

**编者按:**食品工业关系国计民生,是衡量一个国家或地区经济发展水平和人民生活质量的重要标志。面对复杂严峻的国际环境,2022 年我国食品工业总产值达到 97 991.90 亿元,以占全国工业 5.1% 的资产,创造了 7.1% 的营业收入,完成了 8.1% 的利润总额。食品工业是名副其实的国民经济支柱产业和永恒的朝阳产业,是我国经济增长的重要驱动力。当前,新一轮科技革命正在深刻影响全球食品领域科学研究和产业发展,生命科学、物理学、化学、信息科学、材料科学等学科与食品科学学科交叉融合,推动了绿色、安全、智能等为特征的食品科技重大变革。

我国食品产业以“大食物观”思想为指引,立足于“双碳目标”“农业强国”等绿色发展战略方向,通过科技创新在食品绿色加工、生物制造、安全防控、营养风味和贮藏保鲜等领域取得了一系列的理论创新突破和跨越式发展,为我国食品产业的可持续发展提供了重要支撑。然而,目前我国食品加工与制造基础研究领域仍存在一些亟待解决的科学问题,例如食品体系中多组分的互作规律及加工适应性机制不明确,新型食品资源高效挖掘的实现途径不清晰,食品生物制造和工程化的理论基础不完善等。

加强食品科学基础研究,进一步凝练食品加工与制造领域的关键科学问题并凝聚科学价值导向共识,是提升食品产业核心竞争力的重要途径。2023 年 11 月 17—18 日,国家自然科学基金委员会生命科学部“食品加工与制造关键科学问题战略研讨会”在江苏无锡召开,共有 40 余位食品科学领域的专家学者和行业科技管理人员应邀参加了会议。与会人员凝练了食品加工与制造领域的关键科学问题并探讨了未来的发展方向和路线,将有效助力于我国食品产业的高质量发展。

我们将相关研讨成果进行整理,形成了系列研究综述,在《中国食品学报》“食品加工与制造关键科学问题”专栏刊出,相信可为广大食品科技工作者提供一定的参考和借鉴,以期推动我国食品加工与制造基础研究的高质量发展,培养食品科学青年创新人才,培育我国食品产业新质生产力。

(国家自然科学基金委员会生命科学部农学与食品科学处 李兴峰研究员)

## 品质导向的粮油食品精准加工分子基础与调控

金征宇<sup>1</sup>, 江连洲<sup>2</sup>, 王兴国<sup>1</sup>, 谭斌<sup>3</sup>, 顾正彪<sup>1</sup>, 孙秀兰<sup>1</sup>, 李晓玺<sup>4</sup>

<sup>1</sup>江南大学食品学院 江苏无锡 214122

<sup>2</sup>东北农业大学食品学院 哈尔滨 150030

<sup>3</sup>国家粮食和物资储备局科学研究院 北京 100037

<sup>4</sup>华南理工大学食品科学与工程学院 广州 510640

**摘要** 粮油是国家最重要的战略物资,粮油食品产业在国民经济中起着基础作用,深度关系着国计民生和国民健康。粮食和油料中营养成分丰富及其多尺度结构复杂,且加工方式多变,进而影响粮油食品的感官、安全特性和消化吸收、营养健康效应。本文通过系统梳理粮油食品发展现状及产业战略意义,品质导向的粮油食品加工与制造发展现状及面临的挑战,提出从粮油食品的加工过程控制,营养组分多尺度结构变化与结构重构,多维度品质特性调控 3 个角度,系统解析基于品质导向的粮油食品精准加工的结构基础与调控机制,重点探讨粮油食品中主要营养组分的加工适应性、互作机制,粮油食品加工对感官品质、健康品质和安全品质等品质特性的影响,多维品质与加工过程构效关系与关联调控机制等制约粮油食品未来发展的研究方向,以期建立品质导向的粮油食品精准加工的理论基础、技术方法和新型绿色加工策略,为创制感官、安全和健康品质协同提升的营养健康粮油食品提供理论支撑,推动我国粮油食品加工产业的高质量发展。

**关键词** 粮油食品; 营养成分; 相互作用; 精准加工; 多维品质调控

文章编号 1009-7848(2024)05-0001-18 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.05.001

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100101, 2023YFD2100801); 国家自然科学基金重点项目(32130084)

第一作者: 金征宇,男,博士,教授,中国工程院院士  
E-mail: zjin@jiangnan.edu.cn

### 1 粮油食品及产业战略意义

粮油食品作为全球食品供应链的基石,对确保食品安全和维护人类健康发挥着至关重要的作用。粮油食品主要包括利用各种谷物(小麦、玉米、大米、薯类等)、淀粉质豆类、油料作物(大豆、菜籽、花生等)经过精深加工及转化的系列产品,

是提供碳水化合物、蛋白质、脂质、多种维生素与矿物质等基本营养素的主要来源。粮油食品通过多样化的加工技术,转化为面粉、面条、面包、米饭、米粉、食用油、功能油脂等多种形式,满足不同文化和饮食习惯需求,并朝着更加营养健康、安全美味、方便快捷、高效节能且绿色可持续的方向发展。

### 1.1 粮油食品种类及其品质特性

粮油是对谷类、豆类、薯类等粮食和油料及其加工成品和半成品的统称。根据使用的主要原料不同,粮油食品分为谷物淀粉类食品、植物蛋白类食品、油脂乳液类食品、全谷物食品等。依据加工技术的不同,粮油食品又可划分为烘焙食品、发酵食品、干制食品、冷冻食品、油炸食品、挤出食品、腌渍食品等。这些种类繁多的粮油食品的品质特性包括感官品质、安全品质和营养健康品质,不仅影响消费者的直接感官体验、饮食安全和营养健康,也影响着食品行业的发展和全球食品安全的大局。感官品质直接影响消费者选择和购买决策,是粮油食品重要的品质特性。颜色、形状、大小等食品外观,固体、黏弹性固体、流体等食品形态,酸、甜、苦、咸、鲜等食品风味,酥脆、坚硬、黏稠等食品质构,均是粮油食品质量和加工水平的直接体现。安全品质是确保食品对消费者健康无害的关键因素,在粮、油原料生产、加工、储存、运输过程中,农药、重金属、化学污染物等潜在污染物及微生物滋生、黄曲霉素、赭曲霉素等真菌毒素的产

生都会严重危害消费者的健康。此外,在粮、油食品精深加工过程中,各营养组分的相互作用会产生痕量有害物质,包括蛋白质/肽/氨基酸、淀粉等多糖/低聚糖/单糖和脂质等互作形成丙烯酰胺、AGEs、糠醛、杂环胺、氯丙醇酯和缩水甘油酯等;脂质中不饱和脂肪酸氢化为反式脂肪酸、过氧化为醛、酮、酸等小分子,都会影响食品的安全性。粮油食品的营养健康品质是指这些食品在满足人体营养需求方面的能力和特性,除满足人体正常生长发育的宏量和微量营养素外,抗消化淀粉、多肽、寡肽、多酚等食品组分还具有特定的生理调节和健康效应,能够改善肠道菌群,调节代谢紊乱和增强机体免疫等。

### 1.2 粮油食品产业及其战略意义

粮食和油料是国家最重要的战略物资,粮油产业在国民经济中起到基础作用。根据国家统计局的最新数据(表1),2023年,我国粮食产量为69 541.0万t,主要包括谷物64 143.0万t,豆类2 384.1万t,薯类3 013.9万t;油料产量为3 864.0万t,主要来源于花生、油菜籽和芝麻。2019—2023年我国粮食产量逐年增加,年增长率分别为0.90%、0.85%、1.99%、0.54%和1.29%。2019—2023年我国油料产量年增长率分别为1.74%、2.67%、0.75%、1.13%和5.74%,始终保持增长的趋势。

粮油食品安全关乎国家命脉,是解决14亿人吃饱、吃好的头等大事。2024年中央1号文件指出,“夯实农业基础,推进乡村全面振兴,要抓好粮

表1 2019—2023年我国粮油产量<sup>[1]</sup>

Table 1 The production of cereals and oils in China from 2019 to 2023<sup>[1]</sup>

