

庞锋, 高杨超, 李育川, 等. 高蛋白烘焙产品中蛋白原料及其应用挑战的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 411-421. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060364

PANG Feng, GAO Yangchao, LI Yuchuan, et al. Research Progress on Protein Ingredients and Their Application Challenges in High-protein Baked Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 411-421. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060364

· 专题综述 ·

高蛋白烘焙产品中蛋白原料及其应用挑战的研究进展

庞 锋, 高杨超, 李育川, 李艳琼, 于淑惠, 王海英, 张瑜瑜, 刘 贺*

(昆明学院, 农学与生命科学学院, 云南特色资源植物智慧农业工程研究中心, 云南昆明 650214)

摘 要: 随着人们消费水平的提高以及对健康营养的追求, 高蛋白烘焙产品越来越受到消费者的青睐, 本文针对目前常用于以及试图用于高蛋白烘焙产品中的高蛋白原料特性及应用现状进行综述, 并对目前高蛋白原料在应用过程中面临的挑战与解决方案进行归纳总结, 据此指出高蛋白烘焙产品研究可能的发展方向, 以期新型高蛋白烘焙产品的开发及产业化提供参考及新思路。

关键词: 高蛋白, 烘焙, 蛋白原料, 应用挑战

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)11-0411-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060364



本文网刊:

Research Progress on Protein Ingredients and Their Application Challenges in High-protein Baked Products

PANG Feng, GAO Yangchao, LI Yuchuan, LI Yanqiong, YU Shuhui, WANG Haiying, ZHANG Yuyu, LIU He*

(Yunnan Characteristic Resource Plant Intelligent Agriculture Engineering Research Center, College of Agriculture and Life Science, Kunming University, Kunming 650214, China)

Abstract: With the improvement of people's consumption level and the pursuit of health and nutrition, high protein bakery products are increasingly favored by consumers. This article provides a comprehensive review of the characteristics and current application status of high-protein ingredients that are commonly used and being explored for use in high-protein baked products. It also summarizes the challenges faced during the application process of these high-protein ingredients and the corresponding solutions. Accordingly, the possible development directions of high protein baking products are pointed out, with a view to providing references and new ideas for the development and industrialization of new high-protein bakery products.

Key words: high protein; bakery; protein ingredients; application challenges

在世界范围内, 面包、蛋糕、饼干等烘焙产品被不同年龄、不同阶层的人群广泛消费, 它们是能量及碳水化合物等的重要来源^[1]。根据 Expert Market Research 的数据, 2020 年, 全球烘焙产品市场规模约为 5073.8 亿美元, 从 2021 年到 2026 年, 烘焙食品

市场预计将以 2.5% 的复合年增长率增长, 达到近 5740.5 亿美元, 中国占全球烘焙市场份额的 7%, 仅次于美国, 位居第二^[2]。大多数烘焙产品主要原料是精制小麦粉, 碳水化合物含量丰富, 随着消费者健康意识的提升, 市场更倾向于选择含有“动力成分

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: 国家自然科学基金 (32001684); 云南省科技厅面上项目 (202201AT070020); 云南省地方本科高校基础研究联合专项 (202101BA070001-168); 云南省科技厅基础研究计划项目 (202401AT070030)。

作者简介: 庞峰 (2003-), 男, 本科, 研究方向: 植物蛋白加工与利用, E-mail: 314496981@qq.com。

* 通信作者: 刘贺 (1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 植物蛋白加工与利用, E-mail: britney198601@163.com。

(power ingredients)”的产品,这些动力成分如蛋白质、膳食纤维等,可提升产品的营养价值,从而使得产品更加健康^[2]。根据目前已发表的论文或公开的专利可知,在上世纪90年代,我国科研人员及企业研发人员已开始关注高蛋白烘焙产品的开发,但由于技术及经济方面局限,并未形成较为成熟的体系。随着消费者对健康饮食的日益重视,高蛋白烘焙产品为减脂、健身等人群提供了更多选择,而研究人员也需要不断探索新的高蛋白原料、优化配方和加工工艺以确保产品既具有较高营养价值又具备良好的口感和风味。因此,本综述对高蛋白烘焙产品加工原料、技术创新等方面进行分析,并总结目前高蛋白原料在烘焙产品加工过程中面临的挑战,以期为新型高蛋白烘焙产品的开发及技术创新提供参考。

1 食物中蛋白质的来源及在烘焙产品中的应用

为获取高蛋白含量的产品,多数研究成果主要着眼于直接使用高蛋白含量的原料,这些原料包括植物性原料(如大豆、藜麦等)、动物性原料(如鱼、昆虫等)及功能性蛋白原料(如螺旋藻等);或添加分离纯化出的蛋白粉,如植物蛋白粉(如大豆分离蛋白等)及动物蛋白粉(如酪蛋白、乳清蛋白、蚯蚓蛋白粉等)。尽管蛋白质来源较为丰富,且均可用于烘焙产品加工,然而一项针对欧盟国家1825名65岁以上老年消费者对食物中主要蛋白质来源接受程度的调查表明^[3],乳品蛋白是最受欢迎的蛋白质来源(75%受访者认为可以接受或非常可以接受),植物性蛋白质则为最可接受的替代及可持续蛋白质来源(58%);昆虫蛋白(9%)和体外肉类蛋白(6%)的偏好度均较低。

1.1 动物蛋白

动物蛋白被广泛认为比植物蛋白具有更高的营养价值,这主要归功于动物蛋白的氨基酸组成、消化率以及运输钙和铁等其他重要营养物质的能力^[4]。此外,动物蛋白的凝胶、乳化和发泡等加工特性也被认为优于植物蛋白,这些特性赋予食物具有吸引力的质构和感官属性^[5]。人类食物中的动物蛋白主要来自乳制品、肉类、海鲜和蛋类等,近年来,昆虫蛋白也引起了人们更广泛的兴趣。

1.1.1 乳品蛋白 乳品中蛋白质含量一般为3%~7%,乳蛋白主要分为两类:酪蛋白和乳清蛋白,一般比例约为80%:20%^[6]。酪蛋白为乳品所特有,它是一种慢蛋白,与乳清蛋白相比,其消化吸收需要更长的时间^[7],其独特营养和功能特性植物蛋白难以替代^[8]。乳清蛋白具有易消化吸收、氨基酸含量丰富等特点,常作为蛋白营养强化剂应用在烘焙制品中,此外,还具有良好的溶解性、发泡性、酸稳定性及凝胶形成能力等功能特性,因此也常用于改善烘焙产品品质^[7]。随着加工技术的进步,酪蛋白和乳清蛋白等可通过各种技术如分离、等电点沉淀、凝乳酶凝聚和膜过滤等提取出来并作为高蛋白成分应用于商业生产中。

常添加在烘焙产品中的酪蛋白及乳清蛋白相关产品主要有:酪蛋白水解物(CH)、乳清蛋白浓缩物(WPC)、乳清分离蛋白(WPI)以及乳清蛋白水解物(WPH)等,尤其是乳清蛋白相关产品被广泛用于高蛋白烘焙产品的开发中^[9]。有研究表明,在高蛋白饼干加工中,由于WPI的高水合率,添加0%~15%(w/w)的WPI可显著降低饼干面团的粘弹性,从而影响饼干整体的质地及扩展率(spread ratio),然而将WPI添加量增加至20%(w/w)后,面团的粘弹性得到了改善,此时加工出的WPI-小麦饼干更软,显示出良好的整体可接受性^[7];而在高蛋白面包面团中,随着乳清蛋白浓度的增加,小麦粉面包中的蛋白质-淀粉复合物被破坏,面筋结构变弱^[8]。

1.1.2 肉类蛋白 肌肉(muscle meat)作为食物来源的作用已得到公认,不同物种的蛋白质含量相对一致,平均接近22%^[4]。高蛋白烘焙产品加工中,肉类通常以肉或肉粉的形式添加入产品中,以替代部分小麦粉。Cakmak等^[10]将鸡肉和鸡肉粉以不同添加量对普通及全麦面包进行蛋白质强化,结果表明,添加鸡肉或鸡肉粉后,普通面包蛋白质含量从7.6%分别提高到18.44%和18.70%,全麦面包蛋白质含量从8.85%分别提升至14.23%和18.70%;面包屑的总色差随鸡肉粉和鸡肉添加量的增加而增加($P<0.01$);对于普通小麦面包,鸡肉或鸡肉粉添加量对面包的硬度没有显著影响,而对于全麦面包,面包的硬度随着添加量增加而增加($P<0.01$)。温作金^[11]以兔肉肉松为高蛋白原料开发了兔肉松红薯夹馅饼,其中兔肉松含量可高达20%~30%,从而提升了产品的蛋白含量。

