热加工与非热加工技术对水产品致敏性的影响研究进展

成军虎[1,2*]，马筱冉[1]，陈璐[1]，于华宁[3]，李季林[1,2]

（1.华南理工大学食品科学与工程学院，广东广州 510640）（2.华南理工大学现代食品工程研究中心，广东广州 510640）（3.广东美的厨房电器制造有限公司，广东佛山 528311）

摘要：我国作为水产养殖和消费总量第一大国，水产品引发的过敏问题越来越受到关注，近些年来，因食用水产品而导致的过敏事件日益增多。该研究综述了近年来热加工技术（蒸、煮、高温压力）、非热加工技术（超高压、低温等离子体、超声波和辐照）以及两种加工技术联用对水产品过敏原消减的研究，指出热加工技术主要通过使蛋白质变性来消减过敏原的致敏性，非热加工技术则通过掩盖或破坏过敏原抗原表位来消减过敏原致敏性，为低致敏性水产品开发提供了重要基础和技术参考。不断探究过敏原诱导过敏反应发生的机理，加快推进低致敏性水产品加工技术在实际生产中的应用，有利于控制和降低水产品过敏所带来的风险。

关键词：水产品；致敏性；热加工技术；非热加工技术

文章篇号：1673-9078(2022)08-327-333 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.8.1059

Research Progress on the Effects of Thermal and Non-thermal Processing Technologies on the Allergenicity of Aquatic Products

CHENG Junhu[1,2*], MA Xiaoran[1], CHEN Lu[1], YU Huaning[3], LI Jilin[1,2]

(1.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(2.Research Center of Modern Food Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(3.Guangdong Midea Kitchen Appliances Manufacturing Co. Ltd., Foshan 528311, China)

Abstract: China is the largest country in aquaculture and total consumption of aquatic products, and the allergic problem caused by aquatic products has attracted more and more attention. In recent years, incidence of allergy caused by the intake of aquatic product has increased gradually. This paper reviews recent research on the allergen reduction of aquatic products by thermal processing technologies (steaming, boiling and high temperature pressure), non-thermal processing technologies (ultra-high pressure, cold plasma, ultrasound and irradiation), and the combination of the two processing technologies. It is pointed out that thermal processing technologies mainly reduce allergenicity *via* denaturing the proteins, whilst non-thermal processing technologies reduce allergenicity via masking or destroying the antigenic epitopes of allergens. These results provide an important basis and technical reference for further development of hypoallergenic aquatic products. Continuing investigations on the mechanisms underlying the allergic reactions caused by allergens, and accelerating the development of the application of hypoallergenic aquatic processing technologies in practical production, are both conducive to controlling and reducing the risks associated with aquatic product allergy.

Key words: aquatic products; allergenicity; thermal processing technology; non-thermal processing technology

引文格式：

成军虎,马筱冉,陈璐,等.热加工与非热加工技术对水产品致敏性的影响研究进展[J].现代食品科技,2022,38(8):327-333

CHENG Junhu, MA Xiaoran, CHEN Lu, et al. Research progress on the effects of thermal and non-thermal processing technologies on the allergenicity of aquatic products [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(8): 327-333

收稿日期：2021-09-22

基金项目：国家自然科学基金面上项目（31972205）；厨房电器健康烹饪技术创新联盟（2021029）

作者简介：成军虎（1983-），男，博士，副教授，研究方向：食品非热加工与食品安全检测技术，E-mail：fechengjh@scut.edu.cn

食物过敏指的是人们对某些食物产生的一种不良反应，多表现于皮肤或者胃肠道中，在医学上是一种变态反应，目前可分为免疫球蛋白 E（Immunoglobulin E，IgE）介导与非 IgE 介导两大类[1]。调查显示，水产品、鸡蛋与牛乳是过敏原的主要来源，有 6%的年