	2019	2020	2021	2022	2023
粮食	66 384.3	66 949.2	68 284.7	68 652.8	69 541.0
谷物	61 369.7	61 674.3	63 275.7	63 324.3	64 143.0
稻谷	20 961.4	21 186.0	21 284.2	20 849.5	20 660.3
小麦	13 359.6	13 425.4	13 694.4	13 772.3	13 659.0
玉米	26 077.9	26 066.5	27 255.1	27 720.3	28 884.2
豆类	2 131.9	2 287.5	1 965.5	2 351.0	2 384.1
大豆	1 809.2	1 960.2	1 639.5	2 028.3	2 084.0
薯类	2 882.7	2 987.4	3 043.5	2 977.4	3 013.9
油料	3 493.0	3 586.4	3 613.2	3 654.2	3 864.0
花生	1 752.0	1 799.3	1 830.8	1 832.9	—
油菜籽	1 348.5	1 404.9	1 471.4	1 553.1	—
芝麻	46.7	45.7	45.5	43.5	—

注:单位,万t;“—”表示没有明确的统计数据。

食和重要农产品生产,树立大农业观、大食物观,多渠道拓展食物来源,探索构建大食物监测统计体系”。粮油食品深度关系着国计民生和国民健康,并上升到国家战略高度。《健康中国“2030”规划纲要》和《国民营养计划(2017—2030年)》均指出,“要优化食物结构,大力发展个性化营养食品,实施不同人群的专项营养调控”,“完善食品安全标准体系,实现食品安全标准与国际标准基本接轨,加强食品安全风险监测评估”。因此,挖掘和拓展粮油资源,切实保障国家粮食安全;变革传统粮油加工方式,融入国家“双碳”战略;面向人民生命健康,服务“健康中国2030”战略,必须实现粮油的数量、质量、营养和可持续全方位安全,这涉及

粮油质量安全防控、粮油低碳智能制造、营养健康粮油、粮油资源挖掘理论。

## 2 粮油食品加工与制造发展现状

### 2.1 谷物淀粉类食品

淀粉是谷物中最丰富的主要成分,主要由以葡萄糖为基本单元的直链淀粉和支链淀粉组成,二者通过氢键相互作用层次排列成具有短程有序结构、结晶结构和层状结构等多尺度结构的完整颗粒<sup>[2]</sup>。淀粉的多尺度结构决定了淀粉的糊化特性、凝胶特性、消化特性、回生特性等理化特性,进而影响谷物淀粉类食品感官品质、安全特性和营养品质。

表2 谷物淀粉类食品加工和制造现状

Table 2 Processing and manufacturing of cereal starch-based foods

品质	加工和制造策略	技术手段	参考文献
感官	诱导淀粉多尺度结构转变;调控淀粉与其它食品分子互作;明晰淀粉多尺度结构演变程度及规律;算法优化、模型建立和品质预测	冷却、热风干燥、真空冷冻干燥、高压蒸汽	[3],[4]
		乙酰化、羟丙基化	[5],[6]
		麦芽糖 $\alpha$ -淀粉酶、糖基转移酶、外切淀粉酶、外切淀粉、脱支淀粉酶、支化酶	[7],[8]
安全	重组食品基质成分,控制加工条件,运用新兴加工方法限制反应的发生与进行;建立精准、快捷、方便、低成本检测方法;创制新型吸附降解去除材料	普鲁兰多糖、麦芽糊精、黄原胶、明胶、十二烷基没食子酸酯	[9],[10]
		人工神经网络、遗传算法、模糊逻辑、有限元	[11],[12]
		冷等离子体、超声波、脉冲电场、焯水	[13],[14]
营养	诱导淀粉多尺度结构转变;调控淀粉与其它食品分子互作;明晰淀粉在胃肠道消化吸收命运	咖啡酸、阿魏酸和表儿茶素没食子酸酯	[15],[16]
		共价有机框架、金属有机框架	[17]
		电化学传感器、荧光传感器	[18],[19]
		热湿处理、螺杆挤出、喷雾干燥	[20],[21]
		丁酰化、辛烯基琥珀酸酐酯化、乙酰化	[22],[23]
		1,4- $\alpha$ -葡聚糖分支酶、环糊精酶、环糊精葡萄糖基转移酶	[24],[25]
		脂肪酸、亲水胶体、蛋白质	[26-29]

谷物淀粉类食品的感官品质主要指其在风味、质地、外观和新鲜度等方面的综合特性,它是口腔咀嚼过程中食品对人体机械感觉受体的刺激而产生的多种感觉特性。谷物淀粉类食品的感官品质靶向加工与制造能够满足不同群体,包括青少年、中老年、咀嚼困难患者等对食品质构、风味和颜色的不同需求。在加工和贮藏过程中,淀粉分子结构及其衍变和其它食品成分互作的程度直接影响谷物淀粉类食品感官品质的呈现效果。蒸煮

过程中大米直链和支链淀粉的浸出和表面吸附,赋予米饭的硬度和黏度。浸出含有短侧链的支链淀粉越多,直链淀粉越少,黏度则越大,硬度则越小。高压下,直链淀粉通过疏水相互作用包埋香味分子,这些香味分子在食用过程的缓释赋予谷物淀粉类食品持续的风味呈现。基于感官品质导向的谷物淀粉类食品加工制造过程中,科技和产业研究人员正在不断聚焦于加工技术调控淀粉多尺度结构,智能化在线监测加工和贮藏过程中淀粉

多尺度结构演变及淀粉互作模式,并通过归纳总结、数据演算、模型演绎建立加工制造过程条件-淀粉多尺度结构-感官品质之间的关系网络,提升其感官品质特性的精准加工水平。实际上,加工技术对淀粉多尺度结构的诱导调控及淀粉分子互作模式会受到加工条件影响。在热加工和非热加工下,淀粉颗粒发生膨胀、破裂、分子扩散,并在特定条件下重新聚集形成新的短程、长程、层状等多尺度结构<sup>[30]</sup>。因此,通过调节和优化加工的温度、时间和强度,加工介质的类型,食品基质的种类,pH值和离子强度等,以及运用微波磁场、冷等离子体、超声、高水静压等新兴加工技术等可诱导淀粉多尺度结构的定向改变和淀粉分子间互作,实现感官品质导向的谷物淀粉类食品的加工制造。此外,针对需要长期加工和贮藏的谷物淀粉类食品,如啤酒、白酒的酿造涉及谷物淀粉的发芽、糖化和发酵等,也不断明晰了特定加工/贮藏条件和基质环境下淀粉分子结构和互作模式的演变规律及与感官品质的联系<sup>[31]</sup>,特别是淀粉贮藏过程中发生短期和长期回生导致的淀粉分子间的缔合,淀粉晶型、晶体大小及片层结构厚度的衍变与谷物淀粉类食品的硬度、弹性等质构特性的关系得到进一步明确。在此基础上,通过有限元分析、森林遗传、神经网络等算法,建立了加工制造过程中传热传质模型、分子转移模型、流体动力学模型、机械力学模型等,实现了谷物淀粉类食品感官品质的预测<sup>[32-34]</sup>。

除了外来引入的危害因子外,在谷物淀粉类食品加工和制造过程中,淀粉通过酶促和非酶促反应(美拉德、焦糖化),导致氧化、交联、降解,生成丙烯酰胺、杂环胺、5-羟甲基糠醛、晚期糖基化末端产物等不利于人体健康的危害产物,这关乎到谷物淀粉类食品的安全品质。目前,通过控制加工温度、时间、水分含量、pH值等加工条件,组合加工类型,添加外源物质(含多酚的植物提取物、蛋白水解物),复配食品组分等手段已经从源头和过程上控制了这些有害副反应的发生与进行<sup>[35]</sup>。此外,传统的气相/液相色谱串联质谱等检测谷物淀粉类食品基质中有害物质的标准化方法已经建立并趋于成熟。然而,由于昂贵的设备和检测成本,繁琐的预处理和纯化富集过程,基于COF、

MOF和磁性材料等新兴材料的固相(微)萃取方法也不断得到开发<sup>[17]</sup>。同时,基于食品基质褐变的颜色指示法,抗原抗体特异性结合的免疫反应法,量子点之间距离变化的荧光法,与识别体结合后生成物理化学、光学、温度、电流、磁信号等化学生物传感器法的发展实现了在复杂食品基质下<sup>[35-36]</sup>,快速、便捷、灵敏地检测食品有害加工产物,以抑制阻隔和消除痕量有害物,保证食品的安全品质。

