

玉米中的过敏原及物理加工对食品致敏性的影响研究进展

罗倩^{1,2}, 崔妍^{1,2}, 徐静雯^{1,2}, 郑明珠^{1,2*}, 刘景圣^{1,2}

(1. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 长春 130118; 2. 小麦和玉米深加工国家工程研究中心, 长春 130118)

摘要: 随着食用玉米的人群越来越广泛, 玉米过敏问题日渐凸显。对玉米过敏的有效防御被人们所重视, 加工通过改变过敏原的蛋白结构可以使过敏原致敏性降低。其中食品加工对过敏原致敏性的研究主要集中在热处理方面; 然而各种非热方法, 如微波、超高压等食品加工新技术, 在降低食品的致敏性方面也有广阔的应用前景。相比来说非热方法通常是有利的, 它们能够保留在热处理过程中经常改变的感官特性, 如营养成分和风味。本文综述了玉米过敏原研究现状, 总结了玉米中的过敏原, 描述了对食物进行热处理和非热处理在改变食物过敏原反应性方面的作用, 并且提出多种加工方式联合使用来降低玉米过敏原致敏性的未来研究方向, 为玉米过敏的防御提供参考。

关键词: 玉米; 过敏原; 热加工; 非热加工; 物理加工; 致敏性

Research progress on allergens in corn and the effects of physical processing on food allergenicity

LUO Qian^{1,2}, CUI Yan^{1,2}, XU Jing-Wen^{1,2}, ZHENG Ming-Zhu^{1,2*}, LIU Jing-Sheng^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;
2. National Engineering Laboratory for Wheat and Corn Deep Processing, Changchun 130118, China)

ABSTRACT: As more and more people eat corn, the problem of corn allergy is becoming more and more prominent. Attention has been paid to the effective defense of corn allergy. Processing can make the allergen less allergenic by changing its protein structure. Among them, the study of food processing on allergen allergenicity mainly focuses on thermal treatment; however, various non-thermal methods, such as microwave, ultra-high pressure and other new food processing technologies, could also hold great promise in reducing the allergenicity of foods. Compared to other methods, non-thermal methods are usually advantageous, they are able to retain sensory properties that often change during thermal treatment, such as nutrient content and flavor. This paper reviewed the current research status of corn allergens, summarized the allergens in corn, described the effects of heat treatment and non-thermal treatment of food on changing the reactivity of food allergens, and proposed the future research direction of combining multiple processing methods to reduce the sensitization of corn allergens, so as to provide references for the defense of corn allergy.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2101000、2021YFD2101001)、吉林省科技发展计划项目(20210202108NC)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD2101000, 2021YFD2101001), and the Science and Technology Development Program of Jilin Province (20210202108NC)

***通信作者:** 郑明珠, 博士, 教授, 主要研究方向为粮食深加工。E-mail: zhengmzhu@163.com

***Corresponding author:** ZHENG Ming-Zhu, Ph.D, Professor, College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China. E-mail: zhengmzhu@163.com

KEY WORDS: corn; allergen; thermal processing; non-thermal processing; physical processing; allergenicity

0 引言

玉米是一年生草本植物,在我国北方被称之为苞米、棒子等,在南方被称为珍珠米、苞谷^[1-2]。玉米与稻谷、小麦并称世界三大粮食作物,是世界上最重要的粮食作物之一,由于其产量大,具有广泛的利用价值,此外,玉米营养物质丰富,不仅可以作为食物还有药用的价值,所以玉米加工食品被人们广泛接受^[3]。

食物过敏是免疫系统对特定食物的一种反应,食物进入机体以后产生异常的反应,导致机体生理功能的紊乱甚至机体组织的损伤,出现以呼吸道、皮肤、消化道系统为主的临床症状^[4-6]。导致机体发生过敏反应的物质称为过敏原,过敏原大部分是水溶性糖蛋白,分子量为10~70 kDa^[7],并且性质较稳定不易被破坏。食物过敏属于免疫球蛋白 E (immunoglobulin E, IgE)介导的速发型过敏反应,最常见于食物过敏过程,如图 1 所示,当过敏原第一次进入体内,刺激机体产生 IgE,它可以与细胞上的受体结合,使机体致敏^[8]。当过敏原再次进入已处于致敏状态的机体时,与肥大细胞及嗜碱性粒细胞上的 IgE 结合,结合后便立刻改变细胞膜的稳定性,激活细胞内酶系统,引起一系列的生理反应,如肥大细胞的脱颗粒及炎性介质的释放,对机体造成不同程度的伤害^[9-10]。

第一个玉米过敏反应的病例可以追溯到 1984 年^[11],是由于手术手套中玉米淀粉引发的^[12],之后多次出现“面

包师哮喘”的现象^[13]。PASINI 等^[14]招募 16 名对玉米粉具有皮肤点刺试验(skin prick test, SPT)和 CAP 系统荧光酶联免疫分析(CAP-system IgE fluozoenzyme immunosorbent assay, CAP-FEIA)阳性的受试者进行了双盲安慰剂对照食物挑战(double-blind, placebo-controlled food challenge, DBPCFC),其中有 6 人表示在摄入玉米食物后出现荨麻疹等症状,证实了 JONES 等^[15]的观察结果,他发现 17 名对玉米 SPT 呈阳性的受试者中有 5 名对玉米的口服挑战有反应。WEICHEL 等^[16]通过皮试、特异性 IgE 和 DBPCFC 试验对 27 名有玉米过敏史的患者进行评估,发现 48%的患者试验阳性,说明对食用玉米产品有过敏现象。同样,SCIBILIA 等^[12]将 19 名有玉米过敏反应临床史的患者作为研究对象,其中有 6 例有食用玉米后危及生命的过敏反应史,结果发现有 13 例患者 DBPCFC 阳性,其中最低激发剂量为 0.1 g。患者食用玉米食品后会出现皮肤或者胃肠道方面的过敏反应,也因为患者的体质不同甚至有生命危险,因此迫切需要降低玉米类食品致敏性。目前,临床上还无十分有效的治疗过敏的方法,因此避免过敏原的摄入便成为最有效的减少食物过敏的办法^[17]。

研究表明通过加工改变致敏蛋白结构,破坏或者暴露抗原构象表位,可以达到致敏性降低的效果^[18-20]。目前已有文章确定了玉米中的致敏蛋白以及患者食用后出现的症状,本文将玉米中的过敏原进行详细全面地概述,并且说明热加工以及非热加工对致敏蛋白的影响,为食品致敏性的减弱提供更有利的选择。

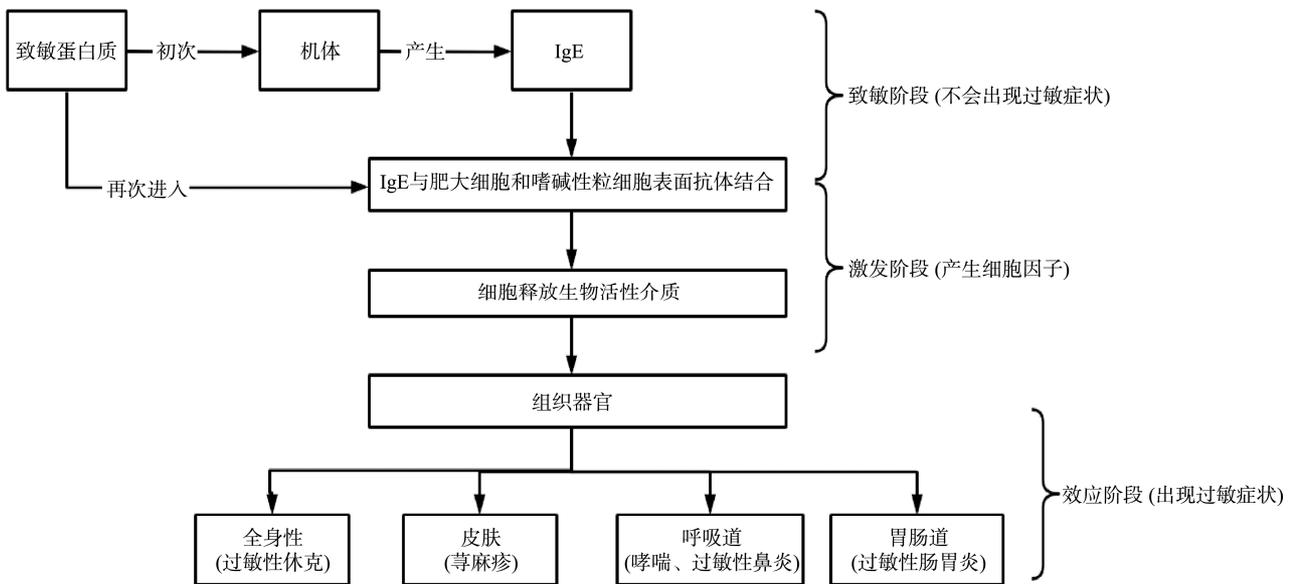


图 1 I 型超敏反应进程图
Fig.1 Process chart of I-type hypersensitivity reaction

1 玉米过敏原

1.1 食入性过敏原

1.1.1 脂质转移蛋白

脂质转移蛋白(lipid transfer protein, LTP)是一种低分子量的蛋白质,对体外膜间脂质转移有重要的作用,其在许多植物中都被发现,存在于植物各个发育阶段的组织中。LTP 因其丰富的氨基酸序列建立了很大的基因家族,在基因组数据库中记录了超过 50 个植物 LTP 的氨基酸序列,根据其分子量,分为了两个家族,一种是由分子量约为 9 kDa 的蛋白质组成称为 LTP1,另一种由分子量约为 7 kDa 的蛋白质组成命名为 LTP2^[21-22]。