轻人经历过食物过敏[2]，特别是免疫系统未发育完全的婴幼儿。水产品因其味道鲜美且含有丰富的营养物质而深受人们喜爱，而其引发的过敏问题日渐突出[3,4]，过敏发病率持续上升，鱼、虾等水产品是常见的过敏原[5]。水产品中的过敏原可以分为鱼类过敏原、甲壳类动物过敏原以及软体动物过敏原。鱼类过敏原包括小清蛋白（Parvalbumin，PV）、鱼卵蛋白（Carp vitellogenin）、胶原蛋白（Collagen），而甲壳类动物和软体动物的过敏原主要是原肌球蛋白（Tropomyosin，TM）[6]、卵清蛋白（Ovalbumin）和精氨酸激酶（Arginine kinase，AK）[7]等。水产品过敏会造成机体不适，部分表现为身体某些部位（脸部和腿部等）起疙瘩并伴有瘙痒症状，严重者还会休克甚至威胁生命，水产品致敏性问题亟待解决[8]。目前除了避免水产品过敏原摄入以外，较为有效地避免水产品过敏的方法为用热加工与非热加工技术处理水产品，热加工与非热加工技术通过修饰或改变过敏原蛋白质的分子结构进而在一定程度上消减过敏原的致敏性，以期为低致敏性食品的开发提供重要理论基础与技术支撑。

1 水产品过敏原消减技术

1.1 热加工技术

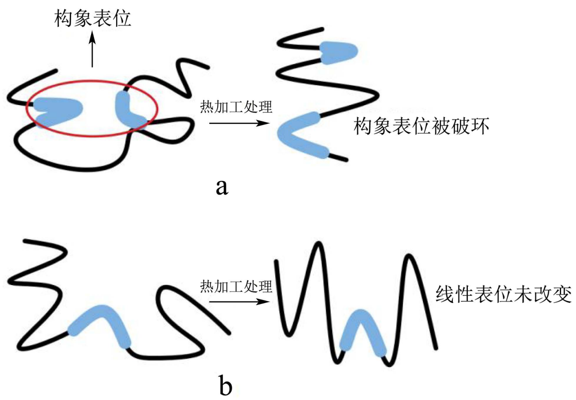

图 1 热加工诱导抗原表位变化示意图[11]

Fig.1 schematic diagram of antigen epitope changes induced by thermal processing

注：（a）热加工诱导的过敏原蛋白质构象表位变化；（b）热加工诱导线性表位的变化。

热加工技术是一类以热能为基础的加工技术，按照加工时是否需要用到水，可粗略地分为湿加热和干加热，前者主要包括煮沸、煎炸、高压灭菌等，后者包括烘烤与微波加热等。这类技术通过将热能逐渐传递或转化给食品而使其组分在热能作用下发生结构变化，从而引起功能性变化[9]。热加工技术对过敏原影响的作用机制如图 1 所示，主要是引起过敏原构象表位变化，对线性表位的作用不明显[10,11]。

水产品中的 TM 蛋白是一种热稳定性蛋白，经过热加工（主要是蒸、煮）之后，其二、三级结构会发生变化，从而改变致敏性[12]。刘思寒等[13]利用酶联免疫吸附法（ELISA）对凡纳滨对虾主要过敏原 TM 热加工前后消化产物的 IgE 结合活性进行分析，发现煮制组虾 TM 结构的 IgE 结合活性降低了 54.0%±6.1%，而高温压力组虾 TM 的 IgE 结合活性降低了 64.6% ±3.3%，结果表明，蒸、煮处理可显著降低 TM 蛋白的 IgE 结合能力，在辅助加压的条件下致敏性可进一步降低。郑礼娜等[14]进一步对刀额新对虾的虾肉分别进行了煮（100 ℃）、蒸（100 ℃）和高温压力（121 ℃、0.1 MPa）处理，利用 SDS-PAGE 电泳、免疫印迹分析和 ELISA 对过敏原免疫活性进行定性以及定量检测，发现经过热加工后过敏原免疫活性均有一定程度的降低，但是不同热加工条件的影响程度不同，煮、蒸 5 min 后分子量为 36 ku 的主要过敏原蛋白致敏性分别降低了 53%和 23%，随着热加工时间的增加，过敏原致敏性呈递减趋势，但变化幅度不显著；而高温压力处理 5 min 后，分子量为 36 ku 的主要过敏原蛋白致敏性降低了 78%，30 min 后，致敏性降低了 97%左右，几乎完全消失。由此可见，热加工中高温压力的施加可使虾过敏原致敏性显著下降。

然而，仍有较多研究表明，热加工对水产品过敏原致敏性几乎无作用[15,16]。Yu 等[17]研究发现，普通蒸煮对拟穴青蟹蟹肉过敏蛋白的致敏性无显著影响，类似地，Usui 等[18]用圆二色谱证明了 TM 的 α-螺旋结构在 80 ℃热加工之后发生了折叠现象，而恢复到 25 ℃后 TM 的结构也再次恢复，过敏原致敏性因而没有受到影响。同样，Misnan 等[19]发现蒸、煮处理对当地海螺的蛋白过敏原致敏性影响较小。