谷物淀粉类食品的营养健康品质与主要营养成分——淀粉在人体胃肠道中消化吸收和代谢有关。当摄入谷物淀粉类食品后,淀粉会在胃肠道中酶解消化,被小肠吸收的酶解产物——葡萄糖会为人提供日常的能量需求,然而持续的高血糖水平会增加机体代谢负担。不被人体分泌的消化酶酶解的淀粉会进一步转运到结肠,结肠肠道菌群细胞膜表面的淀粉利用系统能够特异性识别淀粉,进而作为营养基质参与菌群细胞内生化反应,产生乙酸、丙酸、丁酸等短链脂肪酸。这些有益的代谢产物不仅作为营养物质进一步塑造肠道微生物群的组成和丰度,还具有提高免疫力,维持肠道完整性,促进糖脂代谢等健康益处。目前,基于控制淀粉靶向结肠酵解,促进人体健康的愿景,物理、化学、生物及联合技术被广泛运用到谷物淀粉类食品的加工和制造中,以实现营养品质导向的谷物淀粉类食品的创制。物理技术分为热加工和非热加工技术。热熔挤出、湿热处理等热加工技术能够促进淀粉颗粒的溶胀、糊化和熔融,调控淀粉多尺度结构,促进淀粉靶向酵解。相比于热加工技术,非热等离子体、超高静压、脉冲电场、微波辐射等非热加工技术由于加工时间短,加工效率高等优势,替代了传统热加工物理技术用以调控谷物淀粉类食品的营养品质<sup>[37]</sup>。值得注意的是,在物理加工过程中,与其它食品分子的相互作用常常被用来协同调节淀粉消化性能。脂肪酸、多酚、蛋白质、多肽和氨基酸等食品组分在加工过程中会与淀粉发生非共价相互作用(静电、疏水、氢键)和共价相互作用(美拉德反应),从而提高谷物淀粉类食品抵抗胃肠道消化酶消化的能力。化学加工技术主要通过氧化、酯化、醚化和酸水解等化学反应,为淀粉提供阳离子、疏水性、非离子或共价反应性取代基,赋予淀粉独特的糊化、流变、凝胶等

理化特性,改善淀粉与其它食品成分的互作模式,进而调控谷物淀粉类食品的消化及营养品质<sup>[38]</sup>。需要注意的是,由于化学基团的引入,化学改性的程度需要进一步的毒理学实验验证。酶法改性由于对作用位点的专一性,因此最大限度地减少了不良产物的形成,并且其反应温和,效率高,清洁环保<sup>[7]</sup>。改性所使用的糖苷酶主要分为糖基水解酶和糖基转移酶,包括 $\alpha$ -淀粉酶、 $\beta$ -淀粉酶、淀粉蔗糖酶、葡萄糖转移酶、异淀粉酶等。这些酶通过水解或转糖苷作用,改变淀粉链结构,进而控制谷物

淀粉类食品的消化特性,继而影响其营养健康效应<sup>[39]</sup>。

## 2.2 植物蛋白类食品

蛋白质是植物蛋白类食品中的主要成分,通过形成并稳定网络(凝胶和薄膜)、泡沫、乳液和溶胶等结构体系参与植物蛋白类食品的加工和制造。蛋白质一级结构、二级结构、三级结构、四级结构等结构的差异决定了其水合特性、表面活性、流变特性、乳化能力等理化和功能特性,进而影响植物蛋白类食品的感官品质、安全品质和营养品质<sup>[40]</sup>。

表 3 植物蛋白类食品加工和制造现状

Table 3 Processing and manufacturing of plant-protein-based foods

品质	加工和制造策略	技术手段	参考文献
感官	蛋白质柔性化加工;控制蛋白质与多酚等小分子互作偶联;蛋白质纤维化	超声、辐射	[41],[42]
		脱酰胺化、磷酸化、糖基化、琥珀酰化	[43],[44]
		褐藻多酚、阿魏酸、茶多酚	[45],[46]
		螺杆挤出、静电纺丝	[47],[48]
安全	建立精准检测过敏源的方法;运用热加工/非热加工新兴技术诱导过敏原的变性和降解	高水静压、微波辐照、脉冲电场	[49],[50]
		油炸、蒸煮、烘烤、热压	[51],[52]
		分子印迹、磁阻传感器、酶联免疫、荧光	[53],[54]
营养	重组蛋白组分;运用新兴加工方法,严格控制加工条件;稳定消除抗营养因子	挤出、微波、超声	[55],[56]
		固态发酵、浸没发酵	[57],[58]

目前植物基食品日渐兴起和风靡。由于植物蛋白可补充或部分替代部分动物蛋白的不足,因此被广泛运用到植物基饮料、植物基乳制品、植物基肉制品、植物蛋制品和植物基发酵食品等的制备过程,成为食品产业科技的热点。然而,这些食品具有独特的风味和质地属性,利用植物蛋白质替代原料来制备并不能完全复制其感官品质。目前,采用蛋白质柔性化加工、蛋白质与多酚等小分子互作偶联和蛋白质纤维化方法改变蛋白多尺度结构,增强蛋白质的水合能力、乳化能力、发泡能力、带电性能等理化性质,进而改善这些植物基蛋白食品的外观、质地、风味等感官品质。蛋白质的柔性区间是指在蛋白质分子中的空间结构易于发生改变的部分,它反映了蛋白质构象的可变性、运动性,从而决定蛋白质在加工和制造过程中所表现的乳化性质、发泡性质、溶解度等<sup>[59]</sup>。微波、超声等物理加工技术,脱酰胺化、磷酸化、琥珀酰化和糖基化等化学修饰,碱性蛋白酶、蔗糖酶酶解等生物酶解已被证明能够提高植物蛋白的柔性,改善

植物蛋白基食品的感官品质<sup>[60-61]</sup>,包括提高饮料乳液的稳定性、均一性和色泽,增加凝胶的弹性和咀嚼性,降低/消除苦味涩味,增加鲜味。当多酚等小分子物质存在时,蛋白质通过非共价和共价相互作用形成偶联物,提高热稳定性和抗氧化活性,并改善乳化能力和凝胶性能等<sup>[62-63]</sup>。蛋白质与多酚之间的非共价相互作用涉及氢键、疏水相互作用和静电相互作用。不同于可逆的非共价形成的偶联物,由于共价键具有更强和更持久的稳定性,因此通过非酶促(碱性反应或自由基接枝)或酶促反应与多酚共价偶联形成的共轭物更适用于植物蛋白类食品的加工和制造,增强植物蛋白质类食品的感官品质<sup>[45]</sup>。严格控制互作温度、pH 值、蛋白质和多酚种类,利用和调节蛋白质与多酚相互作用的作用力类型和强度,对于导向感官品质的植物蛋白类食品加工和制造十分关键<sup>[64-65]</sup>。蛋白质的纤维化加工被广泛运用于制备植物基肉制品,以赋予植物蛋白类食品类似于肉制品纤维样的质地和硬度、嫩度和弹性等感官品质<sup>[66]</sup>。湿法纺丝、静电纺

丝、溶液吹气纺丝等手段已被运用制备蛋白纤维,然而,这些手段仍处于实验室阶段,而螺杆挤出因产量大、无废水、连续化加工等优势,故已成功用于植物蛋白基肉制品的产业化生产<sup>[47,67]</sup>。

如上所述,蛋白质能够提供氨基基团参与美拉德羰氨缩合反应,生成丙烯酰胺、杂环胺、5-羟甲基糠醛、晚期糖基化末端产物等副反应产物,影响植物蛋白类食品的安全品质。除此之外,植物蛋白的致敏性同样关乎安全品质导向的植物蛋白类食品加工制造<sup>[68]</sup>。豆类中的主要过敏原主要包括 $\alpha$ 凝集素(legumin-like)、 $\beta$ 凝集素(vicilin-like)和 $\delta$ 凝集素(2S albumins),谷物中存在的过敏原主要是麸质蛋白,包括醇溶蛋白和谷蛋白,以及 $\alpha$ -淀粉酶/胰蛋白酶抑制剂<sup>[69]</sup>。这些过敏原通常与人体免疫蛋白IgE结合引发免疫反应,导致腹泻水肿,甚至引起休克危害生命。目前,传统的热加工技术(干燥、蒸煮、高压灭菌)被利用以诱导蛋白质变性,降低植物蛋白的致敏性,然而,由于部分致敏蛋白对热、酸环境稳定,并具有抗蛋白酶水解性,因此,高静水压、辐照、冷等离子体等新兴非热加工技术在提高植物蛋白类食品安全品质方面备受关注<sup>[70-71]</sup>。在这些加工过程中,蛋白质会聚集、交联、降解,或是氧化、脱氧、脱羧,导致一、二、三、四级结构破坏,IgE可识别结构域缺失,从而无法引发机体免疫反应。此外,液相-质谱、免疫印迹、碳点荧光技术等用来精准检测植物蛋白类食品中潜在的过敏原,从而保障植物蛋白类食品的安全加工与制造。