分子量约为 9 kDa 的玉米蛋白是玉米的主要食物过敏原,是一种耐热脂质转移蛋白,称为 *Zea m 14*^[23-24],这种蛋白质不仅存在于玉米的水溶性部分也可以在醇溶蛋白以及总蛋白质部分中鉴定出,其有耐高温的特点,在食品加工和酶解过程中很稳定,可以在食用玉米的所有形式中找到^[25]。它是在对玉米油全身严重过敏反应的患者中被发现,该蛋白质在玉米种子和玉米面粉中的浓度较高,占玉米 21 种可溶性蛋白质的 4%^[25-26]。有研究表明,*Zea m 14* 是意大利患者玉米过敏的主要过敏原,在所有的患者中都观察到了对该过敏原的特异性 IgE 反应,且 *Zea m 14* 与桃子的 LTP 非常相似,从而解释了玉米与桃子过敏的临床交叉反应^[22]。虽然它是重要的食物过敏原,PASTORELLO 等^[21]发现与并发的花粉过敏没有关系。

为了降低脂质转移蛋白的致敏性,有学者对其进行了处理,发现 LTP 在 100°C 烹饪后仍然保持 IgE 结合活性,即使是在最大限度的热处理和不同的提取方式下,*Zea m 14* 仍然存在^[27]。研究表明加热会不可逆地改变纯化 LTP 的二级结构,但是温度引起 9 kDa 结构损失是一个逐步的过程,因为在热处理后的样品中,IgE 与 LTP 的结合力还是很强,但是快速加热并不能改变 LTP 的结构,所以玉米粥依旧有致敏性^[28]。因此认为 LTP 的结合域可能是线性的而不是空间构象的,因为热处理一般对于一级结构的破坏力比较小。也可能是热处理后玉米粉 LTP 的高级结构因为食物的相对含水量减少以及其他物质的存在而被降低或者阻止破坏;除此之外还发现玉米 LTP 与草花粉过敏原没有任何交叉反应,所以证明此过敏原以免疫原性和致敏性构象到达胃肠道的免疫系统,从而致敏或者诱导全身症状^[29]。有研究在玉米的许多组织中观察到 LTP 的多种分子形式和异构体,而且其浓度低,结构相近,所以想要准确定量分析,需要灵敏度高以及选择性高的仪器,这导致 LTP 的纯化和表征很难实现^[30]。

1.1.2 玉米硫氧还蛋白

玉米硫氧还蛋白被命名为 *Zea m 25*,分子量约为 12 kDa,

是轻微的玉米食物过敏原^[24],与“面包师哮喘”有关,它是一种普遍存在的蛋白质,具有多效性,存在于真核生物和原核生物中,它在小麦和玉米、真菌中被鉴定为过敏原^[13],之后也在飞蛾中鉴定出^[31]。在人体内发现的内源性人硫氧还蛋白被认为在肺部和人体其他组织抗炎过程中起重要的保护作用^[32]。WEICHEL 等^[24]通过利用噬菌体展示,通过三轮亲和选择来富集 IgE 结合蛋白,在玉米中识别出过敏原硫氧还蛋白。免疫反应表明谷物和人硫氧还蛋白具有共同的 B 细胞表位,所以这种情况可能导致维持和恶化过敏性炎症。有研究发现用还原的小麦硫氧还蛋白处理小麦过敏原提取物可以降低其致敏性,除此之外,硫氧还蛋白还可以降低牛奶中 β -乳球蛋白的致敏性,所以对于硫氧还蛋白来说,其既可以引发过敏反应也可以通过其还原性来降低致敏性^[33]。如果可以对玉米中的硫氧还蛋白有更细致的研究,或许在阻止其过敏的同时可以验证并发挥其药用价值。

1.1.3 胰蛋白酶抑制剂

分子量为 16 kDa 的盐溶性蛋白对应于胰蛋白酶抑制剂,胰蛋白酶抑制剂主要是一类抗营养因子,可以显著抑制动物的生长发育,还带有致敏性,该过敏原主要存在于谷物中,其既可以通过呼吸道引发人体过敏,又可以通过胃肠道引起食物过敏^[23],被描述为玉米中的次要过敏原。其首次报道是在大米过敏患者的血清中发现了特异性结合抗体 IgE,其是大米的主要过敏原,并且是禾本科谷物之间交叉过敏的主要原因^[34],有研究表明玉米中胰蛋白酶抑制剂为过敏原,可以引起临床症状,但是目前对它详细的蛋白结构以及性质没有具体的研究。

1.1.4 几丁质酶

几丁质酶可以催化几丁质的水解,它在自然界中广泛存在,在动植物、菌类以及病毒中都被鉴定出,在植物中,几丁质酶是一种致病相关蛋白,它有抵抗真菌或者病原体侵害的作用,但同时因为其过度表达对人体造成过敏的风险^[35]。

植物中的几丁质酶属于多基因家族,根据其氨基酸序列的相似性和一级结构,可以将几丁质酶分为 6 类,即 I~VI 类,不同类别的几丁质酶分子量差别很大。几丁质酶的催化结构域由 220~230 个氨基酸残基组成,根据酶对底物的催化方式,以及催化结构域序列相似性,几丁质酶被区分为 GH18 和 GH19 两个家族,其中 GH18 几丁质酶广泛分布于微生物、植物和动物中,包括 III 类和 V 类植物几丁质酶,两者都不具有几丁质结合模块,GH19 家族几丁质酶几乎只存在于植物中,由 I、II、IV 和 VI 类几丁质酶组成^[36-37]。

植物几丁质酶作为食物过敏原,它首次在牛油果果实中被发现,之后又在多种植物的果实以及种子中被鉴定出^[35],玉米几丁质酶 A 蛋白(chitinase A, ChiA)是一种 IV

类植物几丁质酶,被划分到 GH18 中。在发育的玉米籽粒中含量比较丰富,在通过免疫印迹分析进行的玉米过敏原综合研究中,在玉米的球蛋白、白蛋白、谷蛋白中鉴定出 ChiA 对应于分子量为 30 kDa 的多肽,又称为 Zea m 8。值得被注意的是,在一些植物衍生食品,如玉米粥中也发现了几丁质酶的存在^[38]。长期以来,人们把几丁质酶过敏归因于结合模块的存在,且玉米变应原几丁质酶的催化模块在大肠杆菌细胞中以重组分子的形式表达,并对玉米过敏者血清产生免疫反应,这清楚地表明几丁质酶的变应原性并不局限于几丁质结合域^[35]。

1.1.5 γ -玉米醇溶蛋白中的致敏蛋白质

50 kDa 的盐不可提取蛋白属于还原可溶性蛋白部分,有些用还原性酒精溶液提取的蛋白质在还原条件下也可溶于水,所以称为还原可溶性蛋白质^[39]。研究发现少量 50 kDa 的玉米蛋白具有高度的交叉反应性,经与抗 50 kDa γ -zein 抗血清免疫反应,鉴定该 50 kDa 交叉反应蛋白为 50 kDa γ -zein^[40]。有研究通过 DBPCFC 发现,玉米还原可溶性蛋白部分中的 50 kDa 蛋白质被所有该试验阳性受试者的血清 IgE 识别,并且对于加热以及消化都有抵抗力,所以被鉴定为玉米过敏的潜在过敏原,但是它可以通过二硫键还原剂来溶解二硫键使蛋白的结构发生改变,从而使其致敏性降低^[39]。