此外,胶原蛋白是一类只存在于动物界的丰富的蛋白质,在皮肤、骨骼、软骨、肌腱和血管中起结构和连接作用。当商品胶原蛋白被部分水解或加热变形后,就会形成明胶,有研究表明猪皮明胶及其水解物能强化冷冻面团加工面包的品质,面包体积增大,面包屑柔软均匀,且该作用与明胶水解度无关^[12]。

1.1.3 海鲜蛋白 海鲜是一种有价值的蛋白质来源,如食用鱼类肌肉中含有16%~21%的蛋白质。高蛋白海鲜产品开发方面,Baraiya等^[13]用金目大眼鲷和锯腹脂鲤分离蛋白对燕麦饼干进行营养补充,结果表明,与添加鱼蛋白分离物的饼干相比,对照组饼干的扩展率较低($P<0.05$),且随着饼干厚度的增加而降低;添加了6%锯腹脂鲤分离蛋白的饼干中必需氨基酸总值明显更高,而添加了4%金目大眼鲷分离蛋白的饼干中非必需氨基酸总值更高;此外,与添加鱼类分离蛋白的饼干相比,对照组饼干的硬度值最大,但差异不具显著性($P>0.05$)。Duy等^[14]考查了黄鳍金枪鱼分离蛋白对饼干理化性质和感官接受度的影响,结果表明,与对照饼干相比,添加1.6%~5.4%鱼分离蛋白的饼干水分含量和水分活度均显著降低($P<0.05$),然而硬度方面并没有显著差异;感官评定结果表明,添加2.7%的鱼分离蛋白对饼干的质量没有负

面影响。Oprea 等^[15]用鱼类蛋白酶解物与小麦粉混合制备高蛋白面包时发现, 尽管面团的质构特性较好, 但后味及明显的鱼腥味影响了消费者的接受度。

1.1.4 蛋类蛋白 蛋类蛋白质含量一般在 10% 以上, 蛋类的蛋白质氨基酸组成与人体需要最接近, 因此生物价也最高, 达 94%, 是其他食物蛋白质的 1.4 倍左右^[16]。常见的蛋类有鸡蛋、鸭蛋、鹅蛋、鹌鹑蛋、鸽蛋等, 其中产量最大、食品加工尤其是烘焙行业使用最广泛的是鸡蛋。全鸡蛋蛋白质的含量为 12% 左右, 由蛋白和蛋黄组成, 蛋清液中的蛋白质种类众多, 主要为卵白蛋白、卵转铁蛋白、卵类粘蛋白、卵粘蛋白、溶菌酶和球蛋白等^[17]。蛋黄液中蛋白质大部分以脂蛋白的形式存在, 经过离心, 蛋黄液可以简单的分为上清液和沉淀颗粒。其中, 上清液的主要成分为低密度脂蛋白和卵黄球蛋白, 沉淀颗粒的主要成分为高密度脂蛋白、卵黄高磷蛋白和少量的低密度脂蛋白^[18]。

巴氏灭菌的全蛋、分离的蛋白和蛋黄可加工成液体、冷冻或喷雾干燥粉末形式^[16], 被广泛用于烘焙食品加工中。蛋白和蛋黄在食品系统中有不同的作用^[19]: 蛋白作为一种出色的发泡剂被广泛应用于烘焙体系中^[20], 烘焙食品理想的结构、独特的纹理质量和巨大的产品体积都是基于其出色的发泡性能; 蛋黄因其特殊的风味而被广泛应用于一系列烘焙产品中, 尤其是在一些甜面包配方中, 此外, 由于蛋黄中蛋白质能够聚集, 因此在加热过程中形成凝胶, 从而可能对烘焙终产品(例如蛋糕)的质地特性产生影响^[21]。如 Nolasco 等^[22]考察了蛋白的粉状产品作为高蛋白产品补充剂加工成新鲜和冷冻煎饼(pancake)时对其质构的影响, 结果表明与不含蛋白质粉的产品相比, 含有鸡蛋蛋白的蛋白质粉的煎饼厚度较高, 这主要是蛋白的发泡性所致, 而硬度和胶黏性则较低。除了常规烘焙产品中会添加鸡蛋产品以利用其功能特性外, Tóth 等^[23]采用鸡蛋蛋白与布丁粉共同开发了一种高蛋白烘焙产品专用馅料, 他们发现鸡蛋蛋白添加浓度会显著影响馅料的流变特征。唐清法等^[24]在豆奶饼制备方法中采用鸡蛋等作为高蛋白原料的补充, 成品蛋白质含量可高达 22%。

1.1.5 昆虫蛋白 可食用昆虫在烘焙产品中的主要作用是增加产品中的蛋白质及膳食纤维含量^[25]。蛋白质是昆虫的主要成分, 集中在肌肉和覆盖表皮角质层中, 其含量根据物种、成熟阶段、昆虫饲料来源和加工方法的不同变化较大, 一般为 35.34%~61.32%^[26]。虽然昆虫消费在亚洲、大洋洲、非洲和拉丁美洲的一些文化中很常见, 但对大多数西方人来说并不熟悉。因此, 昆虫作为加工蛋白质配料的潜力较大。许多用于食品或饲料的昆虫蛋白质配料都是将整只昆虫烘干并研磨成粉末, 此外, 从昆虫粉末中分离出的蛋白在烘焙行业应用也较为广泛, 因为这种蛋白粉脂质含量低, 必需脂肪酸含量高, 可用于提升

烘焙产品营养品质。

烘焙产品加工中常用的可食用昆虫主要有蟋蟀、黄粉虫、白蚁、蚂蚱、蝗虫、蚕蛹、棕榈象鼻虫幼虫等, 通常以 5%~25% 的含量替代烘焙产品原料, 产品形式以饼干类居多, 此外还有面包、松饼等^[27]。Luna 等^[28]将约含 70% 粗蛋白的蟋蟀(*Acheta domesticus*)蛋白水解物应用于玉米圆饼及玉米饼片中, 所得产品含有所有必需氨基酸(将玉米种缺乏的赖氨酸含量提高至每日所需赖氨酸量的 40%), 而脂肪含量仅为 2.7%。Zielińska 等^[29]用不同蟋蟀(*Grylloides sigillatus*)和黄粉虫(*Tenebrio molitor*)含量的面粉进行松饼加工, 结果表明, 添加昆虫粉的松饼中蛋白质含量增加, 且总酚含量及抗氧化能力也相应增加, 消费者对添加昆虫粉的松饼接受程度均较高。邓伶俐等^[30]以黄粉虫粉代替部分面粉(黄粉虫粉代替 5%~15% 面粉), 开发了一种高蛋白降血糖饼干, 适于糖尿病患者食用。

1.2 植物蛋白

一般来说, 植物蛋白的营养价值较低, 原因包括氨基酸组成不均衡(如缺乏赖氨酸等一些必需氨基酸)、分子结构导致消化速度慢或消化率低等^[31]。不过, 它们仍能为人类提供良好的蛋白质来源, 有助于实现膳食平衡, 与动物蛋白产品相比, 植物蛋白产品具有不同的质地和风味特征^[4]。

1.2.1 谷物蛋白 来自谷物的商业化最多的蛋白质是小麦、大米和玉米蛋白, 谷物及其制成的食品的蛋白质含量在 7%~15% 之间, 按干物质计算通常低于动物蛋白食品。在所有植物来源中, 小麦在人类饮食中提供的蛋白质量最高(克/人/天), 在面包等烘焙产品中应用也最多^[4]。基于谷物蛋白在水、盐及醇溶液中的溶解度不同, 谷物蛋白质可分为白蛋白、球蛋白、麦谷蛋白和麦醇溶蛋白等^[32]。小麦蛋白富含含硫氨基酸, 但缺乏赖氨酸和苏氨酸, 面筋蛋白是小麦的贮藏蛋白, 富含谷氨酰胺(20%~35%)和脯氨酸(10%~15%), 但仅含有少量的赖氨酸、蛋氨酸和苏氨酸; 大米蛋白是必需氨基酸特别是赖氨酸的良好来源^[33]; 玉米醇溶蛋白富含谷氨酸(21%~26%)、亮氨酸(20%)、脯氨酸(10%)和丙氨酸(10%), 但缺乏色氨酸和赖氨酸^[34]。据报道, 小麦、大米和玉米中的谷物蛋白质具有与抗氧化、抗高血压、抗癌和抗肥胖等有益作用相关的特定生物活性肽^[35]。