植物蛋白质类食品的营养健康品质主要取决于蛋白质的氨基酸谱及其生物利用度和蛋白质消化率。通常,植物蛋白含有丰富的氨基酸组成和多种必需氨基酸,从而被广泛替代动物蛋白和乳蛋白,制造植物基牛奶、鸡蛋和肉制品等植物蛋白类食品<sup>[72-73]</sup>。然而,由于缺乏限制性氨基酸,影响其它氨基酸的利用度和蛋白消化率,通常需要复配以提高植物蛋白类食品的营养品质,如豆类蛋白缺乏含硫氨基酸(蛋氨酸和半胱氨酸),谷物蛋白大多含有低水平的赖氨酸<sup>[74-75]</sup>。此外,植物蛋白含有蛋白酶抑制剂、凝集素、植酸、多酚等抗营养因子,降低蛋白质的消化和吸收效率,影响植物蛋白类食品的营养品质。目前,蒸熟、微波、辐照、发酵

酶解和挤出等技术手段被广泛运用于植物蛋白类食品加工制造中,以提高其营养品质<sup>[76-77]</sup>。一方面,这些加工技术能够使植物蛋白全部或部分变性,诱导蛋白质各级结构和构象的改变,产生游离多肽和短肽,这有利于胃肠道中消化酶的酶解,提高了蛋白质的消化率。然而,热加工技术会导致蛋白质或氨基酸与羰基化合物发生美拉德反应生成羰氨化合物,或是糖基化,或是诱导氨基酸交联,蛋白质-蛋白质相互作用和外消旋化,从而改变氨基酸的组成,降低蛋白质的生物利用度<sup>[78]</sup>。此外,蛋白质/氨基酸参与非酶促褐变形成各类副产物,如类黑素,这不仅影响蛋白质/氨基酸的酶解消化,还会抑制蛋白质消化酶的生物活性。因此,控制植物蛋白类食品制造过程的加工温度、时间和强度,对于提高植物蛋白类食品的营养品质是必要的。另一方面,这些加工技术还会破坏植物蛋白中存在的抗营养因子,降低其含量,从而限制蛋白质的消化吸收<sup>[79]</sup>。

### 2.3 油料油脂及乳液类食品

油脂主要来源于油菜籽、花生、大豆等油料作物,油脂及其乳液类食品的品质特性主要取决于油脂的种类及组成,并与提取效率密切相关;油脂中脂肪酸的组成及结构决定了其界面,加工、储存等理化和功能特性,从而影响其感官、安全和营养等品质<sup>[80-81]</sup>。

油脂具有复杂的脂肪酸组成以及微量成分(脂溶性维生素、植物多酚、植物甾醇、植物萜烯、植物黄酮、植物色素),这些物质在加工制造过程中赋予油料油脂及乳液食品特殊的风味、口感、质地等感官品质。目前,通过气/液相-质谱联用、电子舌、电子鼻等检测设备分析油料油脂及乳液食品中挥发性醛、酮类、碳氢化合物、醇类、羧酸、呋喃、吡嗪类、吡啶类和酯类等风味物质基础,在精炼、油炸、蒸炒、烘焙等不同加工制造下形成的风味化合物对食品风味的贡献关系逐渐被揭秘。此外,对油脂风味形成机制的不断探索,包括脂质氧化及脂质氧化产物与美拉德反应产物/淀粉/蛋白的相互作用,通过控制和改变不同加工方法的温度、时间、强度、pH值、酸碱性和基质成分,具有油脂味、烧烤味、焦味、陈旧味、典型的油脂香气、油味、新鲜的水果味、烤土豆味和坚果味等不同风

表4 油料油脂及乳液类食品加工和制造现状

Table 4 Processing and manufacturing of oil materials-, oil- and emulsion-based foods

品质	加工和制造策略	技术手段	参考文献
感官	明晰不同加工方法/条件/基质下形成的油脂风味基础;稳定不	精炼、油炸、蒸炒、烘焙	[82],[83]
	同原料、pH值、互作基质等环境下的油脂乳液体系	微波、电场	[84]
安全	控制加工条件,运用新兴方法阻止有害副反应的发生;利用天	新型提取、脂肪分提、酯交换	[85]
	然抗氧化剂阻断脂质氧化的自由基诱发和传递;利用新型吸	适温、抗氧化	[86],[87]
	附剂去除有害氧化产物	复合吸附	[88]
营养	酶法靶向破除油脂体结构;优化油脂提取精炼过程;发掘新型	酶法提取	[89],[90]
	油料资源及功能性油脂;结构化油脂	冷榨、热榨、溶剂萃取、超临界、亚	[91],[92]
		临界、超声微波辅助	
		特种油脂	[93],[94]
		甘油三酯重构技术	[95],[96]

味感官的油料油脂及乳液食品不断被加工制造出来<sup>[97-98]</sup>。此外,在稀奶油、冰淇淋、乳液等 O/W 乳液食品体系中,乳液界面稳定性和抗氧化性也是影响食品感官品质的关键指标。解析、调控和利用油脂在 O/W 体系中的空间分布,在两相中的驱动力、分子间静电吸附、共价作用、界面自组装,以及脂与不同类型乳化剂、蛋白质、糖类相互作用,是实现感官品质导向的油料油脂及乳液食品加工制造的关键途径之一。

保障油脂品质安全主要在于控制油脂加工过程中的无氧、有氧劣变。在油脂典型加工过程中,既要控制无氧条件下脂肪酸发生的非酶催化氧化、聚合反应、水解反应、金属离子催化氧化,从而导致的脂肪酸反式化、异构化、共轭化、双键移位,生成反式脂肪酸、环式脂肪酸、异构脂肪酸、共轭脂肪酸等劣变产物<sup>[99]</sup>;又要控制有氧环境下,自由基与氧气的反应导致不饱和脂肪酸自动氧化,光、金属离子、高温等因素加速的脂肪酸氧化,生成各种次级产物,有害于人体健康。同时,要控制油脂精炼过程中,甘油二酯缩水生成缩水甘油酯和氯化形成 3-氯丙醇酯,这些危害因子可能存在致癌致畸的风险<sup>[100]</sup>,以及不饱和脂肪酸双键反化形成反式脂肪酸的风险。危害物发生、进程和去除等源头、过程到末端去除技术已用于提升油脂及乳液食品的安全性;天然多酚、维生素等抗氧化剂能够清除自由基、螯合金属离子和猝灭单线态氧,抑制脂质自动氧化,从而防止脂质自动氧化发生的技术在应用<sup>[101]</sup>;碳纳米管、共价有机框架和金属有机

框架等新型吸附剂高效吸附油脂中丙烯酰胺等油脂氧化有害产物<sup>[17]</sup>得到应用。此外,油料作物(如花生、玉米、棉籽、油菜籽等)在生长和储存过程中容易受到真菌毒素感染,产生黄曲霉素、赭曲霉素和呕吐毒素等影响油脂的食用安全性,化学防腐剂和天然防腐剂均被用于抑制真菌的滋生,天然抗氧化剂由于环保无毒、来源广泛,在抑制黄曲霉素和赭曲霉素的生成方面被广泛运用<sup>[102]</sup>。此外,微波、紫外线、脉冲光、电解水、冷等离子体、臭氧、电子束和伽马辐照处理的新型加工技术也被用于抑制真菌滋生或者降解真菌毒素<sup>[103]</sup>。

油脂具有维持机体细胞生物结构稳定,作为信号传导因子改善机体健康以及作为能量储存物质等营养功能<sup>[104]</sup>。油料油脂及乳液类食品的营养品质主要取决于油脂的组成及结构,脂肪酸比例,特别是必需脂肪酸比例,以及所含植物多酚、脂溶性维生素等营养伴随物质的种类与数量<sup>[105]</sup>,它们与油脂胃肠道吸收转化效率,发挥营养潜能和程度有关。目前,营养品质导向的油料油脂及乳液类食品的加工制造主要集中在高品质油脂的提取,新型功能油脂挖掘和结构化油脂创制等方面,通过对油料中油脂体的结构解析,明确油脂体中油脂与磷脂、蛋白等油脂体膜之间互作机制,以及油脂体的结构稳定性影响因素<sup>[106-107]</sup>,实现靶向破除油料中油脂的“护卫”系统;明晰新型溶剂(超临界 CO<sub>2</sub>)和新兴技术(超声微波辅助、酶辅助和膜技术)辅助的脱胶、脱酸、脱色和脱臭等油脂精炼全过程以及作用机制;挖掘油莎豆等新型优质油料