27 kDa γ -zein 是在玉米种子储存蛋白 γ -zein 中被发现^[41],27 kDa 蛋白质为仔猪的免疫显性蛋白质,对胃蛋白酶的消化有抵抗力,即使它与胃蛋白酶反应 60 min 后,该蛋白质也大量存在,并且不能检测到胃蛋白酶消化其得到的任何主要肽。27 kDa γ -zein 是一种富含半胱氨酸的蛋白质,并且含有 4 个二硫键,有学者认为是二硫键的存在使 27 kDa γ -zein 在结构上可以抵抗蛋白酶,所以认为消除分子内的二硫键可以降低其致敏性^[42]。

LEE 等^[40]发现 50 kDa 蛋白明显比 27 kDa 蛋白具有更强的免疫反应性,在氨基酸序列中发现 50 kDa γ -zein 蛋白中有较大的聚谷氨酰胺片段,而 27 kDa γ -zein 的片段较小,所以作者假设与 27 kDa γ -zein 相比,50 kDa γ -zein 的聚谷氨酰胺块更大,数量更多,可能导致其交叉反应性更高。

1.1.6 56 kDa 蛋白质

分子量为 56 kDa 的蛋白称为颗粒结合淀粉合成酶,玉米过敏患者的血清显示 IgE 可以与 56 kDa 蛋白结合,这种蛋白只存在于玉米和大米中,但是不存在于大豆和花生的籽粒中,其在水稻胚乳中含量丰富,KRISHNAN 等^[43]从水稻胚乳中纯化得到颗粒结合淀粉合成酶,证明了该蛋白质对玉米过敏患者血清中的 IgE 抗体有明显的反应性,植物中编码颗粒结合淀粉合成酶(granule-bound starch synthase, GBSS)的基因高度保守,分为 GBSS I 和 GBSS II 两个家族^[44],GBSS I 基因主要在贮藏组织中表达,而

GBSS II 基因则在非贮藏组织中表达^[45],GBSS I 是参与玉米碳水化合物代谢的酶,也是淀粉中唯一被血清 IgE 鉴定为过敏原的玉米蛋白质。虽然有报道说 GBSS I 是对玉米敏感的人类以及狗的过敏原,但是,含淀粉植物的 GBSS 有高度的同源性,所以 GBSS I 作为过敏原导致 IgE 交叉反应的可能性很大,而这种交叉反应是否和对玉米敏感的人类以及狗过敏相关还没有被报道过^[46]。

1.1.7 7S 球蛋白

7S 球蛋白(Vicilin)是一种 150~190 kDa 的蛋白,相比其他的致敏蛋白来说,其分子量较大,因为它由一连串的 6 个斑点组成。过敏性主要是根据其抗原结合表位来决定,表位序列越丰富越容易被抗体结合,更易于发生过敏反应。而 Vicilin 因为其包含重复肽序列,并且它们都是致敏的^[47],所以使 IgE 结合表位增加,使其具有更高的免疫原性。但是这也只能说明其对于过敏患者来说更可能出现反应,不能证明其更容易致敏,因为患者对致敏蛋白的敏感性不尽相同^[48]。Vicilin 通常是三聚体蛋白,但也被发现六聚体的存在,这主要取决于它们的离子强度,Vicilin 家族蛋白通常缺少半胱氨酸,所以缺乏二硫键,其结构稳定性一般是由疏水相互作用、氢键和范德华力来维持^[49],有研究通过 DBPCFC 对杏仁过敏患者的血清进行免疫印迹试验,研究表明,接近一半的患者血清中含有能识别重组杏仁 Vicilin 的 IgE 抗体,所以把 Vicilin 定义为过敏原^[50]。

1.2 玉米中吸入性过敏原

玉米花粉过敏原 Zea m 1,是一种分子量为 28~35 kDa 的 β 膨胀素^[51-52],是导致季节性症状的主要玉米花粉过敏原,吸入过敏原之后出现呼吸困难甚至哮喘的症状^[52], β 膨胀素是一种扩张蛋白,参与细胞壁的拉伸和花粉管的生长,以促进受精^[53]。玉米中的过敏原抑制蛋白是一种泛过敏原^[52],命名为 Zea m 12,分子量为 55 kDa,抑制蛋白是一种普遍存在于真核细胞的细胞骨架蛋白,最初是在桦树花粉变应原报道证实,进一步研究发现该蛋白是广泛存在于花粉以及植物性食物中的过敏原^[54],在花粉过敏以及植物性食物过敏患者之间具有高度的交叉反应^[55]。分子量为 12 kDa 的过敏原 Zea m 13 是一种多聚半乳糖醛酸酶^[56-57],它是在成熟玉米花粉中特异性表达的蛋白,能催化果胶水解和分解的重要的植物细胞壁降解酶,在植物发育的几乎所有阶段都是必不可少的^[58-59]。Zea m 13 与其他花粉特异性蛋白具有显著的序列同源性,编码花粉特异性玉米蛋白 Zea m 13 的 cDNA 与单子叶和双子叶植物的许多花粉以及最近从橄榄和黑麦草中描述的过敏原具有显著的序列同源性。为了验证 Zea m 13 蛋白是否具有 IgE 结合能力,有学者在大肠杆菌中表达了 Zea m 13,发现它与草花粉过敏患者血清 IgE 发生反应^[60]。

2 物理加工对过敏原的影响

食品物理加工改变蛋白质致敏性主要取决于过敏原本身的特性,包括其自身的免疫原性,过敏原与 IgE 的结合能力,加工条件以及食物基质。过敏原免疫反应性改变是因抗原线性和构型表位的失活或破坏,或者通过一定的

处理使得暴露的抗原表位隐藏^[61-62]。食品物理脱敏方法可分为热加工处理和非热加工处理,其中热处理主要包括蒸煮、烘焙等;非热处理包括辐照、超声波和超高压等。加工虽不能完全消除过敏原的致敏潜力,但可通过加工方式和加工参数的选择使其致敏潜力最小化^[63-65]。在表1中总结了不同加工方式对食物过敏原的影响。

表1 加工对食物过敏原的影响
Table 1 Impact of processing on allergens

加工方式	加工条件	过敏原	结构变化	致敏性变化	特点	参考文献
热加工						
		桃子(Api g1)/花生(Ara h1)	结构稳定	致敏性不变		[66-67]
	水煮	花生(Ara h1 和 Ara h2)	结构不变, 分子量为10~16 kDa 的低分子量蛋白或肽片段溶解到水中	致敏性降低 50%	热处理方法简单, 但降低过敏性效果不理想, 且加热后可能会出现新的过敏原, 且对食物品质有较大的影响	[68]
	25~100°C	麦醇溶蛋白	二级结构被破坏	致敏性降低		[69-70]
		谷蛋白	官能团暴露, 线性表位被破坏	致敏性降低 64%		[71]
	煮沸 12 h	花生蛋白	高级结构被破坏	致敏性下降 19 倍		[72]
	喷射蒸煮	玉米蛋白	消化率提高	致敏性有待研究		[73]
非热加工						
超高压	300~600 MPa	核桃(Jug r4) 银杏叶种子蛋白	结构稳定 α 螺旋和 β 折叠被大量破坏	没有影响 致敏性降低		[74] [75-76]
	400 Mpa 15 min	大豆蛋白	疏水键和自由巯基含量显著增加	致敏性降低	可以保护食品的天然特性, 致敏性降低程度约50%, 对设备要求高	[77]
	200~400 Mpa	苦杏仁球蛋白 玉米蛋白粉	表观形态和二级结构改变 二硫键断裂、重排	致敏性降低 致敏性有待研究		[78] [79]
γ -射线		杏仁、腰果、胡桃 麦醇溶蛋白	结构稳定 抗原结合表位增加	致敏性不变 致敏性增加	在较高剂量(100 kGy)下致敏性显著降低(>90%), 低剂量(25 kGy)时致敏性减弱(<30%), 可以微生物灭活, 长时间暴露在辐射下可能对工业工人有害	[80-81] [82-83]
超声		谷物蛋白	蛋白结构破坏, 消化率提高	致敏性降低		[84-85]
	40 kHz、300 W	大豆蛋白	抗原决定簇暴露, 随时间增加被破坏	致敏性先升高后降低趋势, 80 min 时致敏性最低		[86-87]
	225 W 90 min	玉米醇溶蛋白	二级结构有一定程度的破坏, 且该蛋白质在结构松散	致敏性有待研究	能量传递快, 对食物品质损害小, 致敏性降低程度小(约50%)	[88-89]
	500 W	玉米醇溶蛋白	α 螺旋含量降低, β 折叠含量增加	致敏性有待研究		[90-91]

