp (*Metapenaeus ensis*) tropomyosin [J]. *Food Chem*, 2018, 248: 287–295.
- [72] WANG YB, NI SQ, WANG C, *et al.* Cross-linking of shrimp tropomyosin catalyzed by transglutaminase and tyrosinase produces hypoallergens for potential immunotherapy [J]. *Food Funct*, 2019, 10(3): 1609–1618.
- [73] TONG P, CHEN SG, GAO JY, *et al.* Caffeic acid-assisted cross-linking catalyzed by polyphenol oxidase decreases the allergenicity of ovalbumin in a Balb/c mouse model [J]. *Food Chem Toxicol*, 2018, 111: 275–283.
- [74] LIU K, CHEN SG, CHEN HB, *et al.* Cross-linked ovalbumin catalyzed by polyphenol oxidase: Preparation, structure and potential allergenicity [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 107(PtB): 2057–2064.
- [75] TONG P, XU XQ, LIU K, *et al.* Denatured pre-treatment assisted polyphenol oxidase-catalyzed cross-linking: effects on the cross-linking potential, structure, allergenicity and functional properties of OVA [J]. *Food Funct*, 2021, 12(20): 10083–10096.
- [76] TEODOROWICZ M, NEERVEN J, SAVELKOUL H. Food processing: The influence of the Maillard reaction on immunogenicity and allergenicity of food proteins [J]. *Nutrients*, 2017, 9(8): 835.
- [77] LIU J, CHEN WM, SHAO YH, *et al.* The mechanism of the reduction in allergenic reactivity of bovine α -lactalbumin induced by glycation, phosphorylation and acetylation [J]. *Food Chem*, 2020, 310: 125853.
- [78] WANG XM, YE YH, TU ZC, *et al.* Investigation of the mechanism underlying the influence of mild glycation on the digestibility and

- IgG/IgE-binding abilities of β -lactoglobulin and its digests through LC orbitrap MS/MS [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 139: 110506.
- [79] ZHANG Z Y, XIAO H, ZHOU P. Glycation by saccharides of different molecular sizes affected the allergenicity of shrimp tropomyosin via epitope loss and the generation of advanced glycation end products [J]. *Food Funct*, 2019, 10(11): 7042–7051.
- [80] ZHAO YJ, CAI QF, JIN T, *et al*. Effect of Maillard reaction on the structural and immunological properties of recombinant silver carp parvalbumin [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2017, 75: 25–33.
- [81] MA JJ, ZHOU JR, CHEN LR, *et al*. Effects of deglycosylation and the Maillard reaction on conformation and allergenicity of the egg ovomucoid [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(7): 3014–3022.
- [82] YANG YP, LIU GX, TU ZC, *et al*. Insight into the mechanism of reduced IgG/IgE binding capacity in ovalbumin as induced by glycation with monose epimers through liquid chromatography and high-resolution mass spectrometry [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(22): 6065–6075.
- [83] RUPA P, NAKAMURA S, KATAYAMA S, *et al*. Attenuation of allergic immune response phenotype by mannosylated egg white in orally induced allergy in BALB/c mice [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(39): 9479–9487.
- [84] JIMÉNEZ-SAIZ R, LÓPEZ-EXPÓSITO I, MOLINA E, *et al*. IgE-binding and *in vitro* gastrointestinal digestibility of egg allergens in the presence of polysaccharides [J]. *Food Hydrocolloid*, 2013, 30(2): 597–605.
- [85] MA XJ, GAO JY, CHEN HB. Combined effect of glycation and sodium carbonate-bicarbonate buffer concentration on IgG binding, IgE binding and conformation of ovalbumin [J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 93(13): 3209–3215.
- [86] LI JL, LIU J, YE YH, *et al*. Reduced IgE/IgG binding capacities of bovine α -lactalbumin by glycation after dynamic high-pressure microfluidization pretreatment evaluated by high resolution mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2019, 299: 125166.
- [87] 梁纳. 表位加工控制鸡蛋卵类粘蛋白致敏性的研究[D]. 遵义: 遵义医科大学, 2020.
LIANG R. Controlling allergenicity of ovomucoid based on epitope processing [D]. Zunyi: Medical University, 2020.
- [88] PI XW, YANG YL, SUN YX, *et al*. Recent advances in alleviating food allergenicity through fermentation [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2021, 2021: 1–14.
- [89] XIA JH, ZU QQ, YANG AS, *et al*. Allergenicity reduction and rheology property of *Lactobacillus*-fermented soymilk [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(15): 6841–6849.
- [90] PI XW, FU GM, DONG B, *et al*. Effects of fermentation with *Bacillus natto* on the allergenicity of peanut [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.110862
- [91] ZHAO LN, XIE QG, SHI FY, *et al*. Proteolytic activities of combined fermentation with *Lactobacillus helveticus* KLDS 1.8701 and *Lactobacillus plantarum* KLDS 1.0386 reduce antigenic response to cow milk proteins [J]. *J Dairy Sci*, 2021, 104(11): 11499–11508.
- [92] LI S, OFFENGENDEN M, MICHAEL G, *et al*. *Aspergillus oryzae* reduces IgE binding ability of allergenic egg white proteins [J]. *Front Agric Sci Eng*, 2018, 5(3): 87–95.
- [93] LI S. Reduce the IgE binding ability of egg white proteins by fermentation [D]. Edmonton: University of Alberta, 2010.
- [94] LI S, OFFENGENDEN M, FENTABIL M, *et al*. Effect of egg white fermentation with lactobacilli on IgE binding ability of egg white proteins [J]. *Food Res Int*, 2013, 52(1): 359–366.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



李 艺, 硕士研究生, 主要研究方向为食物过敏。

E-mail: liyi20220216@126.com



麻小娟, 博士, 教授, 主要研究方向为食物过敏。

E-mail: martha_ok@126.com