特性,提升油脂的提取率,降低植物甾醇、维生素E等营养物质的损失,有效提升油脂产出数量与质量,增强油料油脂及乳液类食品的营养品质。此外,挖掘葫芦籽油、番茄籽油、葡萄籽油和鳄梨油等新型功能油脂资源,进一步拓宽油料油脂及乳液类食品的营养健康功效;研究和挖掘中长链甘油三酯食用油(MLCT)、甘油二酯食用油(DAG)、共轭亚油酸油脂(CLA)等结构重构技术和健康作用机制,发挥结构化油脂的吸收代谢能力,促进机

体氮平衡和改善胰岛素抵抗的健康作用<sup>[108]</sup>。

## 2.4 全谷物食品

全谷物食品是指那些在加工过程中保留了谷物原始结构中的主要部分——胚、胚乳和种皮的食品。这与精制谷物不同,精制谷物在加工过程中去除了胚和种皮,仅保留了淀粉质胚乳。因此,不同于精深加工食品,感官品质、安全品质和营养品质导向的全谷物食品的加工制造面临着更复杂的挑战。

表5 全谷物食品加工和制造现状

Table 5 Processing and manufacturing of whole grain foods

品质	加工和制造策略	技术手段	参考文献
感官	育种和生物技术改良谷物品质;运用物理和化学技术,通过添加外源物质改善加工品质	挤出、碾磨、微粉化	[109]
		乳酸菌发酵、脂肪酶、纤维素酶酶解	[110]
		黄原胶、瓜尔胶	[111]
安全	利用生物、物理手段降解、吸附、消除外源污染因子;建立创制、精准、方便、快捷、低成本检测方法和技术	臭氧、微波辐照	[112]
		植物乳杆菌、枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌	[113],[114]
营养	运用和结合新兴加工技术;优化生产工艺,创制生产设备	免疫层析、酶联免疫、电化学、生物传感器	[115],[116]
		发芽、分馏	[117],[118]
		微波和热风联合、红外线和热风联合、微波和流化床干燥机联合	[119]

与精制谷物相比,全谷物含有更多主要分布在麸皮和胚中的健康物质,包括膳食纤维、维生素、酚类、类胡萝卜素、 $\gamma$ -氨基丁酸和木质素。在全谷物加工制造过程中,这些物质的存在会降低全谷物食品的感官品质。通常,不溶性膳食纤维在食品基质中发生相分离,导致全谷物食品具有较硬的口感,颜色和质地不均匀的食品外观,以及不稳定的食品结构;此外,羧基肉桂酸、阿魏酸等酚类化合物会带来苦味和涩味。目前,通过育种或原材料的选择,碾磨、分馏、微粉化、挤出等物理技术,微生物发酵、酶解、成分的发芽等生物技术,以及添加外源物质结合或掩盖苦味分子等手段,实现了感官品质导向的全谷物食品加工制造<sup>[120]</sup>。

由于全谷物保留胚乳、胚和种皮等完整结构,全谷物食品的加工和制造往往比精深加工食品面临更多的污染源,包括物理污染,如重金属;化学污染,如杀虫剂和农药;生物污染,如脱氧雪腐镰刀菌烯醇和黄曲霉毒素,影响全谷物食品的安全品质,进而危害人体健康。目前,除了传统标准化

的液/气相-质谱联用技术,基于功能核酸介导的等温扩增、电流电压电阻、荧光、拉曼和等离子体等物理化学生物传感器,免疫层析技术、酶联免疫技术、纳米技术等方法已经建立,能够在复杂食品基质中同时方便、快捷地检测出物理化学和生物污染因子<sup>[115-116,121-122]</sup>。此外,磁性碳纳米管、共价金属有机框架等新型吸附材料被合成去除全谷物食品中有害因子,同时,臭氧、辐照等物理手段,产生特异性降解酶的细菌等生物手段被运用有效降解全谷物食品中的有机分子和真菌毒素<sup>[123-125]</sup>。

全谷物富含碳水化合物和蛋白质,并提供多种膳食纤维、生物活性植物化学物质、维生素和矿物质。然而,全谷物从种植到食用要经过不同的过程,包括脱壳、碾磨、挤出、蒸煮、高压、烘烤和微波处理,这些过程会改变其酚类和膳食纤维的特性,同时降低植物化学成分并减少其生物利用度,进而导致全谷物食品营养品质的降低<sup>[126-127]</sup>。目前,基于全谷物的干燥、储存、加工和制造过程全产业链控制方案的逐渐建立和完善,确保了全谷物食品



的营养健康品质。低升糖指数、高可溶性膳食纤维、矿物质、植物化学物质含量和高生物利用度的谷物作物提高了全谷物食品的营养品质<sup>[128]</sup>。超细碾磨、微粉化、挤出蒸煮、浸泡发芽等物理加工技术,木聚糖酶、 $\beta$ -葡聚糖酶、 $\alpha$ -淀粉酶、纤维素酶和阿魏酸酯酶等生物酶解技术以及组合技术已被运用到全谷物的加工和制造过程,延缓了淀粉消化,增加可溶性膳食纤维含量,提高了蛋白质、酚酸、维生素和矿物质的吸收利用效率和生物利用度,以改善全谷物食品的营养健康品质<sup>[129-130]</sup>。此外,针对目前全谷物整体碾磨和/或其它加工处理、全谷物分馏分离碾磨和/或其它加工处理等两个不同全谷物生产流程方案,一系列新工艺和新设备的开发设计和实施,正助力于营养健康品质导向的全谷物食品加工制造<sup>[131]</sup>。

### 3 品质导向的粮油食品加工与制造面临的挑战

#### 3.1 粮油加工适宜性和加工技术与设备有待提升

在粮油食品加工领域,虽然技术和设备已取得一定的进展,但是相比于日益增长的市场需求和消费者对高品质食品的期望,基础研究的滞后以及加工技术和设备的局限性仍然显著。首先,基础研究在了解原料特性、加工适宜性及其对最终产品品质的影响和现有技术对不同加工原料作用原理等方面还不够深入。这种研究的不足限制了加工工艺的优化和产品创新的潜力。其次,现有的加工技术和设备在提高效率,节能减排,保持或增强食品营养价值方面还有待提高。特别是在应对复杂原料,实现精准加工以及满足特定食品品质要求方面,现有技术和设备亟待提升。此外,粮油食品加工涉及复杂的物理化学反应过程和组分的多尺度结构转变,缺乏精准表达粮油食品加工过程中关键特征的预测模型,以反映粮油加工过程中在多参数作用下跨尺度与时空的变化规律,从而限制了整个加工流程的智能化和自动化。亟待对粮油食品加工过程中多维品质变化的在线感知检测,加工过程条件控制品质的大数据关联模型的建立,加工装备过程中组分的变化及其过程仿真模拟和食品复杂工程的人工智能决策等的不断突破。

#### 3.2 粮油营养健康品质评价基础数据和理论依据缺乏

虽然粮油作为人类膳食的基础,其营养价值和健康效益被广泛认可,但是粮油食品营养健康品质的科学评价缺少,基础研究和理论依据不足。目前关于粮油食品的营养成分的数据往往集中在宏观营养素上,而对于微量营养素和生物活性物质等关键成分的功能性评价相对缺乏,特别是健康效应的分析方法及体外模拟、细胞、动物等多维评价模型的建立,碳水化合物、蛋白质、脂质等代谢组学的靶向和非靶向分析与关键数据解析等。同时,全产业链过程中的储存条件和加工方法等多种因素会影响粮油食品的营养组分,导致粮油食品的营养健康品质存在较大的变异性。此外,现有的评价方法和理论模型未能充分考虑食品在加工和消化过程中的复杂生物化学变化,这限制了对食品营养价值和健康影响的全面深入的了解。