表 1(续)

加工方式	加工条件	过敏原	结构变化	致敏性变化	特点	参考文献
发酵		植物蛋白	分解形成小分子多肽及氨基酸	致敏性降低		[92-93]
	酵母菌发酵	小麦	面筋结构被破坏	致敏性降低		[94]
	枯草芽孢杆菌发酵	花生中 Ara h 1 及 Ara h 2	二级结构被破坏	过敏性蛋白质降低 70%	总致敏原降解率高达 80%，但发酵周期较长，发酵过程也可能会出现未知抗营养元素	[95]
	植物乳酸菌液体发酵 48 h	大豆粉/大豆分离蛋白	α 螺旋和无规则卷曲含量显著降低， β 折叠和 β 转角含量显著增加	大豆蛋白免疫活性降低(64%)		[96]
	枯草芽孢杆菌 A5	玉米醇溶蛋白	游离巯基含量上升，玉米蛋白的空间结构松散	过敏性有待研究		[97-98]
研磨		花生粉	结构稳定	致敏性不变	加工简便，可以对谷物进行精细化同时破坏过敏原，但是会破坏谷物中的维生素	[99-101]
		谷物和小麦	外皮被除去	致敏性降低		[102-103]

2.1 热处理

过敏原主要是由蛋白质构成，其在高温条件下空间构象以及三级结构会发生变化，所以在一定程度上加热可以降低甚至是消除过敏原活性^[66]。热加工对过敏原的破坏程度主要取决于加热的温度、时间和方式等外部原因，以及蛋白质自身的状态、二硫键的断裂等内部原因。热加工是食品加工中常用的方法，包括传统的蒸煮、煎炸，现代的微波加热等，热处理可以通过产生热量来改变 IgE 的结合构象表位以及提高蛋白消化率来降低其致敏性，但是它对食品的质量会产生不良的影响^[67-69]。然而不同方式的热处理对植物蛋白的致敏性影响差异很大，煮沸和蒸煮通常可以维持或者降低大多数过敏原与 IgE 的结合能力，而烘焙可能因为发生美拉德反应产生羰基化合物而增加致敏性^[70]。一般来说，来自植物科的过敏原通常都是压力稳定型的，研究表明微波加热联合超声也不会影响玉米中 LTP 的 IgE 结合能力，但是在热处理的过程中改变 pH，蛋白质可能不会恢复到其原始状态，从而降低其致敏性，也有发现称 LTP 在酸性条件下可以恢复到原始的状态，而在中性条件下则不会^[27]。在压力和热量共同的作用下，过敏原可能发生破裂，所以可以降低其与 IgE 的结合能力，但是单独的压力处理或者是高温处理对过敏原的影响较小^[71]。有研究表明，核桃可以抵抗低温高压，但是在高压(2.56 atm)和高温(138°C)的条件下可以导致核桃蛋白的破裂，使其与 IgE 的结合能力下降。以往也有研究发现，在密闭的容器中对食物进行煮沸，可以使过敏原从种子中转移到沸水中，从而可以降低食物的过敏性，花生种子的过敏原 2S 白蛋白就如此^[72]。张九凯等^[62]通过酶联免疫吸附测定实验评价了芝麻蛋白在经过不同煮沸时间处理后的芝麻过敏原性质，发现煮沸加热这种传统的热加工技术对降低芝麻蛋白过敏原性的作用并不显著，这可能是由于芝麻的主要过敏原 2S

白蛋白(Ses i 1)等是热稳定的，芝麻过敏原 2S 白蛋白与玉米致敏蛋白 LTP 同属谷醇溶蛋白超家族，所以正如上文所述，脂质转移蛋白在 100°C 烹饪后仍然保持 IgE 结合活性。LESZCZYNSKA 等^[69]发现微波加热不能消除小麦醇溶蛋白的过敏性，用微波加热处理纯麦醇溶蛋白和小麦粉，发现麦醇溶蛋白的免疫反应性增加，而高温高压利于降低其致敏性，王超跃等^[73]发现喷射蒸煮技术可以使玉米粉的溶解度以及消化率提高，所以加工方式以及条件的选择对降低过敏原致敏性至关重要。

2.2 非热处理

热处理在食品中广泛应用，尽管其去除过敏原的能力比较强，但是对食品基质以及口感影响较大。非热加工可以通过促进致敏蛋白的聚集、交联来改变其构象表位，或者通过在加工过程中致敏蛋白的氨基酸序列破碎来改变其线性表位，从而有利于降低食品蛋白质的致敏性。

2.2.1 超高压处理法

超高压加工技术是一种新型的食品非热加工技术。这种加工方法可以在室温下使用 100 MPa 以上的超高压灭活食品中的微生物和酶，同时保持食品的原始风味和营养价值^[74]，致敏蛋白在高压的作用下会发生结构修饰，使蛋白质变性甚至发生破碎，因此其构象发生改变无法被 IgE 抗体识别^[75]。ZHOU 等^[76]发现使用超高压处理银杏种子蛋白，其致敏性被降低，二级结构中的 α 螺旋和 β 折叠被大量破坏，变成了无规则的卷曲，所以可以确定致敏蛋白结构的变化可以减弱过敏原的致敏性。王一超等^[77]研究发现热处理及超高压联合热处理可以破坏大豆过敏原抗原表位的特异性抗体。朱乾乾^[78]发现超高压处理可以改变苦杏仁球蛋白的表观形态和二级结构，在一定程度上降低了苦杏仁致敏原的免疫反应性。苦杏仁球蛋白为 11S 球蛋白与玉米 LTP 都属于谷醇溶蛋白家族，桂世敏^[79]发现通过高压处理

可以破坏玉米蛋白的疏水键,进而改变蛋白结构,所以推测超高压处理可以改变玉米的过敏性。

2.2.2 γ 射线辐照处理法

辐照技术可以促进食物中生物大分子发生降解、交联、疏水基团外露和分子构象的改变,蛋白质经此变化后溶解性和稳定性下降,发生沉淀和变性,丧失生物活性,进而破坏其抗原决定簇使致敏性降低^[80]。黄忠民等^[68]发现辐照处理可以导致蛋白的结构发生变化,使疏水基团暴露,从而使致敏性降低。对玉米醇溶蛋白进行辐照以后,可以发现玉米醇溶蛋白的二级结构中 α 螺旋和 β 折叠的含量逐渐下降,而 β 旋转和其他卷曲形式的含量逐渐增加^[81],这种结构的改变与ZHOU等^[76]使用超高压处理银杏种子蛋白降低过敏原致敏性的一致,所以推测辐照可以降低玉米蛋白致敏性。罗春萍等^[82]发现胰蛋白酶抑制因子表现出对辐照的敏感性,经20~30 kGy剂量辐照后胰蛋白酶抑制因子与人血清IgE的结合能力下降,孙先保等^[83]研究证明,经25 kGy辐照处理后,芸豆凝集素的特异性IgE结合率下降了约34%,此外,对一些其他植物源凝集素类过敏原蛋白,如紫花油豆凝集素,进行辐照处理时发现,凝集素蛋白多肽链发生了分解,形成了熔球态,致敏性丧失。

2.2.3 超声波处理法

超声波是一种直接的蛋白质修饰方法,可以通过破坏蛋白质内部的某些化学键来改变蛋白质结构,从而影响蛋白质的致敏性以及功能特性^[84]。超声波技术应用广泛,包括食品的杀菌和提取等^[85]。其产生的波可以被食品所吸收,对于蛋白质来说,超声波可以使其天然结构发生变化,或者将致敏蛋白进行了修饰,从而破坏甚至消除了过敏原的结合表位,使其降低或者丧失。EKEZIE^[86]发现用不同功率的超声波(0~300 W)处理大豆种子,然后发芽5 d,在最优功率下,发芽大豆蛋白IgE的结合能力下降51.39%。张志华等^[87]利用不同时间的超声处理对大豆蛋白的潜在致敏性进行研究,发现其三级结构破坏,也更易被十二指肠消化,且消化产物的潜在致敏性降至最低。薛艾莲等^[88]发现超声在提高醇溶蛋白提取率的同时可以使蛋白分子间的二硫键破坏,使蛋白结构发生改变进而影响其致敏性。李婷婷等^[89]发现超声可以使玉米醇溶蛋白二级结构有一定程度的破坏,且该蛋白质在结构松散状态下易被消化,李春强等^[90]发现超声可以使蛋白球状结构伸展、聚集体破碎,改变蛋白结构,郭浩等^[91]发现超声辅助糖基化改性玉米醇溶蛋白结构,玉米中同样含有7S球蛋白,从其他的文章中发现超声可以改变球蛋白的结构,推测超声也有助于玉米蛋白致敏性的降低。除此之外,超声联合其他处理方法来降低食品致敏性也是有利的选择,但还需要进行更多的研究探索。