此外，还有一些研究表明，热加工可能会使水产品过敏原致敏性增加。Larly 等[20]发现从花尾虾中提取出的过敏原经 5 到 25 min 的煮沸处理之后，IgE 结合活性从 0.251 nm 升至了 0.268 nm，这说明热加工可能会暴露更多的 IgE 结合位点。张轶群等[21]通过对南美白对虾的过敏蛋白与果糖进行混合热加工 12 h，测得虾蛋白过敏原致敏性增加了 44%，可能是加工过程中的美拉德反应使过敏蛋白的三级结构改变，从而导致过敏原抗原表位的暴露，增加了过敏蛋白的致敏性[22]。

热加工操作简易方便，技术发展较为成熟。根据热加工作用条件的不同，降低水产品致敏性的效果可能会有有很大差距。尽管可能产生一些副产物，其仍广泛应用于低致敏性水产品的研发中。在使用热加工技术处理水产品时，应注意热加工的时间、温度以及

辅助加工方式对过敏原致敏性产生的不同程度的影响。

1.2 非热加工技术

非热加工技术是新型的食品加工技术，主要包括超高压、低温等离子体、超声波和辐照等技术。这些技术通过暴露或掩盖食物中过敏原的抗原表位，改变过敏原 α-螺旋和 β-折叠等二级结构，破坏维持三、四级结构的非共价键如氢键、疏水相互作用等方式来改变致敏蛋白的空间结构，从而消减其致敏性[23]。非热加工技术对食品的固有营养成分影响较小，同时又能很好地维持食品的质构、色泽、新鲜度等，逐渐成为食品加工行业新的推动力[24-26]。

1.2.1 超高压技术

超高压又称超高静压处理技术，是一种新型食品脱敏加工技术，通过破坏蛋白质的非共价键（离子键、氢键和疏水键）和改变蛋白质的高级结构来改变过敏原的致敏性[27,28]。超高压加工技术对致敏性的作用机制如图 2 所示，一方面，由于超高压处理后过敏原被溶解、抗原表位被掩盖或破坏，导致蛋白致敏性降低；另一方面，超高压处理可以产生新的抗原表位，从而增强过敏原致敏性[11]。

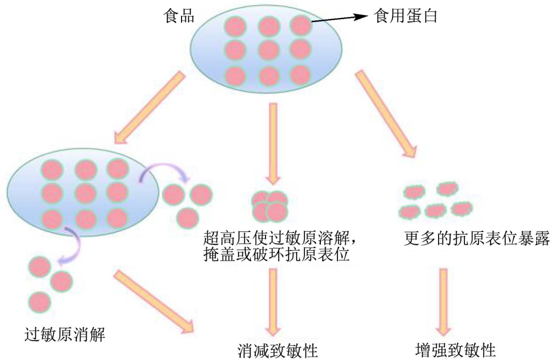

图 2 超高压诱导的致敏性变化示意图[11]

Fig.2 Schematic diagram of ultra-high pressure induced sensitization changes

韩建勋等[29]研究发现，在 100 ℃下，虾 TM 蛋白的致敏性随压力的增加而降低，这可能是由于 TM 结构随压力的增加而不断变化所致。董晓颖等[30]研究发现，虾过敏蛋白经不同压力处理后，分子量大小虽然没有产生变化，但在 100~400 MPa 区间，随着压力的增大，虾过敏蛋白的致敏性降低，在 400 MPa 时降至最低，但在 500 MPa 时致敏性又开始增加，这可能是由于在 100~400 MPa 区间，压力的增加导致蛋白质结构发生变化，破坏或掩盖了过敏原表位，从而使其致敏性降低；而在 500 MPa 时，之前被掩盖的抗原表位会重新暴露，致敏性又会增加。而用 200、400 和 600 MPa 的高静压处理鱿鱼中的过敏原 TM 发现，蛋白质折叠和二级结构改变使得致敏性降低，当压力为 400 和 600 MPa 时的致敏消减效果最好[31]。

除此之外，超高压会导致过敏原蛋白溶出[32]。牡蛎经过超高压处理后，蛋白和灰分会随汁液向外流出，且牡蛎流失液中游离氨基酸含量随着压力的增大而增大，表明超高压处理可以使某些蛋白水解酶活性增强；同时差式扫描量热（DSC）图谱结果显示，未经处理的牡蛎蛋白有两个吸收峰，且 200 和 400 MPa 处理后的吸收峰没有变化，而 600 MPa 处理后的吸收峰趋于平缓，说明超高压处理使牡蛎的蛋白结构发生变化，过敏原表位遭到破坏，致敏性从而被消减[33,34]。