用谷物生产的蛋白质配料也具有商业价值, 面筋蛋白(约 80% 的小麦蛋白质)是从小麦粉中提取的, 当其水合后加工特性保持不变, 被称为“活性小麦面筋(vital wheat gluten)”。面筋蛋白可聚集形成蛋白质网络, 因此在面包或蛋糕等烘焙产品的最终质地中发挥着主要作用, 面筋蛋白的功能性主要是由麦谷蛋白和麦醇溶蛋白赋予的, 且与麦谷蛋白和麦醇溶蛋白的比例有关, 麦谷蛋白赋予了面团弹性, 而麦醇溶蛋白则赋予了面团粘度和延展性。活性面筋对于

烘焙质量至关重要,将其添加到面团中可提高面团的吸水能力(water absorption capacity)、凝聚力(cohesiveness)、粘度(viscosity)和弹性(elasticity)等方面的烘焙质量^[36]。此外,面筋蛋白在发酵过程中对二氧化碳的截留和面包的质构起着重要作用。

燕麦、黑麦等杂粮也是烘焙产品中蛋白质的重要来源,燕麦粉蛋白质含量较高(高达 20%),氨基酸、膳食纤维和脂肪含量较为均衡,烘焙行业中燕麦主要用于加工蛋糕和饼干,在面包配方中,燕麦粉可部分替代 30% 的面粉,以增加蛋白质、纤维及抗氧化剂含量。黑麦(*Secale cereale* L.)是北欧和东欧生产面包的传统原料^[37],它是蛋白质(6%~15%)和纤维、多酚、矿物质和维生素等几种生物活性化合物的良好来源。用黑麦粉部分取代小麦粉加工面包可改善面团的粘度,还能提升面包体积和质地等特性^[38]。然而,若完全取代则不能形成类似于小麦蛋白质的连续网络和弹性面团,因为高的总戊聚糖含量会干扰面团网络的形成^[39]。因此,这些杂粮粉一般并不单独用于高蛋白烘焙产品的加工,而是与其他高蛋白成分如奶粉等混合来加工出新型高蛋白产品,如栗鹏等^[40]将燕麦粉与豆蛋白粉、奶粉、小麦粉混合完全后得到高蛋白粗粮面粉,再加入鸡蛋液和黑莓果汁混合液加工出高蛋白黑莓饼干。

1.2.2 大豆蛋白 根据沉淀系数,大豆蛋白可分为四大类,即 2S(Svedberg 单位, S)、7S、11S 和 15S 组分,其中最主要组分是 7S 大豆伴球蛋白(约 150~200 kDa)和 11S 大豆球蛋白(约 300~380 kDa),分别占大豆总蛋白的 35% 和 52%,其次是 2S(8%)和 15S(5%)。大豆蛋白的氨基酸组成较为平衡良好,含有所有必需氨基酸,且具有优异的功能特征,如凝胶化、乳化能力(在 pH6.5 和 pH8.2 下)以及保水和保油能力^[41]。然而,与鱼类蛋白相比,大豆蛋白的凝胶刚度和粘弹性较低^[42]。

大豆蛋白是接受程度最高的一种植物蛋白来源强化成分,且最有可能取代人类饮食中的肉类和乳制品蛋白^[4]。常用于烘焙及其他食品行业的大豆蛋白相关商业产品包括大豆粉、大豆浓缩蛋白、大豆分离蛋白以及组织化和水解大豆蛋白等,大豆浓缩蛋白中蛋白质含量>65%,而大豆分离蛋白是大豆蛋白的最精制形式,其蛋白质含量高于 90%,均广泛用于高蛋白烘焙产品加工中。有研究表明,在高蛋白面包加工时中添加 7%~22% 的大豆粉可增加面糊和面团的吸水性,若不添加额外的水来补偿增加的吸水率,制作出的面团或面糊可能会很干或很脆^[43]。烘焙产品中添加大豆蛋白还会干扰淀粉糊化,淀粉糊化是烘焙食品结构的关键因素,烘焙产品在冷却过程中出现塌陷被认为是淀粉糊化减少所致,而大豆蛋白添加量的增加会稀释淀粉,造成对水分的竞争^[44]。Zhang 等^[45]发现在小麦面团中添加组织化大豆蛋白可提高面团稳定性及面筋含量。

1.2.3 豌豆及其他豆类蛋白 豌豆是世界上第二重要的豆类作物,是人类食品中常用的蔬菜。豌豆的蛋白质含量通常约为 25%,但因基因型和生长条件不同而有很大差异,豌豆蛋白质分为球蛋白(70%~80%)和白蛋白(10%~20%),球蛋白可细分为 legumin(六聚体蛋白, 300~400 kDa, 11S)和 vicilin(三聚体蛋白, 150~170 kDa, 7S),还有少量的 convicilin(由三个 70 kDa 的亚基组成, 7S)^[46]。legumin 和 vicilin 的等电点(4.5)和变性温度(82.7~85.5 °C)非常相似^[47],而两者之间的比例对豌豆蛋白的功能性(如水结合能力、油结合能力、泡沫特性、凝胶和乳液稳定性)有着重大影响,这个比例取决于多种因素,如豌豆品种、产地、豌豆蛋白分离和生产方法等^[48]。豌豆蛋白具有与大豆蛋白相当的乳化和发泡特性,但凝胶形成能力较低,可通过酶处理加以改善^[49]。鹰嘴豆、扁豆等也是目前烘焙行业常用到的豆类原料,这些豆类的蛋白质含量与豌豆相似,约为 20%~36%;羽扇豆的蛋白质含量与大豆相似,约为 40%^[4]。尽管这些豆科植物的蛋白质含量相对较高,但其蛋白质质量(即氨基酸谱和消化率)却不如动物源蛋白质高。

豆科植物种子可加工成相应的豆粉、浓缩蛋白或分离蛋白(蛋白质含量高达 85%~95%^[4])等产品,这些产品也可用作烘焙混合料,以提高烘焙产品的蛋白质含量或开发新型风味烘焙产品。豌豆及其相关产品如豌豆蛋白粉等在高蛋白烘焙产品中应用较为广泛,Wójcik 等^[50]在低碳水化合物面包中添加 10% 的豌豆蛋白粉可加工出体积、质构和感官均评分较高的面包,其蛋白含量高达 17.1%。鹰嘴豆分离蛋白作为蛋白质补充剂目前也备受关注,但与鹰嘴豆粉相比,其应用目前仍处于起步阶段^[51]。Shaabani 等^[52]用鹰嘴豆分离蛋白(0%~7%)对无麸质松饼进行强化,随着鹰嘴豆分离蛋白浓度的增加,松饼的比容和孔隙率、硬度、布朗宁指数均降低,然而鹰嘴豆蛋白可在松饼加工中形成蛋白质网络,因此需要对配方进行更多的研究以进一步提高鹰嘴豆蛋白的使用量。

1.2.4 假谷物蛋白 假谷物(藜麦 quinoa、荞麦 buckwheat、籽粒苋 amaranth 等)是目前人类饮食的一种趋势,因为从营养角度来看,它们是无麸质谷物,氨基酸平衡良好,一般来说,假谷物的蛋白质含量略高于谷物类,但也因基因型和生长条件而异。此外,假谷物中一般都含有较多有一定功能性的生物活性化合物,因此,目前越来越多的被应用于烘焙产品中以满足消费者对功能性成分及无麸质产品的需求。

藜麦被称为“营养宝库”,其蛋白质含量为 15%~18%,且赖氨酸和甲硫氨酸等必需氨基酸含量较高,此外,藜麦还含有必需维生素如 B 族维生素、维生素 C、E,高质量脂质,钙、钾、亚铁等矿物质以及多酚、植物甾醇、藜芦醇等功能性化合物,因此常作为一种新的功能性食品成分被纳入许多烘焙食品中^[53]。藜麦中醇溶谷蛋白含量较低(0.5%~0.7%),而功能特

性(如持水性、溶解度、乳化性、凝胶性及发泡性等)较佳,常用于制备无麸质烘焙产品,如 Bozdogan 等^[54]研究发现用藜麦粉替代大米粉和马铃薯淀粉会导致蛋糕加工所用面糊的密度增加,且能显著改善蛋糕的理化特性和品质指标,用 50% 藜麦粉制作的蛋糕在味道和整体接受度方面得分最高。Xu 等^[55]将藜麦粉添加到小麦粉中制作营养强化小麦面包时发现,添加少量藜麦粉(5%)不会影响小麦面包的烘焙性能,但添加量较高(10%、15%)时,藜麦粉会改变面筋蛋白的二级结构,破坏面筋蛋白的网络结构,导致面包比体积减小,硬度增加,孔隙率变粗。