2.2.4 微生物发酵处理法

当微生物在厌氧条件下作用于食物底物,产生最终

产物如酒精、有机酸和二氧化碳时,就会发生发酵,在发酵过程中,通过修饰或者破坏过敏原的表位而引起食物蛋白质的变化,蛋白质经微生物发酵后分解形成小分子多肽及氨基酸,从而降低食品过敏原^[92-93],李玺等^[94]发现酵母菌发酵小麦使其面筋结构被破坏,从而使过敏原的致敏性降低。发酵可以提高蛋白的溶解度,从而更容易被胃肠道消化,既可以提高蛋白的生物利用度又可以降低其致敏性。用纳豆杆菌发酵处理的醇溶蛋白样品二级结构中各种结构含量几乎与未处理的醇溶蛋白相同,所以选择合适的菌种进行发酵对蛋白结构的改变会有很大的影响,进而影响致敏性^[95]。马小梅等^[96]发现植物乳酸菌液体发酵大豆分离蛋白48 h时,其免疫反应性降低64%,孙华欣等^[97]发现菌酶协同发酵会使玉米蛋白粉的空间结构发生改变,使连接肽链之间的二硫键打开,导致游离巯基含量上升,玉米蛋白的空间结构松散,提高玉米蛋白粉的体外消化率,黄智本等^[98]发现食物过敏原消化稳定性的降低可能有助于减弱其引发过敏反应,所以推测生物发酵玉米蛋白可以降低其致敏性。

2.2.5 研磨处理法

研磨属于一种机械力,可以有效的对物质进行改性或者制备不同材料,它可以使物料破碎,从而引起物质性质发生变化^[99]。HOURIHANE等^[100]用8种花生粉对5个花生过敏的患者进行放射免疫吸附试验,发现8种花生粉对5名花生过敏患者的血清IgE均显示了很强的结合能力,所以研磨是不能降低花生的过敏性。研磨处理可以使豌豆蛋白的二级结构从 β 折叠和 α 螺旋转变为 β 折叠和无规则卷曲结构,以及三级结构变得舒展,蛋白结构的改变可以使抗体结合表位被遮蔽甚至消失,使抗原与抗体无法进行结合,从而减弱过敏症状。而且很多谷物的过敏原主要存在于其外皮中,在研磨的过程中把外皮去掉可以直接去除过敏原,所以吃细粮可以减少过敏体质人群对的过敏可能性^[101]。刘悦等^[102]发现研磨处理改变了大豆分离蛋白的三级结构,使处于折叠状态的大豆分离蛋白发生了去折叠,刘巧珍^[103]发现随着研磨时间的增加,豌豆分离蛋白蛋白质的结构严重破坏,但是很少有关于玉米研磨处理大报道。与传统加工技术相比,研磨被认为是一种高效和环保的技术,但是研磨对蛋白的影响研究较少,尤其是对蛋白结构的影响,而蛋白的结构可以直接影响致敏蛋白的免疫反应性,所以在今后的研究中可以进行探索,为低致敏性食品的开发和研制提供更多选择。

3 食品基质对过敏原的影响

致敏食物中通常脂质的含量比较高,许多过敏原可以和脂质结合来改变其免疫特性,而且还会改变蛋白质的消化率以及在胃肠道的吸收特性,从而改变过敏原的

生物利用性,但杨慧等^[104]发现,LTP 具有一个灵活的隧道状亲脂腔,能够结合磷脂、不同饱和脂肪酸等多种脂质,如桃子中的 LTP 过敏原 Pru p 3,与脂质结合后可通过脂质筏和质膜微囊内吞途径作用于 Caco-2 细胞,导致 Th2 相关细胞因子的表达量升高。天然糖在抑制过敏症状中起到积极的作用,主要是其可以减少过敏原特异性 IgE 抗体的产生或一些与免疫有关的细胞因子的表达,张驰^[105]发现植物多酚降低花生蛋白致敏性的机制可能是植物多酚对过敏反应的干扰作用或者是与花生致敏蛋白形成复合物,掩蔽或改变致敏蛋白结构,间接调节过敏反应,其抑制过敏的效果主要是受其结构的影响以及与致敏蛋白的相互作用特性。除此之外,致敏性的个体差异可以极大地影响过敏原的致敏性,因为患者的多因素性所以很难进行临床试验^[106]。

4 结束语

目前对于过敏原的研究主要集中在大豆和小麦中,很少有关于玉米过敏原的介绍,本文阐述了玉米中的主要过敏原,包括:脂质转移蛋白、几丁质酶、玉米硫氧还蛋白以及玉米醇溶蛋白中包含的过敏原,其中非特异性脂质转移蛋白为主要过敏原(9 kDa),胰蛋白酶抑制剂(16 kDa)与玉米硫氧还蛋白(12 kDa)为次要过敏原,它们都可以导致大部分人群出现过敏反应。本文总结了加工方式对致敏蛋白的影响,发现不同加工方式通过改变过敏原蛋白的构象从而改变其免疫反应性,这包括既可能使抗原结合表位增加使致敏性增强,又可能使线性表位被遮蔽或者破坏使致敏性降低,其中多种方法的联合使用效果更加显著且对产品质量损伤较小。通过本文对玉米中过敏原的集中介绍,为以后开发低致敏性的玉米产品提供了依据,为易过敏人群提供更多的食物选择。

参考文献

- 高君慧,王学迁,郭增志,等.不同用途的玉米品种介绍[J].现代农村科技,2020,(11):1.
GAO JH, WANG XQ, GUO ZZ, *et al.* Introduction to corn varieties for different uses [J]. Mod Rural Sci Technol, 2020, (11): 1.
- 安林,程乙,罗上轲,等.鲜食糯玉米营养品质及其影响因素研究进展[J].山地农业生物学,2023,5:7.
AN L, CHENG Y, LUO SK, *et al.* Research progress on nutritional quality of fresh waxy corn and its influencing factors [J]. J Mount Agric Biol, 2023, 5: 7.
- 吴卓泉,宋春丽,董强,等.三种改性方式对全谷物玉米粉营养成分及加工特性的影响研究[J].食品与发酵工业,2023. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036988
WU ZH, SONG CL, DONG Q, *et al.* Research on the effects of three modification methods on the nutritional composition and processing characteristics of whole grain corn flour [J]. Food Ferment Ind, 2023. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036988
- 孙佳晨,张巧智,李华韬,等.食物过敏的膳食危险因素及其调控作用机制研究进展[J/OL].食品科学:1-20.[2023-08-30].<https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=>
SUN JC, ZHANG QZ, LI HT, *et al.* Research progress on dietary risk factors and regulatory mechanisms of food allergy [J]. Food Sci: 1-20. [2023-08-30]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=>
- 李英英.超高压联合热加工对大豆球蛋白抗原性的影响及 A2 破坏表位的定位[D].郑州:河南工业大学,2023.
LI YY. Effect of ultrahigh pressure combined with thermal processing on the antigenicity of soybean globulin and the positioning of A2 destruction epitope [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- BLANK S, HILGER C. Novel advances in allergy diagnosis and treatment [J]. Front Immunol, 2021, 12: 662699.
- 赵慧娟.腰果过敏蛋白组分分析及过敏性消减研究[D].天津:天津农学院,2021.
ZHAO HJ. Analysis of cashew nut allergenic protein components and research on allergy reduction [D]. Tianjin: Tianjin Agricultural College, 2021.
- 郑文雅.肥大细胞 FcεRI-α 受体特异性噬菌体多肽的筛选及其抑制过敏反应的研究[D].广州:南方医科大学,2023.
ZHENG WY. Screening of mast cell FcεRI-α receptor-specific phage peptides and research on inhibiting allergic reactions [D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2023.
- 易文强,蒙太和,曹佳兴,等.小麦过敏原抗原抑制技术研究进展[J].粮食加工,2023,48(4):1-7.
YI WQ, MENG TH, CAO JX, *et al.* Research progress on wheat allergen antigen inhibition technology [J]. Grain Process, 2023, 48(4): 1-7.
- 王垚,张巧智,王彦波,等.小麦非麸质致敏原 α-淀粉酶抑制剂的表位定位及消减技术[J].食品科学,2023,44(22):200-210.
WANG Y, ZHANG QZ, WANG YB, *et al.* Epitope mapping and subtraction technology of wheat non-gluten allergen α-amylase inhibitors [J]. Food Sci, 2023, 44(22): 200-210.
- DAVID TJ. Anaphylactic shock during elimination diets for severe atopic eczema [J]. Arch Dis Childhood, 1984, 59(10): 983.
- SCIBILIA J, PASTORELLO EA, ZISA G, *et al.* Maize food allergy: A double-blind placebo-controlled study [J]. Clin Exp Allergy, 2010, 38(12): 1943-1949.
- FISHER AA. Contact urticaria and anaphylactoid reaction due to corn starch surgical glove powder [J]. Contact Dermat, 2010, 16(4): 224-225.
- PASINI, SIMONATO, CURIONI, *et al.* IgE-mediated allergy to corn: A 50 kDa protein, belonging to the reduced soluble proteins, is a major allergen [Z]. 2002.
- JONES SM, MAGNOLFI CF, COOKE SK, *et al.* Immunologic cross-reactivity among cereal grains and grasses in children with food hypersensitivity [J]. J Allergy Clin Immun, 1995, 96(3): 341-351.
- WEICHEL M, VERGOOSSEN NJ, BONOMI S, *et al.* Screening the allergenic repertoires of wheat and maize with sera from double-blind, placebo-controlled food challenge positive patients [Z]. 2005.