#### 3.3 粮油加工中风险物形成转化与主动防控困难

粮油食品加工过程中涉及多种复杂的生物化学反应,如美拉德反应、碳水化合物、蛋白质、脂肪和微量营养素的降解和生物转化、脂质氧化等会生成丙烯酰胺、呋喃、糠醛、氯丙醇、杂环胺和生物胺等危害物;面临多种外来危险因子的污染,包括重金属、有机分子、农药和真菌生物毒素。这些危害物生成途径多样且复杂,如呋喃不仅来源于抗坏血酸和氨基酸的热降解,也可由多不饱和脂肪酸和类胡萝卜素的热氧化产生;并且在食品基质中隐蔽存在,检测困难,如真菌毒素可与碳水化合物和蛋白质结合。因此,复杂基质的粮油食品中微量痕量风险物检测,加工过程中有效抑制风险物生成,阻断有害反应进程,消除已存在的风险物,控制食品安全加工和制造等主动防控成为粮油食品安全加工和制造的重大难题。此外,实现无营养损害和感官品质恶化的危险减损与风险防控的协同实施,多元物理化学、生物危害物的同步检测,阻隔、抑制和消除体系的建立和创新,涉及粮油加工中风险物形成转化机制的明晰,粮油精深加工智能化装备的创新研发,全过程营养风险大数据的系统管控等挑战,需要从粮油加工危害物产生的机制和条件,检测方法和检测材料的有效创制,主动防控与过程控制的工业适用等多方面系统统筹。

### 3.4 粮油食品加工与制造过程对多维品质的精准调控机制复杂

品质靶向的粮油食品加工和制造过程存在机制复杂且具有不明确性的特点,是由于加工过程中涉及多组分的复杂生物化学反应和物理变化。这些变化受原料特性、加工类型和加工条件等多种因素的影响,导致品质靶向的粮油食品精准加工制造成为挑战。在蒸煮、冷藏(冻)、挤压、均质、膨化、烘焙、油炸、酶解、发酵等各类加工处理过程中,粮油食品中淀粉/膳食纤维的糊化、融化、凝胶化、降解、官能团化,蛋白质的解聚、链展开、重排、降解,脂质的氧化、异构化、水解等结构演变,以及各位微量营养素和各组分之间的组装、缔合、聚集、相分离、交联、反应等非共价和共价相互作用都对粮油食品的感官品质、安全品质和营养品质产生重要影响。这些变化的具体类型及机制因原料种类和加工条件而异。其次,淀粉、蛋白质、脂质和植物次级代谢物等营养物质的相互作用与结构重组与品质靶向调控之间存在协同、相加和拮抗等作用,导致粮油食品差异化的品质特性。此外,基于协同调控多维粮油食品品质的加工基础理论体系下,运用传统和新兴技术设备,如何有效关联和全面实施加工条件控制,加工体系改变和食品成分复配技术手段,实现多维品质的精准调控机制仍然具有挑战性,特别是在减糖减盐减脂的前提下,如何建立组合食品成分,改进加工条件,优化加工工艺,以确保粮油食品安全、营养和感官品质。

## 4 品质导向的粮油食品加工与制造的未来研究方向

### 4.1 提高粮食与油料主要营养成分和副产物的加工适应性

深入了解不同品种来源的粮食与油料中营养成分的加工稳定性,拓展粮食加工可食副产物的多元化利用途径,提升粮油和可食副产物的加工适应性,对于协同调控粮油食品感官品质、安全品质和营养品质,增值化、节能化、高效化粮油食品产业具有重要意义。目前,人们对于各种营养物质在加工过程中的行为和稳定性已有一定的认识,然而这一领域仍存在许多未探明的问题。例如,不

同类型的淀粉、蛋白质、脂肪酸和微量营养素在各种加工条件下(例如高温、高压、酸碱环境、微波、辐射)的结构演变,理化性质和品质功能变化;粮油加工副产物——米糠、碎米、糠粉等高效增值利用途径下的适应性等。此外,通过对现有加工流程的建模优化以减少营养损失并提高粮油食品的整体品质,探索新兴加工技术以替代传统加工技术提高粮油食品加工效率及改善粮油组分加工性能,利用粮油生物基可降解包材替代石油基塑料包材拓宽粮油食品产业,也是促进粮油食品高质化创新发展的关键。

### 4.2 阐明粮油食品加工储藏过程中主要营养成分变化规律与互作机制

碳水化合物、蛋白质、脂肪以及各种微量营养素在加工储藏过程中不仅各自发生变化,还会在分子水平通过氢键、疏水、静电、范德华力等非共价相互作用,或通过氧化、加成、取代、消除、环化、交联反应等共价相互作用,在介观、微观和宏观水平上各多尺度结构相互交织重构形成微粒、乳球或是相分离等新的跨尺度结构。这些相互作用会影响粮油食品的感官品质、安全品质和营养健康品质。因此,需要充分明晰粮油食品加工储藏过程中主要营养成分互作机制,探索不同加工条件(温度、强度、水分、pH值等)对营养成分之间相互作用类型的影响,运用分子模拟、理论计算等计算机技术验证分子间相互作用,对于全面了解并优化利用粮油食品加工储藏过程中的营养成分互作机制,生产出品质导向的粮油食品至关重要。

### 4.3 明晰粮油食品加工对品质影响的多层次交互作用

粮油食品加工过程中对感官品质、安全品质和营养健康品质等品质特性的影响体现了复杂的多层次交互作用。首先,食品加工会影响食品品质的多个方面,比如在感官品质方面,烘焙或油炸不仅改变食品的质地和外观,还通过化学反应如美拉德反应,形成独特的风味和香气。其次,食品加工会同时影响多种食品品质,比如一方面可能增强某些营养成分的生物利用度,另一方面可能改变食品质构而降低感官体验。同时,不同加工技术的组合能够协同影响粮油食品的各类品质。因此,了解和控制这些交互作用,是提升食品品质和满

足消费者需求的关键。

#### 4.4 建立多维品质与加工过程构效关系及关联调控机制

品质导向的粮油食品加工制造的重点是不断探索多维品质与加工过程之间的构效关系及其关联调控机制,其核心在于深入了解加工技术如何综合影响食品的感官品质、安全品质和营养健康品质,并在此基础上开发出既高效智能又可持续的加工方法。首先,通过先进的分析技术和生物化学方法,详细研究加工条件如何影响食品的多尺度结构、加工特性和功能品质。特别需要明确加工过程中调控粮油食品感官、安全和营养等品质的关键参数,以便需要更精确的控制和优化。其次,重视模型建立和预测分析,以明确加工方法-加工条件-结构变化-理化性质改变-功能品质靶向的精确关联关系链,预测不同加工条件对食品多维品质的影响。这些模型有助于指导生产实践,优化加工流程,并实现产品品质的一致性和可预测性。建立起多维品质与加工过程的构效关系和模型后,结合人工智能、在线分析与检测等,向自动化智能化加工发展。

#### 参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 306-307.  
National Bureau of Statistics. China statistical year-book[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023: 306-307.
- [2] CHI C D, LI X X, HUANG S X, et al. Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 154-168.
- [3] ZHANG J Y, ZHAO F F, LI C M, et al. Acceleration mechanism of the rehydration process of dried rice noodles by the porous structure[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137050.
- [4] SHEN S D, CHI C D, ZHANG Y P, et al. New insights into how starch structure synergistically affects the starch digestibility, texture, and flavor quality of rice noodles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 731-738.
- [5] ESHAG O M F, MOHAMED A A, MOHAMED A I A, et al. Acetylated corn starch as a fat replacer: Effect on physicochemical, textural, and sensory attributes of beef patties during frozen storage[J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132988.
- [6] MOIN A, ALI T M, HASNAIN A. Characterization and utilization of hydroxypropylated rice starches for improving textural and storage properties of rice puddings [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105(P1): 843-851.
- [7] FAN C, LI X X, WANG Y L, et al. Effects of maltogenic  $\alpha$ -amylase on physicochemical properties and edible quality of rice cake[J]. Food Research International, 2023, 172: 113111.
- [8] ZHAO F F, LI Y, LI C M, et al. Exo-type, endo-type and debranching amyolytic enzymes regulate breadmaking and storage qualities of gluten-free bread[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 298: 120124.
- [9] LI Y, ZHAO F F, LI C M, et al. Fine structures of added maltodextrin impact stability of frozen bread dough system [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 298: 120028.
- [10] HUANG S X, CHI C D, LI X X, et al. Understanding the structure, digestibility, texture and flavor attributes of rice noodles complexation with xanthan and dodecyl gallate [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107538.
- [11] JEBALIA I, DELLA V G, GUESSASMA S, et al. Cell walls of extruded pea snacks: Morphological and mechanical characterisation and finite element modelling [J]. Food Research International, 2022, 162(PB): 112047.
- [12] DE P T. Application of fuzzy logic system for the pizza production processing optimisation[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 319: 110906.
- [13] NATEGHI L, HOSSEINI E, FAKHERI M A. The effect of cold atmospheric plasma pretreatment on oil absorption, acrylamide content and sensory characteristics of deep-fried potato strips[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101194.
- [14] LUA H Y, NAIM M N, MOHAMMED M A, et al. Inhibition of acrylamide formation in potato strip by ultrasonic-treated methylcellulose batter[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(6): 3292-3302.
- [15] ONACIK G S, SZAFRAŃSKA A, ROSZKO M, et