1.2.2 低温等离子体技术

低温等离子体（Cold plasma，CP）技术是一种新型食品加工技术。等离子体作为物质的第四态，是由离子、紫外光、电子、自由基和激发原子等活性物质组成的电离气体，这些活性物质可以与蛋白质相互作用并改变其构象[35]。研究表明，长时间的 CP 处理导致过敏原蛋白质二级结构中 α-螺旋和 β-折叠含量的改变[36,37]，同时 CP 可以通过改变过敏原的抗原表位来影响其致敏性，具有降低水产品过敏原致敏性的潜力。Flora-Glad 等[38]用 CP 处理凡纳滨对虾的 TM 发现，处理 15 min 以后，TM 结构中的 α-螺旋数量减少，β-折叠增加，表面疏水性和二硫键含量发生显著变化，这些二、三级结构的变化会共同影响 TM 的致敏性，经 ELISA 检测证实其 IgE 结合能力最大下降了 17.6%。低温等离子体技术对环境友好，操作简易，消减致敏性的效果明显，但是用于低致敏水产品的开发还需要从加工设备、工艺条件以及安全性等方面进一步研究。

1.2.3 超声波技术

超声波（Ultrasonic wave）是一种频率高于 20000 Hz 的声波，其方向性好，反射能力强，易于获得较集中的声能。超声能够产生空穴效应、微流束效应以及自由基，并且在超声过程中，超声波在媒质中形成的介质粒子机械振动可产生与媒质间的机械作用、空化作用及热作用，从而使蛋白质结构发生改变[39,40]。由于超声波技术一般在室温下进行，对环境较友好，作用效率高，可最大程度地避免水产品品质的下降，因此，其在消减过敏原致敏性方面的研究得到了广泛关注[41,42]。马涛等[43]研究了超声波处理对三文鱼过敏蛋白致敏性的影响，发现三文鱼致敏蛋白 Sal s 1 经超声波处理 60 min 后，过敏原致敏性下降了 20.58%。Dong 等[44]在室温下对虾样品进行超声波处理发现，20 min 时，TM 致敏性的降低效果最好，消减了约 76%，而处理时间进一步增加时，观察到多肽的产生和样品碎

片量的增加，虾的原有口感可能发生了变化，因此，在消减水产品致敏性的同时还应考虑水产品本身的性质及品质，保证其风味、口感、营养成分的最大保留。

1.2.4 辐照技术

辐照技术是利用 γ 射线、电子束射线和 X 射线对过敏原进行的电离辐射，使过敏原蛋白发生交联和分子构象的变化，从而消减过敏原致敏性的技术[45-47]。Liu 等[48]对冷冻虾的 TM 进行 3 kGy 的电子束辐照后发现，TM 的 IgE 结合活性增加了约 10%，随后把剂量提高至 10 kGy 后，IgE 结合活性下降了 20%，说明随着处理条件的改变，TM 致敏性发生了不同的变化。而 Guan 等[49]对鲜虾的 TM 进行剂量为 1、3、5、7 和 9 kGy 的电子束辐照后发现，TM 的 IgE 结合能力均显著降低，剂量为 7 kGy 时的效果最显著，结合能力降低了 59%，同时 TM 的分子量没有显著变化，这可能是由于辐照导致了 TM 的结构变化，如 α-螺旋和 β-折叠的减少和 β-转角的增加，从而改变了致敏性。Li 等[50]发现，3~10 kGy 的剂量使得 TM 的结合活性持续增加，而 10 kGy 以上的剂量则会使致敏性持续降低。而对于蟹类，刘光明等[51]也发现 10 kGy 以上的剂量处理会使中华绒螯蟹和梭子蟹的 TM 致敏性大幅降低。同时发现，10 kGy 以上的剂量处理对整蟹纤维肌源蛋白（含 TM）的致敏性无显著影响，可能是蟹肉组织中的其他物质可以保护 TM 结构不受破坏。由于较大剂量的辐照对食品理化性质的具体作用尚不明确，为了保留水产品原有的营养和风味物质，我国农业相关标准中有规定，应该用 4~7 kGy 剂量的辐照对冷冻水产品进行处理，因此，辐照射线应该在相关标准的剂量规定下使用，而具体的处理条件控制依据、对致敏原蛋白的影响机理还需要进一步探究。