- [17] 惠天然, 施一凡, 唐婷, 等. 大豆过敏原蛋白及致敏性消减技术的研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(10): 357–364.
HUI TR, SHI YF, TANG T, *et al.* Research progress on soy allergen protein and allergenicity reduction technology [J]. Mod Food Sci Technol, 2023, 39(10): 357–364.
- [18] 杨平. 花生蛋白 Ara h2 的致敏性研究及低敏性产品研发[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
YANG P. Research on allergenicity of peanut protein Ara h2 and development of hypoallergenic products [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [19] 汤鑫磊. 不同烹饪方式对鸡蛋蛋白质致敏性的影响及机制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
TANG XL. Research on the effects and mechanisms of different cooking methods on egg protein allergenicity [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [20] 宋天园, 王甜, 肖兰, 等. 植物蛋白过敏原的研究进展[J]. 饲料博览, 2022, (5): 29–37, 46.
SONG TY, WANG T, XIAO L, *et al.* Research progress on plant protein allergens [J]. Feed Expo, 2022, (5): 29–37, 46.
- [21] PASTORELLO EA, FARIOLI L, PRAVETTONI V, *et al.* The maize major allergen, which is responsible for food-induced allergic reactions, is a lipid transfer protein [J]. J Allergy Clin Immunol, 2000, 106(4): 744–751.
- [22] HILL RC, WANG X, SCHAFER BW, *et al.* Measurement of lipid transfer proteins in genetically engineered maize using liquid chromatography with tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) [J]. Gm Crops Food, 2017, 8(4): 239–252.
- [23] VENTER C, SKYPALA I, DEAN T. Maize allergy: What we have learned so far [J]. Clin Exp Allergy, 2008, 38(12): 1844–1846.
- [24] WEICHEL M, GLASER AG, BALLMER-WEBER BK, *et al.* Wheat and maize thioredoxins: A novel cross-reactive cereal allergen family related to baker's asthma [J]. J Allergy Clin Immunol, 2006, 117(3): 676–681.
- [25] COSTA J, VILLA C, VERHOECKX K, *et al.* Are physicochemical properties shaping the allergenic potency of animal allergens? [J]. Clin Rev Allerg Immun, 2022, 62(1): 1–36.
- [26] KUPPANNAN K, ALBERS DR, SCHAFER BW, *et al.* Quantification and characterization of maize lipid transfer protein, A food allergen, by liquid chromatography with ultraviolet and mass spectrometric detection [J]. Anal Chem, 2011, 83(2): 516.
- [27] PASTORELLO EA. Lipid-transfer protein is the major maize allergen maintaining IgE-binding activity after cooking at 100°C, as demonstrated in anaphylactic patients and patients with positive double-blind, placebo-controlled food challenge results [J]. J Allergy Clin Immunol, 2003, 112(4): 775–783.
- [28] FASOLI E, PASTORELLO EA, FARIOLI L, *et al.* Searching for allergens in maize kernels via proteomic tools [J]. J Proteom, 2009, 72(3): 501–510.
- [29] ARIYARATHNA H, PRAMOD SN, GOODMAN RE. The abundance of lipid transfer protein (LTP), the major food allergen of corn, varies between hybrids and growth conditions [J]. J Allergy Clin Immunol, 2009, 123(2): S28.
- [30] 李丽芳, 黄文胜, 张九凯, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法检测大豆主要过敏原蛋白[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 9.
LI LF, HUANG WS, ZHANG JK, *et al.* Detection of major soy allergen proteins by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Sci, 2020, 41(24): 9.
- [31] HOFLEHNER E, BINDER M, HEMMER W, *et al.* Thioredoxin from the Indianmeal Moth *Plodia interpunctella*: Cloning and test of the allergenic potential in mice [J]. PLoS One, 2012, 7(7): e42026.
- [32] ITO W, KOBAYASHI N, TAKEDA M, *et al.* Thioredoxin in allergic inflammation [J]. Int Arch Allergy Immunol, 2011, 155(S1): 142–146.
- [33] BUCHANAN BB, FRICK OL. Thioredoxin and food allergy [J]. J Allergy Clin Immunol, 2007, 119(2): 513–514.
- [34] URISU A, YAMADA K, MASUDA S, *et al.* 16-kilodalton rice protein is one of the major allergens in rice grain extract and responsible for cross-allergenicity between cereal grains in the Poaceae family [J]. Int Arch Allergy Immunol, 1991, 96(3): 244–252.
- [35] VOLPICELLA M, LEONI C, FANIZZA I, *et al.* Overview of plant chitinases identified as food allergens [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(33): 8541–8541.
- [36] LEONI C, VOLPICELLA M, DILEO MCG, *et al.* Chitinases as food allergens [J]. Molecules, 2019, 24(11): 2087.
- [37] 周梓楠, 孙思凡, 杨颖慧, 等. 甘薯几丁质酶基因 IbChi 的克隆及其耐盐性分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(9): 2812–2820.
ZHOU HN, SUN SF, YANG YH, *et al.* Cloning of sweet potato chitinase gene IbChi and analysis of its salt tolerance [J]. Mol Plant Breed, 2022, 20(9): 2812–2820.
- [38] VOLPICELLA M, LEONI C, FANIZZA I, *et al.* Characterization of maize chitinase-A, a tough allergenic molecule [J]. Allergy, 2017, 72(9): 1423–1429.
- [39] PASINI G, SIMONATO B, CURIONI A, *et al.* IgE-mediated allergy to corn: A 50 kDa protein, belonging to the reduced soluble proteins, is a major allergen [J]. Allergy, 2002, 57(2): 98–106.
- [40] LEE SH, BENMOUSSA M, SATHE SK, *et al.* A 50 kDa maize γ -zein has marked cross-reactivity with the almond major protein [J]. J Agric Food Chem, 2005, 53(20): 7965–7970.
- [41] LEE SH, HAMAKER BR. Cys155 of 27 kDa maize gamma-zein is a key amino acid to improve its *in vitro* digestibility [J]. Febs Letters, 2006, 580(25): 5803–5806.
- [42] KRISHNAN HB, KERLEY MS, ALLEE GL, *et al.* Maize 27 kDa γ -zein is a potential allergen for early weaned pigs [J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(12): 7323–7328.
- [43] KRISHNAN HB, CHEN MH. Identification of an abundant 56 kDa protein implicated in food allergy as granule-bound starch synthase [J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(22): 5404–5409.
- [44] JUN C, AWAIS KM, WEN MQ, *et al.* Diversification of genes encoding granule-bound starch synthase in monocots and dicots is marked by multiple genome-wide duplication events [J]. PLoS One, 2012, 7(1): e30088.
- [45] DIAN W, JIANG H, CHEN Q, *et al.* Cloning and characterization of the