荞麦中蛋白含量一般为 6%~14%,荞麦蛋白主要由清蛋白(18.2%)、球蛋白(43.3%)、醇溶谷蛋白(0.8%)、谷蛋白(22.7%)组成^[56],氨基酸组成平衡,富含赖氨酸和精氨酸。此外,荞麦中还含有芦丁、槲皮素、 γ -氨基丁酸、2-羟基烟酰胺等功能性化合物,因此,荞麦粉也越来越多的作为蛋白质及功能性成分补充原料用于开发创新的烘焙产品,同样由于荞麦蛋白中醇溶谷蛋白及谷蛋白含量较低,无法形成面筋,其在面包等发酵烘焙产品中应用程度有限^[57]。Filipčev 等^[58]用荞麦粉进行姜坚果饼干加工,结果表明,荞麦粉添加量为 40% 时感官评分最高,而添加量到 50% 时,产品的蛋白质含量显著提高。

籽粒苋含有 13.1%~21.00% 的蛋白质,5.6%~10.9% 的粗脂肪,3.1%~5% 的膳食纤维,还是钙、镁、铜等矿物质的丰富来源,此外还含有许多功能性化合物,如植物甾醇、多酚和角鲨烯等^[59]。籽粒苋蛋白中赖氨酸含量丰富,且蛋白是高度易消化、水溶且易乳化的,因此在高蛋白烘焙产品配方开发中越来越受到重视^[60]。此外,由于籽粒苋蛋白不含面筋形成蛋白,因此可用于开发无麸质烘焙产品,如 Gebreil 等^[59]以不同添加量籽粒苋粉替代玉米粉来加工饼干、玉米粉圆饼等产品,结果表明籽粒苋粉的添加可显著提高产品的蛋白质含量。

1.3 微生物蛋白

微生物蛋白主要是单细胞蛋白(single-cell protein)。目前,全球对微生物蛋白替代品的需求也在扩大,主要是藻类和真菌等可再生和可持续的蛋白质来源^[61],然而目前微生物蛋白的商业开发主要集中在动物饲料上,而非人类消费^[62]。

1.3.1 微藻类蛋白 藻类蛋白质来源于各种可食用藻类(大型藻类或微藻),微藻物种(如螺旋藻属、小球藻属和杜氏盐藻属)因其蛋白质含量高而使用最多^[63-66]。从营养角度来看,藻类蛋白质富含几种必需氨基酸,如赖氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、色氨酸、组氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸和苯丙氨酸,具体取决于菌株,如 *Spirulina platensis* 是最丰富的微生物蛋白质来源之一(46%~63% 干基),其蛋白质水平与肉类(71%~76% 干基)和大豆(40% 干基)相当^[67]。从功能上看,藻类蛋白质具有发泡、乳化、凝胶、吸

水吸油等良好特性^[68]。与其他藻类和植物蛋白相比,藻类蛋白浓缩物(如 *Spirulina platensis*)具有更高的水/油吸收能力、发泡能力和泡沫稳定性^[69]。海藻蛋白的发泡能力与蛋清蛋白相当,这表明海藻蛋白是烘焙产品配方中重要的素食替代品。藻类蛋白质的溶解度因物种、提取方法、蛋白质分离物浓度和离子强度的不同而存在很大差异:*Arthrospira platensis* 的溶解度与商业浓缩乳清蛋白(73.9%±3.5%)和大豆蛋白(50%)相当^[70]。无论 pH 条件如何,微藻分离蛋白都能形成稳定的乳液,乳化活性指数(30 m²/g)高于籽粒苋分离蛋白(15.3~17.7 m²/g)和大豆蛋白分离物(10.86 m²/g)^[70]。

由于藻类蛋白质提取成本高,且可能会损失其他营养物质,因此一些藻类物种一般以整体形式添加至烘焙产品中,而不是以纯化蛋白的形式^[71]。添加微藻后,面包的蛋白质含量从 7.40%(对照)增加到 11.63%^[72]。一般来说,3% 的添加水平对面团流变学和粘弹性特征有积极影响,可在不影响发酵的情况下增强面筋网络^[73];当添加量超过 3%,面包的特性可能会受到影响,例如会产生不良的感官特性,而由于淀粉和面筋的稀释,还会导致面包体积减小^[74]。而在饼干配方中添加不同种类的微藻(2% 和 6% 的 *Spirulina platensis*、*Chlorella vulgaris*、*Tetraselmis suecica* 及 *Phaeodactylum tricornutum*)替代小麦粉时^[75],随着微藻添加量升高,产品蛋白质含量显著提高,添加 *Spirulina platensis* 和 *Chlorella vulgaris* 的饼干蛋白质含量高于添加 *Tetraselmis suecica* 和 *Phaeodactylum tricornutum* 的饼干产品。

2 高蛋白烘焙原料的应用挑战与解决方案

根据 GB 28050-2011 规定,当固体食品的蛋白质含量 $\geq 20\%$ NRV,即 ≥ 12 g/100 g(固体)时,可以声称“高蛋白质”或“富含蛋白质”食品。目前不同种类蛋白质主要以原料整体(如鸡蛋、乳品等)、粉类(如奶粉、大豆粉等)或蛋白含量较高的浓缩物、分离蛋白(如大豆分离蛋白等)等形式进入高蛋白烘焙产品的加工。随着高蛋白原料的引入,其独特的性质及对产品品质的影响成为了不可忽视的焦点。特别地,人们高度关注蛋白原料可能引发的致敏性问题,以及高蛋白原料对产品的色泽、香气、口感(包括质构)等感官属性的影响作用。

2.1 蛋白原料的致敏性

根据定义,过敏是由一种特定的免疫反应引起的,对食物蛋白过敏最常见的免疫机制是 IgE 抗体的产生^[76]。高蛋白烘焙产品中由于蛋白质含量较高,可能会导致部分消费者出现过敏问题。牛奶的主要过敏原是酪蛋白、 β -乳球蛋白和 α -乳蛋白,虽不太常见,但血清白蛋白(BSA)和免疫球蛋白也可能成为过敏原^[76]。Bu 等^[77]研究表明与未加热的牛奶相比,50~90 °C 巴氏杀菌的牛奶致敏性更强。发酵或水解可大幅度降低牛奶的致敏性,目前被认为是低致敏性

的奶制品原料主要是通过酶解制备的水解乳^[78]。

鸡蛋蛋清中的蛋白质比蛋黄蛋白质有更高的致敏潜力,蛋清中的四种主要过敏原是卵清蛋白、卵转铁蛋白、类卵粘蛋白和溶菌酶;两种卵黄蛋白 α -Livetin 和脂蛋白也被确定为鸡蛋过敏原^[79]。鸡蛋的致敏性受加工条件影响最大,一般来说加热会降低蛋清蛋白的致敏性,大多数(50%~85%)鸡蛋过敏患者可耐受加热处理的含鸡蛋制品。Hilderbrandt 等^[80]研究表明经历三次加热及两次酶解处理的液体鸡蛋总的致敏潜力可低于起始原料的 1/100。此外,有研究表明 UVC 暴露、伽马和电子束辐射处理也可降低鸡蛋及其制品的致敏性^[81]。

小麦蛋白的致敏性主要是由面筋蛋白引起的,由于谷氨酰胺(30%~35%)和脯氨酸(10%~15%)含量高,面筋蛋白可引发免疫反应,主要是遗传易感人群会发生乳糜泻,超过 30 个氨基酸序列被确定为表位^[82]。目前降低面筋蛋白的致敏性的方法主要有物理方法(如微波或热处理)、化学方法(如添加多酚)和生物方法(如发芽、酶处理或发酵)等^[83-85]。这些研究表明,乳酸菌和真菌蛋白酶组合可以完全去除面粉中的面筋蛋白,而转谷氨酰胺酶与肽酶 LS 组合可减少致敏性表位;来源于蔓越莓提取物的多酚可有效降低小麦醇溶蛋白致敏性;微波可改变蛋白质的结构,但不影响面筋的致敏性。

对大豆蛋白致敏性的担忧始于 90 年代,大豆球蛋白和 β -伴大豆球蛋白被认为是主要的过敏原,目前已鉴定的表位有超过 42 个^[86]。大豆蛋白过敏可引发从轻度到重度的症状(小肠结肠炎、特应性湿疹和即时 IgE 介导的反应)^[87]。目前已有较多方法,如微波、超滤、高压处理、脉冲电场、辐照、超声、基因或化学修饰等,可降低大豆蛋白的致敏潜力,但并没有完全消除表位^[53]。