1.3 热加工与非热加工技术协同

由于单一的热加工技术（蒸、煮）对水产品致敏性的消减效果具有一定的局限性，比如单一蒸、煮处理对海螺蛋白过敏原的致敏性影响较小[19]，对拟穴青蟹蟹肉过敏蛋白致敏性消减无显著影响[17]等。因此，研究人员开始探索复合加工技术，以提高过敏原的消减率。Ganesan 等[52]采用蒸煮、超声波-蒸煮、反压-蒸煮和高温高压-蒸煮方式处理蟹肉发现，蒸煮处理没有显著消减蟹肉 TM 粗蛋白消化产物的致敏性，而结合超声波、高温高压和反压处理后，蟹肉 TM 的致敏性显著消减，其中高温高压-蒸煮与反压-蒸煮的消减效果更好。四种加工方式中高温高压-蒸煮与反压-蒸煮消减过敏原致敏性作用效果最好，超声波-蒸煮次之，蒸煮效果一般。这些研究也进一步说明不同加工技术联用可以弥补单一热加工在消减过敏原致敏性方面的不足。

2 总结展望

基于水产品的过敏特性，本文综述了热加工与非热加工技术对水产品过敏原致敏性的影响，指出了热加工（蒸、煮）主要通过使蛋白质变性来消减过敏原的致敏性；非热加工技术主要通过掩盖或破坏过敏原抗原表位来达到消减致敏性的目的，其良好的技术特性使得其消减过敏原致敏性时能保持食品的风味以及固有特性，在水产品的脱敏加工中具有一定的潜力。然而，目前针对部分新型非热加工技术的研究和实践不够充分。对于某些水产品而言，单一使用某种加工技术的效果不够理想，因此，研发低致敏性水产品应该把重点放在寻找并验证降低致敏性效果好、对原料营养成分以及风味损伤最小的加工条件，而如何将不同技术有效联合以实现最好的过敏原消减效果、建立更多样的过敏原致敏性消减技术是今后的研究方向。

参考文献

[1] 陈红兵,高金燕.食物过敏反应及其机制[J].营养学报,2007, 2:105-109
CHEN Hongbing, GAO Jinyan. Food allergy reaction and its mechanism [J] Acta Nutrimenta Sinica, 2007, 2: 105-109

[2] 吕相征,刘秀梅,杨晓光.健康人群食物过敏状况的初步调查[J].中国食品卫生杂志,2005,2:119-121
LYU Xiangzheng, LIU Xiumei, YANG Xiaoguang. Preliminary survey on status of food allergy in young Chinese students [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2005, 17(2): 119-121

[3] Mishyna M, Glumac M. So different, yet so alike pancrustacea: Health benefits of insects and shrimps [J]. Journal of Functional Foods, 2021, 76: 104316

[4] 刘芳丽,宁一冰,马德福,等.中国八城市 0~36 月龄婴幼儿自报过敏、食物过敏与不耐受状况调查与影响因素分析[J].中华儿科杂志,2013,51(11):801-806
LIU Fangli, NING Yibing, MA Defu, et al. Prevalence of self-reported allergy, food hypersensitivity and food intolerance and their influencing factors in 0-36 months old infants in 8 cities in China [J]. Chinese Journal of Pediatrics, 2013, 51(11): 801-806

[5] Mejrhit N, Azdad O, Chda A, et al. Evaluation of the sensitivity of Moroccans to shrimp tropomyosin and effect of heating and enzymatic treatments [J]. Food and Agricultural Immunology, 2017, 28(6): 969-980

[6] Akdis M, Verhagen J, Taylor A, et al. Immune responses in healthy and allergic individuals are characterized by a fine balance between allergen-specific T regulatory 1 and T helper 2 cells [J]. Journal of Experimental Medicine, 2004, 199(11): 1567-1575

[7] Faber M A, Pascal M, El Kharbouchi O, et al. Shellfish allergens: tropomyosin and beyond [J]. Allergy, 2017, 72(6): 842-848

[8] Ruethers T, Taki A C, Johnston E B, et al. Seafood allergy: A comprehensive review of fish and shellfish allergens [J]. Molecular Immunology, 2018, 100(SI): 28-57

[9] Rolland J M, Varese N P, Abramovitch J B, et al. Effect of heat processing on ige reactivity and cross-reactivity of tropomyosin and other allergens of asia-pacific mollusc species: identification of novel sydney rock oyster tropomyosin sac g 1 [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2018, 62(14): e1800148