- granule-bound starch synthase II gene in rice: Gene expression is regulated by the nitrogen level, sugar and circadian rhythm [J]. *Planta*, 2003, 218(2): 261–268.
- [46] THIERRY O, JENNIFER B. Cornstarch is less allergenic than corn flour in dogs and cats previously sensitized to corn [J]. *Bmc Vet Res*, 2018, 14(1): 207.
- [47] PASTORELLO EA, FARIOLI L, PRAVETTONI V, *et al.* Maize food allergy: Lipid-transfer proteins, endochitinases, and alpha-zein precursor are relevant maize allergens in double blind placebo-controlled maize-challenge-positive patients [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2009, 395(1): 93–102.
- [48] SHEWRY, PR. Seed storage proteins: structures and biosynthesis [J]. *Plant Cell*, 1995, 7(7): 945–956.
- [49] 姜松松, 赵博, 毕源, 等. 核桃过敏原分子特征与检测方法研究进展[J]. *农业生物技术学报*, 2016, 24(12): 10.
- JIANG SS, ZHAO B, BI Y, *et al.* Research progress on molecular characteristics and detection methods of walnut allergens [J]. *J Agric Biotechnol*, 2016, 24(12): 10.
- [50] ZHANG Y, CHE H, LYU SC, *et al.* Identification of almond (*Prunus dulcis*) vicilin as a food allergen [J]. *J Allergy Clin Immunol*, 2020, 143(2): AB69.
- [51] LI LC, BEDINGER PA, VOLK C, *et al.* Purification and characterization of four β -expansins (*Zea m 1* isoforms) from maize pollen [J]. *Plant Physiol*, 2003, 132(4): 2073–2085.
- [52] PETERSEN A, DRESSELHAUS T, GROBE K, *et al.* Proteome analysis of maize pollen for allergy-relevant components [J]. *Proteomics*, 2006, 6(23): 6317–6325.
- [53] 赵梓颐, 徐永, 董佳敏, 等. 寒地冬小麦 TaEXPA7 同源基因的遗传转化及其功能分析[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(4): 401–407.
- ZHAO ZY, XU Y, DONG JM, *et al.* Genetic transformation and functional analysis of TaEXPA7 homologous gene of winter wheat in cold regions [J]. *J Wheat Crops*, 2020, 40(4): 401–407.
- [54] VALENTA R, DUCHENE M, PETTENBURGER K, *et al.* Identification of profilin as a novel pollen allergen; IgE autoreactivity insensitize individuals [J]. *Science*, 1991, 253(5019): 557–560.
- [55] BREITENEDER H, EBNER C. Atopic allergens of plant foods [J]. *Curr Opin Allergy Cl*, 2001, 1(3): 261–267.
- [56] GADERMAIER G, HAUSER M, FERREIRA F. Allergens of weed pollen: An overview on recombinant and natural molecules [J]. *Methods*, 2014, 66(1): 55–66.
- [57] 何颖. 枣多聚半乳糖醛酸酶基因家族分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- HE Y. Analysis of jujube polygalacturonase gene family [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [58] PETERSEN A, DRESSELHAUS T, GROBE K, *et al.* Proteome analysis of maize pollen for allergy-relevant components [J]. *Proteomics*, 2006, 6(23): 6317–6325.
- [59] HOWLETT BJ, VITHANAGE H, KNOX RB. Immunofluorescent localization of two water-soluble glycoproteins including the major allergen from the pollen of ryegrass, *Lolium perenne* [J]. *Histochem J*, 1981, 13(3): 461–480.
- [60] HEISS S, FLICKER S, HAMILTON DA, *et al.* Expression of Z m13, a pollen specific maize protein, in *Escherichia coli* reveals IgE-binding capacity and allergenic potential [J]. *FEBS Lett*, 1996, 381(3): 217–221.
- [61] 陈款, 王涛, 李倩, 等. 花生致敏性评估方法及食品加工对其致敏性影响的研究进展[J]. *食品与机械*, 2023, 39(8): 199–207.
- CHEN K, WANG T, LI Q, *et al.* Research progress on peanut allergy assessment methods and the impact of food processing on allergenicity [J]. *Food Mach*, 2023, 39(8): 199–207.
- [62] 张九凯, 于悦, 于宁, 等. 芝麻过敏原及其致敏性消减技术研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(4): 5–15.
- ZHANG JK, YU Y, YU N, *et al.* Research progress on sesame allergens and their allergenicity reduction technology [J]. *J Food Sci Technol*, 2022, 40(4): 5–15.
- [63] 王轩, 张艾蕾. 食品过敏的原因, 影响和预防策略分析研究[J]. *现代食品*, 2023, 29(14): 112–115.
- WANG X, ZHANG AIL. Analysis and research on the causes, effects and prevention strategies of food allergy [J]. *Mod Food*, 2023, 29(14): 112–115.
- [64] 肖娜, 龙伟, 刘育颖, 等. 不同食品加工方式对食物过敏原蛋白的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(10): 128–134.
- XIAO N, LONG W, LIU YY, *et al.* Effects of different food processing methods on food allergen proteins [J]. *Food Sci Technol*, 2022, 47(10): 128–134.
- [65] KHAN MU, LIN H, AHMED I, *et al.* Whey allergens: Influence of nonthermal processing treatments and their detection methods [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2021, 20(5): 4480–4510.
- [66] 夏秀华. 食品加工技术对于食品过敏原的影响[J]. *粮食与食品工业*, 2012, 19(5): 4.
- XIA XH. Impact of food processing technology on food allergens [J]. *Grain Food Ind*, 2012, 19(5): 4.
- [67] 徐静, 李一尘, 徐君怡, 等. 食品加工对过敏原活性的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2012, 3(4): 259–263.
- XU J, LI YC, XU JY, *et al.* Effect of food processing on allergen activity [J]. *J Food Saf Qual*, 2012, 3(4): 259–263.
- [68] 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 ZM, MENG LJ, AI ZL, *et al.* Research progress on the impact of processing on the sensitization of food allergenic proteins [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(11): 208–212.
- [69] LESZCZYNSKA J, AGATA ŁACKA, SZEMRAJ J, *et al.* The effect of microwave treatment on the immunoreactivity of gliadin and wheat flour [J]. *Eur Food Res Technol*, 2003, 217: 387–391.
- [70] CABANILLAS B, CUADRADO C, RODRIGUEZ J, *et al.* Boiling and pressure cooking impact on IgE reactivity of soybean allergens [J]. *Int Arch Allergy Imm*, 2018, 175(1–2): 36–43.
- [71] SATHE SK, SHARMA GM. Effects of food processing on food allergens [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2009, 53(8): 970–978.