尽管藻类相关的不良反应很少,但据报道,蓝藻和螺旋藻会产生一些过敏反应,而引起蓝藻过敏的是其中的藻蓝蛋白^[88]。然而,对于未被批准为“新型食品”的物种或藻类衍生成分(如分离蛋白)等有关致敏性的特性尚未阐明。

综上,蛋白质原料的安全性问题主要是其致敏性,因此加工高蛋白烘焙产品时一定要注意原料及加工条件的选择,并按照相关法律法规规定对可能致敏性成分在标签上进行标注,根据我国现行国家标准(GB 7718-2011)的要求,预包装食品标签应对 8 类致敏物质进行标注。

2.2 高蛋白原料对烘焙产品色泽、香气的影响

焙烤过程中,不同来源蛋白质由于本身的颜色以及与糖等发生美拉德反应,会对高蛋白烘焙产品颜色产生影响。幼虫期黄粉虫粉为褐色,用其强化面粉加工面包,由于烘焙过程中发生美拉德反应,产品色泽进一步加深^[89]。Ziobro 等^[90]指出,用豌豆蛋白、胶原蛋白和羽扇豆蛋白作为蛋白补充剂加入面粉,加

工出的面包颜色明显变深,而大豆蛋白的添加对产品颜色没有显著影响。以藻类粉强化面粉加工面包时,由于藻类中含有色素,会导致面包的颜色发生显著变化^[91],而添加藻类蛋白质特别是藻类分离蛋白,对产品颜色影响则较小^[74]。Aguilar 等^[92]研究发现以鹰嘴豆粉强化的无面筋面粉会使加工产品外壳颜色较深,且他们认为这是由美拉德反应所导致的。有研究表明,加工中使用糖的类型会影响美拉德反应颜色的形成,单糖(葡萄糖、果糖)的使用不利于颜色的形成^[93]。因此,高蛋白烘焙产品加工过程中,要注意高蛋白及所用糖的使用量及类型,以免影响消费者对产品的选择。

此外,某些高蛋白原料粉会有其原料本身的风味,添加量过大时,不易被人接受,如藜麦粉的青草味、大豆粉的豆腥味、肉类的腥味等。Brewer 等^[94]在面粉中添加 40%、50% 和 60% 的大豆分离蛋白时,随着添加量增加,松饼产品的豆腥味和谷物味明显增加。添加螺旋藻的烘焙产品风味成分也会受到影响,如添加螺旋藻的面包中只检测到 10 种化合物,对照组则可检测到 14 种^[72];Batista 等^[75]研究表明,无论添加何种藻类,由于含硫化化合物的存在,2% 的添加量都会强烈影响饼干的风味特征,但如果对藻类进行适当的预处理(例如脱脂),则可以在不影响感官特性的情况下将添加量提高至 6%^[95]。这表明,适当的预处理可以减少藻类的异味化合物,从而有利于提高藻类在面粉中的掺入量。

肉类、昆虫蛋白等原料粉由于应用较不广泛,因此相关预处理脱异味研究较少,而植物蛋白方面,脱除异味研究较为完善的是豆类蛋白,目前已有脱腥豆粉等产品出现,相关处理手段主要有生物技术法(基因培育无腥味豆类品种、酶处理、发酵和发芽等)、物理方法(加热或辐射等非加热方法)及化学方法(调节 pH、添加还原剂)等,这些技术手段可供其他有特殊风味的动、植物蛋白参考使用。生物技术法方面,微生物发酵被广泛用于改善豆类的风味,Coda 等^[96]采用酸面团发酵加工高蛋白含量蚕豆面包时发现,乳酸菌发酵的典型酸味可掩盖豆类的异味,从而使消费者接受富含豆类的面包;一些研究表明,发芽对降低大豆的豆类风味没有明显的效果,但对改善整体风味有积极的作用^[97],Han 等^[98]研究表明在面包以外的烘焙食品(如白色层蛋糕)中使用发芽的黄豌豆会使产品具有可接受的特性。物理技术方面,加热是大豆加工过程中去除豆腥味最常用的方法,如徐传亮等^[99]采用高温处理制得去腥的调制豆粉,此外,非热加工方法如低剂量(0.25 kGy)伽马射线辐射、脉冲电场处理均可有效降低脂肪氧合酶(LOX)活性,从而降低豆腥味。化学方法方面,大豆中 LOX 活性对 pH 高度敏感,因此可通过调整 pH 的方式抑制 LOX 活性,从而减少异味化合物的产生;此外,添加还原剂也可有效降低豆腥味,如栗鹏等^[40]以柠檬酸和丁基羟

基茴香醚为去腥剂并辅以控温制备出高蛋白质含量的黑莓饼干。

但需要指出的是,消费者对于风味的感受存在差异,如大豆蛋白的“豆腥味”对于某些消费者来说可能是嗜好性风味,因此高蛋白产品的开发应在充分进行市场调查后再确定某些蛋白原料的特殊风味应该去除还是保留。

2.3 高蛋白原料对烘焙产品质构(硬化)的影响

烘焙产品中蛋白含量过高会降低消费者的接受度,主要的负面品质包括质地硬化、口感粉质感严重等。

首先,一般来说,烘焙产品硬度随着蛋白添加量的升高而逐渐增大,如 Majzobi 等^[100]在海绵蛋糕中添加 5%~30% 的大豆分离蛋白,发现随着蛋白质水平的增加,面糊稠度增加,体积增加,硬度增加。改善产品硬化问题较为常用的手段是对蛋白原料进行化学(如酶解)或物理(如挤压、冷冻)改性后再用于高蛋白烘焙产品加工。如 McMahon 等^[9]将不同水解程度的乳清蛋白分离物与乳清蛋白加入到高蛋白营养棒配方中后发现,营养棒容易成型且更具柔韧性。Banach 等^[101]将蛋白质含量 85% 的浓缩乳蛋白(MPC85)进行气流粉碎和冷冻干燥处理,或者将蛋白质含量 80% 的浓缩乳蛋白(MPC80)通过挤压和烘烤方式进行改性后,再用于高蛋白烘焙营养棒的加工均可使产品质地更柔软,且在储藏期间更稳定。此外,抑制美拉德反应或添加食品抗结剂也可减缓产品硬化。有研究指出半胱氨酸(Cys)可抑制美拉德反应,Zhu 等^[102]研究发现,在高蛋白营养棒的配制时,添加 Cys 在储存期前 35 d 能明显降低营养棒的硬度;多酚类物质如白藜芦醇、表儿茶素、迷迭香酸等被认为在面包与饼干等食品中可作为晚期糖基化终末产物(AGEs)的抑制剂^[103]。杜明等^[104]则在研究中指出,高蛋白烘焙产品质构偏硬本质在于蛋白质粘连结块,添加组织缔合态酯类物质可解决此问题,组织缔合态的酯类物质是指与其它非酯类物质缔合的以酯类物质为成分的植物加工粉,如亚麻籽粉等。

其次,高蛋白原料与面粉烘焙后感官特性不一致,即便高蛋白原料粉粗细度与面粉相同,烘烤后的咀嚼性也不同(高蛋白原料粉口感较为粗糙),因而造成口感差异,而这种差异会随着高蛋白原料粉添加量的增加而增大。J·卡沃夫斯基等^[105]发现加工高纤维和高蛋白焙烤饼干时,当蛋白及纤维含量增加到一定水平时,焙烤制品口感粗糙且有粉质感。为解决该问题,他们在低于蛋白质变性温度的条件下将蛋白质和纤维进行水合,然后将水合混合物进行蒸煮而不造成淀粉大量糊化。这种处理可实现高含量的蛋白质和纤维的充分水合,同时蒸煮软化了纤维,使其粗糙性降低,并使蛋白质的粉质感降低,从而改进焙烤产品的感官特性,如味道和口感等。

最后,一些蛋白质原料不具有面筋的粘弹性,也

不能产生类似面筋的网络^[61],对于一些要求原料高筋力的产品(如面包),添加非面筋蛋白后会稀释小麦面筋蛋白,从而造成成品品质构差。这种情况可通过选择合适的蛋白原料来解决,如玉米醇溶蛋白因其能够形成类似面筋的粘弹性网络而被公认为是各种无麸质烘焙产品的结构蛋白^[106],玉米醇溶蛋白与水混合时形成纤维状蛋白质,并能够在发酵过程中保持玉米蛋白面团中的二氧化碳^[31],因此,玉米醇溶蛋白可为面团带来延展性和粘弹性,使面团具有制作面包的特性; β -伴大豆球蛋白浓缩物也可用作结构成型剂来改善无麸质烘焙产品的配方和质量特性^[107]。此外,使用合适酶制剂处理面团也可改善烘焙产品的质构问题,如刘扬瑞等^[108]在面团中添加 TG 酶催化蛋白质分子之间或之内的交联、蛋白质和氨基酸之间的连接以及蛋白质分子内谷氨酰胺残基的水解,达到了改善大豆蛋白面包质构和口感的效果;L·卡卢^[109]研究发现,当高蛋白面团中包含至少一种脂肪酶(达到有效剂量)时,可提升补充有豆类和/或豆类蛋白质的面团制成的烘焙和/或部分烘焙产品的体积。