[10] Shriver S K, Yang W W. Thermal and nonthermal methods for food allergen control [J]. Food Engineering Reviews, 2011, 3(1): 26-43

[11] FU Linglin, Cherayil B J, SHI Haining, et al. Food Processing to Eliminate Food Allergens and Development of Hypoallergenic Foods [M]. Singapore: Springer Singapore, 2019: 123-146

[12] Khan M U, Ahmed I, Lin H, et al. Potential efficacy of processing technologies for mitigating crustacean allergenicity [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(17): 2807-2830

[13] 刘思寒.热加工对凡纳滨对虾过敏原免疫结合活性的影响研究[D].厦门:集美大学,2020
LIU Sihan. Research on the effect of thermal processing on immune binding activity on allergens from *Litopenaeus vannamei* [D]. Xiamen: Jimei University, 2020

[14] 郑礼娜,林洪,刘一璇,等.不同热加工方式对刀额新对虾过敏原活性的影响[J].水产学报,2011,35(3):466-471
ZHENG Lina, LIN Hong, LIU Yixuan, et al. Study on effects of different thermal processings on immunocompetence of shrimp (*Metapenaeus ensis*) allergen [J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(3): 466-471

[15] Lasekan A O, Nayak B. Effects of buffer additives and thermal processing methods on the solubility of shrimp (*Penaeus monodon*) proteins and the immunoreactivity of its major allergen [J]. Food Chemistry, 2016, 200: 146-153

[16] LIU Guangming, CHENG Hsiaopo, Nesbit J B, et al. Effects of boiling on the ige-binding properties of tropomyosin of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): T1-T5

[17] YU Huilin, CAO Minjie, CAI Qiufeng, et al. Effects of different processing methods on digestibility of *Scylla paramamosain* allergen (tropomyosin) [J]. Food and Chemical Toxicology, 2011, 49(4): 791-798

[18] Usui M, Harada A, Ishimaru T, et al. Contribution of structural reversibility to the heat stability of the tropomyosin shrimp allergen [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2013, 77(5): 948-953

[19] Misnan R, Salahudin Abd Aziz N, Mohamad Yadzir Z H, et al. Impacts of thermal treatments on major and minor allergens of sea snail, *Cerithidea obtusa* (Obtuse Horn Shell) [J]. Iranian Journal of Allergy, Asthma, and Immunology, 2016, 15(4): 309-316

[20] Laly S J, Sankar T V, Panda S K. Effect of extended period of boiling on allergic protein of flower tail shrimp *Metapenaeus dobsoni* [J]. Indian Journal of Fisheries, 2019, 66(3): 112-117

[21] 张轶群,李振兴,林洪,等.果糖和木糖在美拉德反应中对虾类过敏原活性影响的研究[J].食品科学,2009,30(9):11-14
ZHANG Yiqun, LI Zhengxing, LIN Hong, et al. Study on effects of fructose and xylose on immunocompetence of shrimp allergen in Maillard reaction [J]. Food Science, 2009, 30(9): 11-14

[22] Abramovitch J B, Lopata A L, O'Hehir R E, et al. Effect of thermal processing on T cell reactivity of shellfish allergens - Discordance with IgE reactivity [J]. Plos One, 2017, 12(3): e173549

[23] 郭颖希,王满生,成军虎,等.非热加工技术消减食物过敏原研究进展[J].食品与机械,2019,35(5):219-223
GUO Yingxi, WANG Mansheng, CHENG Junhu, et al. A review on elimination of food allergens by non-thermal processing technologies [J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 219-223

[24] 黄忠民,孟利军,艾志录,等.加工对食物过敏蛋白致敏性影响的研究进展[J].食品研究与开发,2020,41(11):208-212
HUANG Zhongmin, MENG Lijun, AI Zhilu, et al. Research progress on the effects of processing on the allergenicity of food allergic proteins [J]. Food Research and Development, 2020, 41(11): 208-212

[25] 刘迪,丛艳君.非热加工技术在低或无致敏婴幼儿配方粉中应用的研究进展[J].食品工业科技,2021,42(19):395-402
LIU Di, CONG Yanjun. Application of non-thermal processing technology in hypo-allergenic or non-allergenic infant formula [J]. Science and Technology of Food Industry,

2021, 42(19): 395-402

[26] Ambrosi V, Polenta G, Gonzalez C, et al. High hydrostatic pressure assisted enzymatic hydrolysis of whey proteins [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 38: 294-301