- al. Interaction of dough preparation method, green tea extract and baking temperature on the quality of rye bread and acrylamide content[J]. *LWT*, 2022, 154: 112759.
- [16] CONSTANTINO C, KOUTSIDIS G. Investigations on the effect of antioxidant type and concentration and model system matrix on acrylamide formation in model Maillard reaction systems[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197(PA): 769–775.
- [17] WANG T X, LIU W, CHEN L, et al. Carboxyl-functionalized covalent organic frameworks for the efficient adsorption of foodborne heterocyclic aromatic amines [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146044.
- [18] VARMIRA K, ABDI O, GHOLIVAND M B, et al. Intellectual modifying a bare glassy carbon electrode to fabricate a novel and ultrasensitive electrochemical biosensor: Application to determination of acrylamide in food samples [J]. *Talanta*, 2018, 176: 509–517.
- [19] CHENG B X, XIA X H, HAN Z Q, et al. A ratiometric fluorescent ‘off-on’ sensor for acrylamide detection in toast based on red-emitting copper nanoclusters stabilized by bovine serum albumin[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437(P1): 137878.
- [20] YANG Y Y, BAO H Y, WANG Y H, et al. Mechanisms of rice protein hydrolysate regulating the *in vitro* digestibility of rice starch under extrusion treatment in terms of structure, physicochemical properties and interactions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253(P6): 127315.
- [21] YANG Y Y, WANG Y H, JIAO A Q, et al. Understanding the mechanisms of  $\beta$ -glucan regulating the *in vitro* starch digestibility of highland barley starch under spray drying: Structure and physicochemical properties[J]. *Food Chemistry*, 2024, 441: 138385.
- [22] ZHANG Y, LI L J, SUN S L, et al. Structural characteristics, digestion properties, fermentation properties, and biological activities of butyrylated starch: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 330: 121825.
- [23] CAI C X, WEI B X, TIAN Y Q, et al. Structural changes of chemically modified rice starch by one-step reactive extrusion[J]. *Food Chemistry*, 2019, 288: 354–360.
- [24] REN J Y, CHEN S D, LI C M, et al. A two-stage modification method using 1,4- $\alpha$ -glucan branching enzyme lowers the *in vitro* digestibility of corn starch [J]. *Food Chemistry*, 2020, 305 (C): 125441.
- [25] JI H Y, LI X X, BAI Y X, et al. Synergetic modification of waxy maize starch by dual-enzyme to lower the *in vitro* digestibility through modulating molecular structure and malto-oligosaccharide content [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 180: 187–193.
- [26] SUN S L, HONG Y, GU Z B, et al. An investigation into the structure and digestibility of starch-oleic acid complexes prepared under various complexing temperatures[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 138: 966–974.
- [27] SUN S L, JIN Y Z, HONG Y, et al. Effects of fatty acids with various chain lengths and degrees of unsaturation on the structure, physicochemical properties and digestibility of maize starch-fatty acid complexes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106224.
- [28] ZHANG Y Y, GU Z B, ZHU L, et al. Comparative study on the interaction between native corn starch and different hydrocolloids during gelatinization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 116: 136–143.
- [29] LI W D, GU Z B, CHENG L, et al. Effect of endogenous proteins and heat treatment on the *in vitro* digestibility and physicochemical properties of corn flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108220.
- [30] WANG Y, CHEN L, YANG T Y, et al. A review of structural transformations and properties changes in starch during thermal processing of foods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106543.
- [31] YU W W, ZHAI H L, XIA G B, et al. Starch fine molecular structures as a significant controller of the malting, mashing, and fermentation performance during beer production[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 296–307.
- [32] GUESSASMA S, CHAUNIER L, DELLA V G, et al. Mechanical modelling of cereal solid foods [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2011, 22 (4): 142–153.
- [33] OZTURK O K, TAKHAR P S. Water transport in starchy foods: Experimental and mathematical aspects[J]. *Trends in Food Science & Technology*,

- 2018, 78: 11–24.
- [34] BEHERA G, SUTAR P P. A comprehensive review of mathematical modeling of paddy parboiling and drying: Effects of modern techniques on process kinetics and rice quality[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75: 206–230.
- [35] MAAN A A, ANJUM M A, KHAN M K I, et al. Acrylamide formation and different mitigation strategies during food processing – A review[J]. *Food Reviews International*, 2022, 38(1): 70–87.
- [36] ZHANG Z N, CHEN Y, DENG P, et al. Research progress on generation, detection and inhibition of multiple hazards – acrylamide, 5-hydroxymethylfurfural, advanced glycation end products, methylimidazole – in baked goods[J]. *Food Chemistry*, 2024, 431: 137152.
- [37] WU Z T, QIAO D L, ZHAO S M, et al. Nonthermal physical modification of starch: An overview of recent research into structure and property alterations [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 203: 153–175.
- [38] WANG Z Y, MHASKE P, FARAHNAKY A, et al. Cassava starch: Chemical modification and its impact on functional properties and digestibility, a review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107542.
- [39] PUNIA B S, ASHOGON A O, SINGH A, et al. Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 287: 119265.
- [40] MIRMOGHTADAIE L, SHOJAEE A S, HOSSEINI S M. Recent approaches in physical modification of protein functionality[J]. *Food Chemistry*, 2016, 199: 619–627.
- [41] WANG Y C, LI B L, GUO Y N, et al. Effects of ultrasound on the structural and emulsifying properties and interfacial properties of oxidized soybean protein aggregates [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 87: 106046.
- [42] WANG Y Y, ZHANG A Q, WANG X B, et al. The radiation assisted–Maillard reaction comprehensively improves the freeze–thaw stability of soy protein–stabilized oil–in–water emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105684.
- [43] HAN L, LI J L, JIANG Y T, et al. Changes in the structure and functional properties of soybean isolate protein: Effects of different modification methods[J]. *Food Chemistry*, 2024, 432: 137214.
- [44] LIAN Z T, YANG S, DAI S C, et al. Relationship between flexibility and interfacial functional properties of soy protein isolate: Succinylation modification [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(14): 6454–6463.
- [45] CHENG L, LIAN Z T, LIU X Y, et al. Effect of phlorotannins modification on the physicochemical, structural and functional properties of soybean protein isolate and controlled hydrolysates: Covalent and non-covalent interactions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 149: 109591.
- [46] CHENG X Y, WANG H, WANG Z Y, et al. Development and characteristics of emulsion gels with microwave–assisted ferulic acid covalently modified soy protein: Structure, function and digestive properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 146 (PA): 109230.
- [47] TIAN T, REN K Y, CAO X R, et al. High moisture extrusion of soybean–wheat co–precipitation protein: Mechanism of fibrosis based on different extrusion energy regulation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 144: 108950.
- [48] NARTEA A, KUHLSKAYA A, FANESI B, et al. Legume byproducts as ingredients for food applications: Preparation, nutrition, bioactivity, and techno–functional properties [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(3): 1953–1985.
- [49] GARINO C, ZITELLI F, TRAVAGLIA F, et al. Evaluation of the impact of sequential microwave/ultrasound processing on the IgE binding properties of Pru p 3 in treated peach juice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(35): 8755–8762.
- [50] LIU Y F, OEY I, BREMER P, et al. Proteolytic pattern, protein breakdown and peptide production of ovomucin–depleted egg white processed with heat or pulsed electric fields at different pH[J]. *Food Research International*, 2018, 108: 465–474.
- [51] CABANILLAS B, CUADRADO C, RODRIGUEZ J, et al. Potential changes in the allergenicity of three forms of peanut after thermal processing [J]. *Food Chemistry*, 2015, 183: 18–25.
- [52] BAVARO S L, DI S L, MAMONE G, et al. Effect of thermal/pressure processing and simulated human