3 总结与展望

尽管烘焙产品在全世界被广泛消费,但由于其蛋白质含量较低,可能会影响到其商业价值。传统植物蛋白(小麦蛋白)及动物蛋白(鸡蛋蛋白及牛奶蛋白)在烘焙行业中占据主导地位,但鉴于全球对蛋白质需求的增加,来自植物(如藜麦)、动物(如昆虫)的新食物蛋白来源正在迅速商业化并被应用或试图应用在烘焙行业。在烘焙产品中强化蛋白质可增强产品的营养特性、拓宽烘焙产品形式、丰富消费者的选择。一般而言,动物蛋白在氨基酸组成、消化率及运载其他重要营养物质的能力(如钙、铁等)等方面表现较佳,因而被广泛认为比植物蛋白具有更高的营养质量;尽管某些植物蛋白在氨基酸含量方面存在缺陷,但不同植物蛋白互相配合使用也能达到较好的蛋白质营养特性,如谷类和豆类蛋白质在营养上是互补的,此外,当消费者寻找清洁标签时也更倾向于选择植物蛋白强化的产品。

从长远来看,创新是促进高蛋白烘焙产品市场增长的关键。a.通过基因育种培育具有特殊性质的新品种(蛋白含量更高、氨基酸组成更均衡、抗营养成分含量更低等)是满足制造商、消费者要求的一个新渠道;此外,具有环境效益的体外肉(*in vitro meat*, *cultured meat*)也是研究的热点,虽然尚未进入市场,但预计在未来几年会逐步商业化。b.还应从传统中寻找解决方案,如酸面团发酵可有效解决某些高蛋白原料加入后,烘焙产品质构不佳、风味难以接受的问题,由于不同产地、不同类型的酸面团中微生物的发酵特性存在差异,可能会给高蛋白烘焙行业带来新思路;此外,混合和共处理动物和植物蛋白质也可以带来协同的营养和技术功能增强,目前,混合蛋白食品系统的设计原则仍在开发中,在这方面有很大的创新

空间;c.许多替代蛋白被认为是新型食品,其中欧洲食品安全局已经制定了来自藻类及真菌的可食用物种清单,我国也对藻类及其制品制定了相关标准(NY/T 1709-2021),但它们的纯化成分(如蛋白质提取物)必须通过风险评估程序才能获得监管和安全性批准以用于高蛋白烘焙产品加工;d.使用3D食品打印创造个性化的高蛋白烘焙产品:在流变学研究基础上,采用3D打印可满足消费者在感官特性和营养成分方面的个人偏好和饮食要求。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] KWEON M, SLADE L, LEVINE H, et al. Cookie-versus cracker-baking—what’s the difference? Flour functionality requirements explored by SRC and alveography[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2014, 54(1): 115–138.
- [2] PATEL H. Impact of consumer behavior towards bakery products[J]. Kajaani University of Applied Sciences, 2023.
- [3] GRASSO A C, HUNG Y, OLTHOF M R, et al. Older consumers’ readiness to accept alternative, more sustainable protein sources in the European Union[J]. *Nutrients*, 2019, 11(8): 1904.
- [4] DAY L, CAKEBREAD J A, LOVEDAY S M. Food proteins from animals and plants: Differences in the nutritional and functional properties[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 119: 428–442.
- [5] KIM W, WANG Y, SELOMULYA C. Dairy and plant proteins as natural food emulsifiers[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 261–272.
- [6] ROY D, YE A, MOUGHAN P J, et al. Composition, structure, and digestive dynamics of milk from different species—a review[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2020, 7: 577759.
- [7] TAY R R E. Structuring wheat flour-based crackers using whey protein isolate[J]. *International Dairy Journal*, 2022, 128: 105314.
- [8] GANI A, BROADWAY A A, MASOODI F A, et al. Enzymatic hydrolysis of whey and casein protein- effect on functional, rheological, textural and sensory properties of breads[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(12): 7697–7709.
- [9] MCMAHON D J, ADAMS S L, MCMANUS W R. Hardening of high-protein nutrition bars and sugar/polyol-protein phase separation[J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(6): E312–E321.
- [10] CAKMAK H, ALTINEL B, KUMCUOGLU S, et al. Chicken meat added bread formulation for protein enrichment[J]. *Food and Feed Research*, 2013, 40(1): 33–42.
- [11] 温作金. 一种肉肉松红薯饼的配方及其制备方法: 中国, 2018110138143[P]. 2018-11-13. [WEN Z J. A recipe for rabbit meat floss sweet potato cake and its preparation method; China, 2018110138143[P]. 2018-11-13.]
- [12] YU W, XU D, ZHANG H, et al. Effect of pigskin gelatin on baking, structural and thermal properties of frozen dough: comprehensive studies on alteration of gluten network[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 102: 105591.
- [13] BARAIYA K G, BOJAYANAİK M, SURASANI V K R, et al. Utilization of fish protein isolates to supplement oat-based cookies and assessment of end product quality[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023: 1–12.
- [14] DUY H N, DUNG N N T. Effect of the addition of fish protein isolate on biscuits’ physicochemical and sensory properties[J]. *Tạp chí Khoa học-Công nghệ Thủy Sản, Trường Đại học Nha Trang*, 2024, 28(1): 31–37.
- [15] OPREA O B, SANNAN S, TOLSTOREBROV I, et al. Effects of fish protein hydrolysate on the nutritional, rheological, sensorial, and textural characteristics of bread[J]. *Foods*, 2024, 13(5): 698.
- [16] ASGHAR A, ABBAS M. Dried egg powder utilization, a new frontier in bakery products[J]. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 2012, 3(13): 493–505.
- [17] 张蒙琪. 鸡蛋蛋白与大豆分离蛋白间相互作用及其凝胶特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [ZHANG M Q. The research of interaction between hen egg proteins and soybean protein isolate and its gelation properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [18] DELEU L J, MELIS S, WILDERJANS E, et al. Protein network formation during pound cake baking: The role of egg yolk and its fractions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 226–232.
- [19] LI J, ZHAI J, GU L, et al. Hen egg yolk in food industry—A review of emerging functional modifications and applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 115: 12–21.
- [20] LI X, YANG Y, MURRAY B S, et al. Combination of egg white protein and microgels to stabilize foams: Impact of processing treatments[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 275: 109860.
- [21] PRIMACELLA M, FEI T, ACEVEDO N, et al. Effect of food additives on egg yolk gelation induced by freezing[J]. *Food Chemistry*, 2018, 263: 142–150.
- [22] NOLASCO E, JUNDT E, KRAMP M M, et al. Application of dried egg white to enhance the textural properties of fresh and frozen pancakes[J]. *ES Food & Agroforestry*, 2020(2): 50–57.
- [23] TÓTH A, NÉMETH CS, HIDAS K, et al. Development of a high protein containing filling for bakery products[J]. *Hungarian Agricultural Engineering*, 2020(37): 60–66.
- [24] 唐清法, 马广起, 李英, 等. 一种高蛋白豆奶饼及制备方法: 中国, 03110844X[P]. 2004-07-28. [TANG Q F, MA G Q, LI Y, et al. A kind of high protein soya milk cake and preparation method: China, 03110844X[P]. 2004-07-28.]
- [25] BORGES M M, DA COSTA D V, TROMBETE F M, et al. Edible insects as a sustainable alternative to food products: An insight into quality aspects of reformulated bakery and meat products[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 46: 100864.
- [26] LAMSAL B, WANG H, PINSIRODOM P, et al. Applications of insect-derived protein ingredients in food and feed industry[J]. *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, 2019, 96(2): 105–123.
- [27] YAZICI G N, OZER M S. Using edible insects in the production of cookies, biscuits, and crackers: A Review[C/OL]//The 2nd International Electronic Conference on Foods-“ Future Foods and Food Technologies for a Sustainable World”. MDPI, 2021: 80.
- [28] LUNA G C, MARTIN-GONZALEZ F S, MAUER L J, et al. Cricket (*Acheta domesticus*) protein hydrolysates’ impact on the physicochemical, structural and sensory properties of tortillas and tortilla chips[J]. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2021, 7(1): 109–120.
- [29] ZIELIŃSKA E, PANKIEWICZ U, SUJKA M. Nutritional, physicochemical, and biological value of muffins enriched with edi-