- [72] SONG SJ, BO Z, SHIWEN H, *et al.* Effect of different thermal processing treatments on allergenicity of walnut proteins [J]. *Food Sci*, 2018, 39(13): 94–99.
- [73] 王超跃, 王永辉, 杨晓泉, 等. 喷射蒸煮技术在制备易消化玉米浓缩蛋白中的应用[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 301–308.
WANG CY, WANG YH, YANG XQ, *et al.* Application of jet cooking technology in the preparation of digestible corn protein concentrate [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, 32(3): 301–308.
- [74] 陈鹏. 超高压技术在蛋白质食品加工中的应用[J]. *粮食流通技术*, 2021, (14): 27.
CHEN P. Application of ultra-high pressure technology in protein food processing [J]. *Grain Circul Technol*, 2021, (14): 27.
- [75] HUANG HW, HSU CP, YANG BB, *et al.* Potential utility of high-pressure processing to address the risk of food allergen concerns [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2013, 13(1): 78–90.
- [76] ZHOU H, WANG C, YE J, *et al.* Effects of high hydrostatic pressure treatment on structural, allergenicity, and functional properties of proteins from ginkgo seeds [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2016, 34: 187–195.
- [77] 王一超, 席俊, 陈慧彬, 等. 大豆球蛋白 G5A3 亚基加工破坏表位的初步定位[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(10): 92–98.
WANG YC, XI J, CHEN HB, *et al.* Preliminary positioning of the processing-damaged epitope of soybean globulin G5A3 subunit [J]. *J Chin Cereal Oil Ass*, 2022, 37(10): 92–98.
- [78] 朱乾乾. 超高压和酶法处理对苦杏仁蛋白结构和免疫反应性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
ZHU QQ. Effects of ultrahigh pressure and enzymatic treatment on the structure and immunoreactivity of almond protein [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [79] 桂世敏. 超高压处理对玉米黄粉蛋白质加工特性的影响及其在冲调粉中的应用[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
GUI SM. Effect of ultra-high pressure treatment on the processing characteristics of corn starch flour protein and its application in reconstituted flour [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [80] 王进, 张丽丽, 王雨欣, 等. 水果过敏原及其致敏性消减技术研究进展[J]. *北京工商大学学报(自然科学版)*, 2022, (4): 40.
WANG J, ZHANG LL, WANG YX, *et al.* Research progress on fruit allergens and their allergenicity reduction technology [J]. *J Beijing Technol Business Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, (4): 40.
- [81] SOLIMAN EA, FURUTA M. Influence of γ -irradiation on mechanical and water barrier properties of corn protein-based films[J]. *Radiat Phys Chem*, 2009, 78(7–8): 651–654.
- [82] 罗春萍, 冯娟, 项纛, 等. 辐照技术消减食物过敏原致敏性研究进展[J]. *核农学报*, 2020, (6): 9.
LUO CQ, FENG J, XIANG Y, *et al.* Research progress in reducing food allergen sensitization by irradiation technology [J]. *J Nucl Agric*, 2020, (6): 9.
- [83] 孙先保, 何述栋. 芸豆凝集素蛋白过敏原的检测及其脱敏食品加工工艺的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(12): 3746–3753.
SUN XB, HE SD. Research progress on detection of kidney bean lectin protein allergens and desensitizing food processing technology [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(12): 3746–3753.
- [84] 康石花. 超声波处理对鹰嘴豆蛋白化学结构及功能特性的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2023.
KANG SH. Effect of ultrasonic treatment on the chemical structure and functional properties of chickpea protein [D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.
- [85] 焦文成, 陈磊, 宋永程, 等. 超声波对果蔬汁品质的影响研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(8): 10.
JIAO WC, CHEN L, SONG YC, *et al.* Research progress on the impact of ultrasonic waves on the quality of fruit and vegetable juices [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2022, 43(8): 10.
- [86] EKEZIE DW. Effects of nonthermal food processing technologies on food allergens: A review of recent research advances [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, 74: 12–25.
- [87] 张志华, 郑环宇, 闫国森, 等. 致敏大豆蛋白 P34 及其清除方法的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, (5): 363–368.
ZHANG ZH, ZHENG HY, YAN GS, *et al.* Research progress on allergenic soy protein P34 and its removal methods [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2021, (5): 363–368.
- [88] 薛艾莲, 李春翼, 王启明, 等. 超声处理对麦醇溶蛋白/芦丁相互作用及结构特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(7): 45–51.
XUE AIL, LI CY, WANG QM, *et al.* Effect of ultrasonic treatment on gliadin/rutin interaction and structural properties [J]. *Food Sci*, 2022, 43(7): 45–51.
- [89] 李婷婷, 田亚平, 周楠迪, 等. 超声振荡改性玉米醇溶蛋白及高 F 值寡肽制备[J]. *食品与生物技术学报*, 2020, 39(11): 104–111.
LI TT, TIAN YP, ZHOU ND, *et al.* Preparation of ultrasonic oscillation-modified zein and high F-value oligopeptides [J]. *J Food Biotechnol*, 2020, 39(11): 104–111.
- [90] 李春强, 刘俊, 赵虹霏, 等. 加热-超声-pH 偏移联合改性大豆球蛋白纳米颗粒的制备及稳定性研究[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(10): 178–194.
LI CQ, LIU J, ZHAO HF, *et al.* Preparation and stability study of combined heating-ultrasound-pH shift modified glycinin nanoparticles [J]. *J Chin Food Sci*, 2023, 23(10): 178–194.
- [91] 郭浩, 张慧君, 陈又铭, 等. 超声辅助糖基化改性玉米醇溶蛋白结构和机械性能的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(4): 7–12, 44.
GUO H, ZHANG HJ, CHEN YM, *et al.* Effect of ultrasound-assisted glycosylation on the structure and mechanical properties of modified zein [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(4): 7–12, 44.
- [92] 肖敏, 丁燕, 魏彦梅, 等. 不同食品加工方式对食物过敏原蛋白的影响探讨[J]. *现代盐化工*, 2023, 50(1): 30–32.
XIAO M, DING Y, WEI YM, *et al.* Discussion on the effects of different food processing methods on food allergen proteins [J]. *Mod Salt Chem Ind*, 2023, 50(1): 30–32.
- [93] 余宣明. 发酵过程中苦荞蛋白过敏原的变化规律及机制研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023.
SHE XM. Research on the change patterns and mechanisms of tartary buckwheat protein allergens during fermentation [D]. Shanghai: Shanghai

- University of Technology, 2023.
- [94] 李玺, 田阳, 唐杰, 等. 酵母菌和植物乳杆菌发酵对小麦过敏原性的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(2): 6.
LI X, TIAN Y, TANG J, *et al.* Effects of yeast and *Lactobacillus plantarum* fermentation on wheat allergenicity [J]. Food Ind Sci Technol, 2017, 38(2): 6.
- [95] 孙畅, 吕呈蔚, 李铁柱, 等. 低致敏蛋白 Ara h 1 复合益生菌发酵花生乳制备工艺优化[J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 180–185, 194.
SUN C, LU CW, LI TZ, *et al.* Optimization of the preparation process of hypoallergenic protein Ara h 1 compound probiotic fermented peanut milk [J]. Food Mach, 2023, 39(6): 180–185, 194.
- [96] 马小梅, 彭乔峰, 魏嘉. 大豆致敏蛋白脱敏方法研究进展[J]. 农业科技与信息, 2020, (19): 64–68.
MA XM, PENG QF, WEI J. Research progress on soybean allergen protein desensitization methods [J]. Agric Sci Technol Inf, 2020, (19): 64–68.
- [97] 孙华欣, 宋春丽, 韩赫, 等. 菌酶协同发酵对玉米蛋白粉消化率的影响研究[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-9. [2024-02-05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035441>
SUN HX, SONG CL, HAN H, *et al.* Research on the effect of bacterial enzyme collaborative fermentation on the digestibility of corn gluten meal [J/OL]. Food Ferment Ind, 1-9. [2024-02-05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035441>
- [98] 黄智本, 唐婷, 顾萱, 等. 体外消化模型评估食物过敏原致敏性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(16): 213–219.
HUANG ZB, TANG T, GU X, *et al.* Research progress in evaluating food allergen sensitization using *in vitro* digestion models [J]. Food Res Dev, 2023, 44(16): 213–219.
- [99] 刘巧珍, 代养勇, 侯汉学, 等. 研磨对豌豆分离蛋白应用特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(5): 9–14.
LIU QZ, DAI YY, HOU HX, *et al.* Effect of grinding on the application characteristics of pea protein isolate [J]. Food Res Dev, 2021, 42(5): 9–14.
- [100] HOURIHANE JOB, KILBURN SA, NORDLEE JA, *et al.* An evaluation of the sensitivity of subjects with peanut allergy to very low doses of peanut protein: A randomized, double-blind, placebo-controlled food challenge study [J]. J Allergy Clin Immun, 1997, 100(5): 596.
- [101] NORGAARD A, SKOV PS, BINDSLEV-JENSEN C. Egg and milk allergy in adults: Comparison between fresh foods and commercial allergen extracts in skin prick test and histamine release from basophils [J]. Clin Exp Allergy, 2020, 22(10): 940–947.
- [102] 刘悦, 代养勇, 曹健, 等. 研磨对大豆分离蛋白的物理改性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 18–25.
LIU Y, DAI YY, CAO J, *et al.* Research on physical modification of soybean protein isolate by grinding [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2023, 44(4): 18–25.
- [103] 刘巧珍. 干法研磨对豌豆分离蛋白功能特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
LIU QZ. Effect of dry grinding on the functional properties of pea protein isolate [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [104] 杨慧, 曲也直, 高雅然, 等. 膳食脂质-过敏原互作的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 297–303.
YANG H, QU YZ, GAO YR, *et al.* Research progress on dietary lipid-allergen interactions [J]. Food Sci, 2021, 42(11): 297–303.
- [105] 张弛. 多酚与花生蛋白相互作用及其对花生蛋白致敏性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
ZHANG C. Interaction between polyphenols and peanut protein and its effect on peanut protein allergenicity [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [106] YANG H, QU Y, GAO Y, *et al.* Role of the dietary components in food allergy: A comprehensive review [J]. Food Chem, 2022, 386: 132762.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



罗倩, 硕士研究生, 主要研究方向为粮食深加工。

E-mail: LuoQian57a@163.com



郑明珠, 博士, 教授, 主要研究方向为粮食深加工。

E-mail: zhengmzhu@163.com