[27] Rivalain N, Roquain J, Demazeau G. Development of high hydrostatic pressure in biosciences: Pressure effect on biological structures and potential applications in biotechnologies [J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(6): 659-672

[28] ZHANG Yifeng, REN Yuanyuan, BI Yuge, et al. Review: Seafood allergy and potential application of high hydrostatic pressure to reduce seafood allergenicity [J]. International Journal of Food Engineering, 2019, 15(8)

[29] 韩建勋,陈颖,葛毅强.虾类主要过敏原及其消减技术研究进展[J].中国食品学报,2016,16(7):201-208
HAN Jianxun, CHEN Ying, GE Yiqiang, et al. Research progress of shrimp major allergens and allergenic elimination technology [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(7): 201-208

[30] 董晓颖,高美须,潘家荣,等.不同处理方法对虾过敏蛋白分子量及抗原性的影响[J].核农学报,2010,24(3):548-554
DONG Xiaoying, GAO Meixu, PAN Jiarong, et al. Effects of different treatments on molecular weight and antigenicity of shrimp allergenic protein [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(3): 548-554

[31] 张意锋,邓云,赵艳云,等.双循环高静压对鱿鱼原肌球蛋白二、三级结构的影响[J].中国食品学报,2018,18(5):45-50
ZHANG Yifeng, DENG Yun, ZHAO Yanyun, et al. Effect of two-cycle high hydrostatic pressure on the secondary and tertiary structures of squid tropomyosin TOD p1[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(5)

[32] 姜雪,于鹏,任璐,等.超高压对蛋白质结构和致敏性的影响[J].食品工业,2017,38(8):247-250
JIANG Xue, YU Peng, REN Lu, et al. Effect of the high pressure processing on protein structure and sensitization [J]. The Food Industry, 2017, 38(8): 247-250

[33] 赵伟,杨瑞金,张文斌,等.超高压处理对牡蛎超微结构、组分及蛋白质变性的影响[J].食品与发酵工业,2011,37(5):7-11
ZHAO Wei, YANG Ruijin, ZHANG Wenbin, et al. Effects of high pressure processing on microstructure, ingredients and protein denature of fresh oyster [J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(5): 7-11

[34] JIN Yafang, DENG Yun, QIAN Bingjun, et al. Allergenic response to squid (*Todarodes pacificus*) tropomyosin Tod p1 structure modifications induced by high hydrostatic pressure [J]. Food and Chemical Toxicology, 2015, 76: 86-93

[35] DONG Xin, WANG Jin, Raghavan V. Critical reviews and recent advances of novel non-thermal processing techniques on the modification of food allergens [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(2): 196-210

[36] Ng Singwei, Lu Peng, Rulikowska A, et al. The effect of atmospheric cold plasma treatment on the antigenic properties of bovine milk casein and whey proteins [J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128283

[37] Flora-Glad C E, SUN Dawen, CHENG Junhu. Altering the IgE binding capacity of king prawn (*Litopenaeus Vannamei*) tropomyosin through conformational changes induced by cold argon-plasma jet [J]. Food Chemistry, 2019, 300: 125143

[38] Flora-Glad Chizoba Ekezie.冷等离子体处理对凡纳滨对虾蛋白功能特性和致敏性的影响[D].广州:华南理工大学,2019
Flora-Glad Chizoba Ekezie. Functionality and allergenicity response of king prawn (*Litopenaeus Vannamei*) proteins following modification by cold plasma [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019

[39] ZHANG Ziye, ZHANG Xiaofeng, CHEN Wei, et al. Conformation stability, in vitro digestibility and allergenicity of tropomyosin from shrimp (*Exopalaemon modestus*) as affected by high intensity ultrasound [J]. Food Chemistry, 2018, 245

[40] YANG Wenhua, TU Zongcai, WANG Hui, et al. High-intensity ultrasound enhances the immunoglobulin (Ig)G and IgE binding of ovalbumin [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(9): 2714-2720

[41] WANG Jin, Vanga S K, Mccusker C, et al. A comprehensive review on kiwifruit allergy: pathogenesis, diagnosis, management, and potential modification of allergens through processing: review on kiwifruit allergy [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(2): 500-513

[42] Malgorzata N, Urszula T, Luca L, et al. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration [J]. Food Chemistry, 2014, 144: 18-25