- ble insects flour[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(7): 1122.
- [30] 邓伶俐, 解昕媛, 刘松奇, 等. 一种高蛋白降血糖黄粉虫饼干及其制备方法: 中国, 2022104815608[P]. 2022-08-05. [DENG L L, XIE X Y, LIU S Q, et al. A high protein hypoglycemic yellow mealworm biscuit and its preparation method; China, 2022104815608[P]. 2022-08-05.]
- [31] BOUKID F. The realm of plant proteins with focus on their application in developing new bakery products[J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2022, 99: 101-136.
- [32] SHEWRY P R, TATHAM A S, FORDE J, et al. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: A reassessment [J]. *Journal of Cereal Science*, 1986, 4(2): 97-106.
- [33] AMAGLIANI L, O'REGAN J, KELLY A L, et al. Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 291-300.
- [34] DHILLON G S. Agricultural-based protein by-products: Characterization and applications[M]. New York: Academic Press, 2016, 21-36.
- [35] KARAMI Z, PEIGHAMBARDUST S H, HESARI J, et al. Antioxidant, anticancer and ACE-inhibitory activities of bioactive peptides from wheat germ protein hydrolysates[J]. *Food Bioscience*, 2019, 32: 100450.
- [36] BARDINI G, BOUKID F, CARINI E, et al. Enhancing dough-making rheological performance of wheat flour by transglutaminase and vital gluten supplementation[J]. *LWT*, 2018, 91: 467-476.
- [37] STĘPNIEWSKA S, HASSOON W H, SZAFRAŃSKA A, et al. Procedures for breadmaking quality assessment of rye wholemeal flour[J]. *Foods*, 2019, 8(8): 331.
- [38] OEST M, BINDRICH U, VOSS A, et al. Rye bread defects: A analysis of composition and further influence factors as determinants of dry-baking[J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1900.
- [39] ÖHGREN C, FABREGAT N, LANGTON M. Quality of bread baked from frozen dough—effects of rye, and sugar content, kneading time and proofing profile[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 68: 626-633.
- [40] 栗鹏, 栗兰杰, 王城雨, 等. 一种高蛋白含量黑莓饼干的制备方法: 中国, 2019106718827[P]. 2019-11-01. [LI P, LI L J, WANG C Y, et al. A method of preparing blackberry biscuits with high protein content; China, 2019106718827[P]. 2019-11-01.]
- [41] LI D, LI X, WU G, et al. The characterization and stability of the soy protein isolate/1-octacosanol nanocomplex[J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124766.
- [42] WU C, WANG J, YAN X, et al. Effect of partial replacement of water-soluble cod proteins by soy proteins on the heat-induced aggregation and gelation properties of mixed protein systems[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105417.
- [43] BROWN J. Fortification of baked products with soy protein: Studying the effects of baking with soy protein and potential use in the development of hands-on food science education modules[D]. Kansas: Kansas State University, 2022.
- [44] de LA HERA E, RUIZ-PARÍS E, OLIETE B, et al. Studies of the quality of cakes made with wheat-lentil composite flours[J]. *LWT*, 2012, 49(1): 48-54.
- [45] ZHANG Y, GUO X, SHI C, et al. Effect of soy proteins on characteristics of dough and gluten[J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126494.
- [46] LAN Y, OHM J B, CHEN B, et al. Phase behavior, thermodynamic and microstructure of concentrated pea protein isolate-pectin mixture: Effect of pH, biopolymer ratio and pectin charge density[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105556.
- [47] DJAGNY K B, WANG Z, XU S. Gelatin: A valuable protein for food and pharmaceutical industries: Review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2001, 41(6): 481-492.
- [48] CHAO D, JUNG S, ALUKO R E. Physicochemical and functional properties of high pressure-treated isolated pea protein[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 45: 179-185.
- [49] SILVA J V C, JACQUETTE B, AMAGLIANI L, et al. Heat-induced gelation of micellar casein/plant protein oil-in-water emulsions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 569: 85-92.
- [50] WÓJCIK M, RÓŻYŁO R, SCHÖNLECHNER R. Physicochemical properties of an innovative gluten-free, low-carbohydrate and high protein-bread enriched with pea protein powder[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 14498.
- [51] BOUKID F. Chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein as a prospective plant-based ingredient: A review[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(11): 5435-5444.
- [52] SHAABANI S, YARMAND M S, KIANI H, et al. The effect of chickpea protein isolate in combination with transglutaminase and xanthan on the physical and rheological characteristics of gluten free muffins and batter based on millet flour[J]. *LWT*, 2018, 90: 362-372.
- [53] WASI N, FATIMA F, FATIMA R, et al. A comprehensive review of nutritional and sensorial attributes of bakery products formulated using quinoa flour[J]. *RADS Journal of Food Biosciences*, 2024, 3(1): 42-47.
- [54] BOZDOGAN N, KUMCUOGLU S, TAVMAN S. Investigation of the effects of using quinoa flour on gluten-free cake batters and cake properties[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(2): 683-694.
- [55] XU X, LUO Z, YANG Q, et al. Effect of quinoa flour on baking performance, antioxidant properties and digestibility of wheat bread[J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 87-95.
- [56] FARZANA T, FATEMA J, HOSSAIN F B, et al. Quality improvement of cakes with buckwheat flour, and its comparison with local branded cakes[J]. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 2021, 9(2): 570-577.
- [57] GIMENEZ-BASTIDA J A, PISKULA M K, ZIELINSKI H. Recent advances in processing and development of buckwheat derived bakery and non-bakery products—a review[J]. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2015, 65(1): 9-20.
- [58] FILIPČEV B, ŠIMURINA O, SAKAČ M, et al. Feasibility of use of buckwheat flour as an ingredient in ginger nut biscuit formulation[J]. *Food Chemistry*, 2011, 125(1): 164-170.
- [59] GEBREIL S Y, ALI M I K, MOUSA E A M. Utilization of amaranth flour in preparation of high nutritional value bakery products[J]. *Food and Nutrition Sciences*, 2020, 11(5): 336-354.
- [60] MATSEYCHIK I V, KORPACHEVA S M, MAZAROVA P G, et al. Prospects of using amaranth as a functional ingredient in bakery products[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 677(3): 032057.
- [61] BOUKID F, ROSELL C M, ROSENE S, et al. Non-animal proteins as cutting-edge ingredients to reformulate animal-free food-stuffs: Present status and future perspectives[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(23): 6390-6420.
- [62] RITALA A, HÄKKINEN S T, TOIVARI M, et al. Single cell

- protein—state-of-the-art, Industrial landscape and patents 2001–2016[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 2009.
- [63] AIELLO G, LI Y, BOSCHIN G, et al. Chemical and biological characterization of spirulina protein hydrolysates: Focus on ACE and DPP-IV activities modulation[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 63: 103592.
- [64] LUPATINI A L, COLLA L M, CANAN C, et al. Potential application of microalga *Spirulina platensis* as a protein source[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(3): 724–732.
- [65] CAPORGNO M P, MATHYS A. Trends in microalgae incorporation into innovative food products with potential health benefits[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2018, 5: 58.
- [66] GROSSMANN L, HINRICHS J, WEISS J. Solubility of extracted proteins from *Chlorella sorokiniana*, *Phaeodactylum tricornutum*, and *Nannochloropsis oceanica*: Impact of pH-value[J]. *LWT*, 2019, 105: 408–416.
- [67] LUPATINI A L, DE OLIVEIRA BISPO L, COLLA L M, et al. Protein and carbohydrate extraction from *S. platensis* biomass by ultrasound and mechanical agitation[J]. *Food Research International*, 2017, 99: 1028–1035.
- [68] TEULING E, SCHRAMA J W, GRUPPEN H, et al. Characterizing emulsion properties of microalgal and cyanobacterial protein isolates[J]. *Algal Research*, 2019, 39: 101471.
- [69] YÜCETEPE A, SAROĞLU Ö, ÖZÇELİK B. Response surface optimization of ultrasound-assisted protein extraction from *Spirulina platensis*: Investigation of the effect of extraction conditions on techno-functional properties of protein concentrates[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(7): 3282–3292.
- [70] CHEN Y, CHEN J, CHANG C, et al. Physicochemical and functional properties of proteins extracted from three microalgal species[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 510–517.
- [71] NUNES M C, GRAÇA C, VLAISAVLJEVIĆ S, et al. Microalgal cell disruption: Effect on the bioactivity and rheology of wheat bread[J]. *Algal Research*, 2020, 45: 101749.
- [72] AK B, AVŞAROĞLU E, İŞİK O, et al. Nutritional and physicochemical characteristics of bread enriched with microalgae *Spirulina platensis*[J]. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2016, 6(12): 30-38.
- [73] GRAÇA C, FRADINHO P, SOUSA I, et al. Impact of *Chlorella vulgaris* on the rheology of wheat flour dough and bread texture[J]. *LWT*, 2018, 89: 466–474.
- [74] LAFARGA T, MAYRE E, ECHEVERRIA G, et al. Potential of the microalgae *Nannochloropsis* and *Tetraselmis* for being used as innovative ingredients in baked goods[J]. *LWT*, 2019, 115: 108439.
- [75] BATISTA A P, NICCOLAI A, FRADINHO P, et al. Microalgae biomass as an alternative ingredient in cookies: Sensory, physical and chemical properties, antioxidant activity and in vitro digestibility[J]. *Algal Research*, 2017, 26: 161–171.
- [76] VERHOECKX K C M, VISSERS Y M, BAUMERT J L, et al. Food processing and allergenicity[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2015, 80: 223–240.
- [77] BU G, LUO Y, CHEN F, et al. Milk processing as a tool to reduce cow's milk allergenicity: A mini-review[J]. *Dairy Science & Technology*, 2013, 93: 211–223.
- [78] BAHNA S L. Hypoallergenic formulas: Optimal choices for treatment versus prevention[J]. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 2008, 101(5): 453-459.
- [79] MARTOS G, LÓPEZ-FANDIÑO R, MOLINA E. Immunoreactivity of hen egg allergens: Influence on *in vitro* gastrointestinal digestion of the presence of other egg white proteins and of egg yolk[J]. *Food Chemistry*, 2013, 136(2): 775–781.
- [80] HILDEBRANDT S, KRATZIN H D, SCHALLER R, et al. *In vitro* determination of the allergenic potential of technologically altered hen's egg[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(5): 1727–1733.
- [81] MANZOCCO L, PANOZZO A, NICOLI M C. Effect of ultraviolet processing on selected properties of egg white[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(2): 522–527.
- [82] OZUNA C V, BARRO F. Characterization of gluten proteins and celiac disease-related immunogenic epitopes in the triticeae: Cereal domestication and breeding contributed to decrease the content of gliadins and gluten[J]. *Molecular Breeding*, 2018, 38(3): 22.
- [83] BOUKID F, PRANDI B, BUHLER S, et al. Effectiveness of germination on protein hydrolysis as a way to reduce adverse reactions to wheat[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(45): 9854–9860.
- [84] GOBBETTI M, GIUSEPPE RIZZELLO C, DI CAGNO R, et al. Sourdough lactobacilli and celiac disease[J]. *Food Microbiology*, 2007, 24(2): 187–196.
- [85] PÉROT M, LUPI R, GUYOT S, et al. Polyphenol interactions mitigate the immunogenicity and allergenicity of gliadins[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(31): 6442–6451.
- [86] TAYLOR S L, REMINGTON B C, PANDA R, et al. Detection and control of soybeans as a food allergen. *Handbook of Food Allergen Detection and Control*[M]. English: Woodhead Publishing, 2015: 341–366.
- [87] LI H, ZHU K, ZHOU H, et al. Comparative study of four physical approaches about allergenicity of soybean protein isolate for infant formula[J]. *Food and Agricultural Immunology*, 2016, 27(5): 604–623.
- [88] LE T M, KNULST A C, RÖCKMANN H. Anaphylaxis to spirulina confirmed by skin prick test with ingredients of spirulina tablets[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2014, 74: 309–310.
- [89] KHUENPET K, PAKASAP C, VATTHANAKUL S, et al. Effect of larval-stage mealworm (*Tenebrio molitor*) powder on qualities of bread[J]. *International Journal of Agricultural Technology*, 2020, 16(2): 283–296.
- [90] ZIOBRO R, WITCZAK T, JUSZCZAK L, et al. Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Effect on dough rheological properties and bread characteristic[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 32(2): 213–220.
- [91] GARCÍA-SEGOVIA P, PAGÁN-MORENO M J, LARA I F, et al. Effect of microalgae incorporation on physicochemical and textural properties in wheat bread formulation[J]. *Food Science and Technology International*, 2017, 23(5): 437–447.
- [92] AGUILAR N, ALBANELL E, MIÑARRO B, et al. Chickpea and tiger nut flours as alternatives to emulsifier and shortening in gluten-free bread[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 62(1): 225–232.
- [93] STAROWICZ M, ZIELIŃSKI H. How maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products?[J]. *Food Reviews International*, 2019, 35(8): 707–725.
- [94] BREWER M S, POTTER S M, SPROULS G, et al. Effect of soy protein isolate and soy fiber on color, physical and sensory characteristics of baked products[J]. *Journal of Food Quality*, 1992, 15

- (4): 245–262.
- [95] SAHNI P, SHARMA S, SINGH B. Evaluation and quality assessment of defatted microalgae meal of *Chlorella* as an alternative food ingredient in cookies[J]. *Nutrition & Food Science*, 2019, 49(2): 221–231.
- [96] CODA R, VARIS J, VERNI M, et al. Improvement of the protein quality of wheat bread through faba bean sourdough addition[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 82: 296–302.
- [97] WANG B, ZHANG Q, ZHANG N, et al. Insights into formation, detection and removal of the beany flavor in soybean protein [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112: 336–347.
- [98] HAN J, BUCHKO A. Development of a partial germination process for yellow peas and resultant pea flours in white layer cakes[J]. *Cereal Foods World*, 2019, 59: A42.
- [99] 徐传亮, 桑进亮, 张其东. 高蛋白豆香饼干的制备方法: 中国, 2006100453115[P]. 2006-12-13. [XU C L, SANG J L, ZHANG Q D. Preparation method of high protein soya flavoured biscuits: China, 2006100453115[P]. 2006-12-13.]
- [100] MAJZOBI M, GHIASI F, HABIBI M, et al. Influence of soy protein isolate on the quality of batter and sponge cake: Influence of soy protein isolate on sponge cake[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2014, 38(3): 1164–1170.
- [101] BANACH J C, CLARK S, LAMSAL B P. Microstructural changes in high-protein nutrition bars formulated with extruded or toasted milk protein concentrate[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(2): C332–C340.
- [102] ZHU D, LABUZA T P. Effect of cysteine on lowering protein aggregation and subsequent hardening of whey protein isolate (WPI) protein bars in WPI/buffer model systems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(13): 7970–7979.
- [103] OU J, TENG J, EL-NEZAMI H S, et al. Impact of resveratrol, epicatechin and rosmarinic acid on fluorescent AGEs and cytotoxicity of cookies[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 40: 44–50.
- [104] 杜明, 舒文聘, 陈攀. 可烘焙的面团、烘焙制品以及烘焙加工品: 中国, 2021116792301[P]. 2022-05-24. [DU M, SHU W P, CHEN Z. Bakable dough, baked goods, and baked products: China, 2021116792301[P]. 2022-05-24.]
- [105] J·卡沃夫斯基, V·韦穆拉帕利, M·奥科尼夫斯卡, 等. 高纤维和高蛋白焙烤产品生产: 中国, 2010102006269[P]. 2014-03-26. [KAVOVSLY J, VEMULAPALLI V, OKONIVSKA M, et al. Production of high-fibre and high-protein bakery products: China, 2010102006269[P]. 2014-03-26.]
- [106] SCHOBER T J, BEAN S R, BOYLE D L, et al. Improved viscoelastic zein–starch doughs for leavened gluten-free breads: Their rheology and microstructure[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48(3): 755–767.
- [107] ESPINOSA-RAMÍREZ J, GARZON R, SERNA-SALDIVAR S O, et al. Mimicking gluten functionality with β -conglycinin concentrate: Evaluation in gluten free yeast-leavened breads[J]. *Food Research International*, 2018, 106: 64–70.
- [108] 刘扬瑞, 刘鑫, 赵顺来, 等. 一种高蛋白面包及其生产方法: 中国, 2008101596168[P]. 2009-04-15. [LIU Y R, LIU X, ZHAO S L, et al. A kind of high protein bread and its production method: China, 2008101596168[P]. 2009-04-15.]
- [109] L·卡卢. 包含脂肪酶的豆类和/或豆荚蛋白质强化面团和烘焙制品: 中国, 202080101419X[P]. 2023-02-03. [KALU L. Lipase-containing legume and/or pod protein-fortified dough and bakery products: China, 202080101419X[P]. 2023-02-03.]