[43] 马涛,王一侠,刘艳,等.超声处理对三文鱼小清蛋白构象及致敏活性的影响[J].食品工业,2017,38(3):160-163
MA Tao, WANG Yixia, LIU Yan, et al. Effect of ultrasonic treatment on the antigenicity and conformation of *Salmon*

parvalbumin [J]. The Food Industry, 2017, 38(3): 160-163

[44] DONG Xin, WANG Jin, Raghavan V. Effects of high-intensity ultrasound processing on the physiochemical and allergenic properties of shrimp [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 65: 102441

[45] 林薇,许素玲,周琼艳,等.蟹类主要过敏原及其消减技术研究进展[J].中国食品卫生杂志,2019,31(3):290-296
LIN Wei, XU Suling, ZHOU Qiongyan, et al. Research progress of crab allergens and methods of reducing allergenicity [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 31(3): 290-296

[46] Costa M N. Gamma radiation effect on allergenic food [J]. Intech Open, 2017: 139-140

[47] MEI Kalin, LI Gaoshang, ZHANG Jinjie, et al. Studying on the IgG binding capacity and conformation of tropomyosin in *Ovalipes punctatus* meat irradiated with electron beam [J]. Radiation Physics and Chemistry (Oxford, England: 1993), 2020, 168: 108525

[48] LIU Yixuan, LI Zhaojie, Pavase T, et al. Evaluation of electron beam irradiation to reduce the IgE binding capacity of frozen shrimp tropomyosin [J]. Food and Agricultural Immunology, 2017, 28(2): 189-201

[49] GUAN Aiyan, MEI Kalin, LV Mingchun, et al. The effect of electron beam irradiation on IgG binding capacity and conformation of tropomyosin in shrimp [J]. Food Chemistry, 2018, 264: 250-254

[50] LI Zhengxing, LIN Hong, CAO Limin, et al. Impact of irradiation and thermal processing on the immunoreactivity of shrimp (*Penaeus vannamei*) proteins [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2007, 87(6): 951-956

[51] 刘光明,王玉松,黄园园,等.辐照处理对蟹类过敏原(原肌球蛋白)性质的影响[J].厦门大学学报(自然科学版),2009,48(2):287-292
LIU Guangming, WANG Yusong, HUANG Yuanyuan, et al. The effects of irradiation on the allergenicity of crab tropomyosins [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2009, 48(2): 287-292

[52] Ganesan A R, Tiwari U, Ezhilarasi P N, et al. Application of cold plasma on food matrices: A review on current and future prospects [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(1): e15070

（上接第 326 页）

[8] 朱小钿,张燕,彭宏威,等.免疫传感器在食品安全检测中的应用[J].食品安全质量检测学报,2019,10(3):70-76
ZHU Xiaodian, ZHANG Yan, PENG Hongwei, et al. Application of immunosensor in food safety detection [J]. Journal of Food Safety and Quality Detection, 2019, 10(3): 70-76

[9] Eissa S, Tlili C, L'Hocine L, et al. Electrochemical immunosensor for the milk allergen β-lactoglobulin based on electrografting of organic film on graphene modified screen-printed carbon electrodes [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2012, 38(1): 308-313

[10] Ruiz-Valdepena Montiel V, Campuzano S, Torrente-Rodriguez R M, et al. Electrochemical magnetic beads-based immunosensing platform for the determination of α-lactalbumin in milk [J]. Food Chemistry, 2016, 213(dec.15): 595-601

[11] 杨高建,赖玉璇,汤从利,等.基于纳米金和辣根过氧化物酶信号放大的癌胚抗原电化学免疫传感器[J].湖南工业大学学报,2018,32(5):27-31
YANG Gaojian, LAI Yuxuan, TANG Congli, et al. Carcinoembryonic antigen electrochemical immunosensor based on nano gold and horseradish peroxidase signal amplification [J]. Journal of Hunan University of technology, 2018, 32(5): 27-31

[12] 孔粉英,王伟.纳米材料在电化学免疫传感器中的应用研究[J].盐城工学院学报(自然科学版),2013,26(2):13-19
KONG Fenying, WANG Wei. Application of nano materials in electrochemical immunosensors [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2013, 26(2): 13-19

[13] Boitz L I, Fiechter G, Seifried R K, et al. A novel ultra-high performance liquid chromatography method for the rapid determination of β-lactoglobulin as heat load indicator in commercial milk samples [J]. Journal of Chromatography A, 2015, 1386: 98-102

[14] Ji J, Zhu P, Pi F, et al. Development of a liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for simultaneous detection of the main milk allergens [J]. Food Control, 2017, 74: 79-88