- digestion on the immunoreactivity of extractable peanut allergens[J]. *Food Research International*, 2018, 109: 126–137.
- [53] ASHLEY J, SHUKOR Y, D'AURELIO R, et al. Synthesis of molecularly imprinted polymer nanoparticles for  $\alpha$ -casein detection using surface plasmon resonance as a milk allergen sensor[J]. *ACS Sensors*, 2018, 3(2): 418–424.
- [54] NG E, NADEAU K C, WANG S X. Giant magnetoresistive sensor array for sensitive and specific multiplexed food allergen detection[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 80: 359–365.
- [55] OROZCO A X, ESPINOSA R J, SERNA S S O. Extrusion as a tool to enhance the nutritional and bioactive potential of cereal and legume by-products[J]. *Food Research International*, 2023, 169: 112889.
- [56] SÁ A G A, PACHECO M T B, MORENO Y M F, et al. Processing effects on the protein quality and functional properties of cold-pressed pumpkin seed meal[J]. *Food Research International*, 2023, 169: 112876.
- [57] PENG X H, LIAO Y, REN K Y, et al. Fermentation performance, nutrient composition, and flavor volatiles in soy milk after mixed culture fermentation[J]. *Process Biochemistry*, 2022, 121: 286–297.
- [58] GARRIDO G S, ASENSIO G A, CALVO L J, et al. The potential of fermentation on nutritional and technological improvement of cereal and legume flours: A review[J]. *Food Research International*, 2021, 145: 110398.
- [59] 江连洲. 食用蛋白质柔性化加工技术概述[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(8): 1–9.  
JIANG L Z. An introduction of the flexible processing technology of edible protin[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(8): 1–9.
- [60] ZHANG Q Z, TONG X H, SUI X N, et al. Antioxidant activity and protective effects of Alcalase-hydrolyzed soybean hydrolysate in human intestinal epithelial Caco-2 cells[J]. *Food Research International*, 2018, 111: 256–264.
- [61] LI L X, LIU S, SUN N, et al. Effects of sucrase enzymatic hydrolysis combined with Maillard reaction on soy protein hydrolysates: Bitterness and functional properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 256(P1): 128344.
- [62] DAI S C, LIAN Z T, QI W J, et al. Non-covalent interaction of soy protein isolate and catechin: Mechanism and effects on protein conformation[J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132507.
- [63] AMAGLIANI L, SILVA J V C, SAFFON M, et al. On the foaming properties of plant proteins: Current status and future opportunities[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118(PA): 261–272.
- [64] SUI X N, SUN H B, QI B K, et al. Functional and conformational changes to soy proteins accompanying anthocyanins: Focus on covalent and non-covalent interactions[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 871–878.
- [65] QUAN T H, BENJAKUL S, SAE L T, et al. Protein-polyphenol conjugates: Antioxidant property, functionalities and their applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 91: 507–517.
- [66] CHEN D, JONES O G, CAMPANELLA O H. Plant protein-based fibers: Fabrication, characterization, and potential food applications[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(20): 4554–4578.
- [67] DONG Y B, LAN T, WANG L Y, et al. Development of composite electrospun films utilizing soy protein amyloid fibrils and pullulan for food packaging applications[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 20: 100995.
- [68] LI P P, SHENG L N, YE Y L, et al. Allergenicity of alternative proteins: Research hotspots, new findings, evaluation strategies, regulatory status, and future trends: A bibliometric analysis[J/OL]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, (2024-01-08) [2024-04-15]. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2299748>.
- [69] MARUYAMA N. Components of plant-derived food allergens: Structure, diagnostics, and immunotherapy[J]. *Allergology International*, 2021, 70(3): 291–302.
- [70] DING Y Y, BAN Q F, WU Y, et al. Effect of high hydrostatic pressure on the edible quality, health and safety attributes of plant-based foods represented by cereals and legumes: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*,

- 2023, 63(20): 4636–4654.
- [71] PAN M F, YANG J Y, LIU K X, et al. Irradiation technology: An effective and promising strategy for eliminating food allergens[J]. *Food Research International*, 2021, 148: 110578.
- [72] ALROSAN M, TAN T C, MAT E A, et al. Recent updates on lentil and quinoa protein-based dairy protein alternatives: Nutrition, technologies, and challenges[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132386.
- [73] JESKE S, ZANNINI E, ARENDT E K. Past, present and future: The strength of plant-based dairy substitutes based on gluten-free raw materials [J]. *Food Research International*, 2018, 110: 42–51.
- [74] CHMIELEWSKA A, KOZŁOWSKA M, RACHWAŁ D, et al. Canola/rapeseed protein – nutritional value, functionality and food application: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(22): 3836–3856.
- [75] CAN K A, NICKERSON M, CAGGIA C, et al. Nutritional and functional properties of novel protein sources [J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(9): 6045–6077.
- [76] SÁ A G A, MORENO Y M F, CARCIOFI B A M. Food processing for the improvement of plant proteins digestibility[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(20): 3367–3386.
- [77] ALROSAN M, TAN T C, KOH W Y, et al. Overview of fermentation process: Structure–function relationship on protein quality and non-nutritive compounds of plant-based proteins and carbohydrates [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(25): 7677–7691.
- [78] ORLIEN V, AALAEI K, POOJARY M M, et al. Effect of processing on *in vitro* digestibility (IVPD) of food proteins[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(16): 2790–2839.
- [79] RAHMAN M M, LAMSAL B P. Ultrasound-assisted extraction and modification of plant-based proteins: Impact on physicochemical, functional, and nutritional properties[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(2): 1457–1480.
- [80] CHENG X Y, JIANG C Y, JIN J, et al. Medium- and long-chain triacylglycerol: Preparation, health benefits, and food utilization[J/OL]. *Annual Review of Food Science and Technology*, (2024-01-18) [2024-04-15]. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034539>.
- [81] YU J H, LU H J, ZHANG X H, et al. The triacylglycerol structures are key factors influencing lipid digestion in preterm formulas during *in vitro* digestion[J]. *Food Chemistry*, 2024, 443: 138546.
- [82] XU L R, JI X, WU G C, et al. Influence of oil types and prolonged frying time on the volatile compounds and sensory properties of french fries [J]. *Journal of Oleo Science*, 2021, 70(7): 885–899.
- [83] HUANG J H, HE H Y, WANG L J, et al. Effect of various microwave treatment parameters on the production of aldehydes in oil [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 125: 105712.
- [84] HUANG X Y, YOU Y, KARRAR E, et al. Effect of moderate electric field voltage on the quality and heat transfer characteristics of potato strips during deep-frying process[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 17: 100605.
- [85] YANG Y J, JIN J, YU L, et al. Sensory features of partially hydrogenated oil and their connection with melting and crystalline characteristics[J]. *Journal of Oleo Science*, 2023, 72(8): 745–754.
- [86] HUANG J H, WANG L J, GUO Y J, et al. Effects of amino acids on the formation and distribution of glycerol core aldehydes during deep frying[J]. *Food Research International*, 2023, 163: 112257.
- [87] KUGE Y, KANDA A, HARA S. Pursuit of oxidation behavior for conjugated polyenoil glycerols and establishment of their novel oxidation prevention method[J]. *Journal of Oleo Science*, 2009, 58(6): 295–301.
- [88] SHI L K, ZHENG L, JIN Q Z, et al. Effects of adsorption on polycyclic aromatic hydrocarbon, lipid characteristic, oxidative stability, and free radical scavenging capacity of sesame oil[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2017, 119(12): 1700150.
- [89] NIU R H, CHEN F S, ZHAO Z T, et al. Effect of papain on the demulsification of peanut oil body emulsion and the corresponding mechanism[J]. *Journal of Oleo Science*, 2020, 69(6): 617–625.
- [90] XU D X, GAO Q R, MA N N, et al. Structures and physicochemical characterization of enzyme extracted oil bodies from rice bran[J]. *LWT*, 2021, 135: 109982.
- [91] ZHANG Y F, LI T N, XU Z Y, et al. Comparison

- of the characteristics and oxidation kinetic parameters of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil products with different refining degree[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(10): e14753.
- [92] HUANG J H, CHEN C Y, SONG Z H, et al. Effect of microwave pretreatment of perilla seeds on minor bioactive components content and oxidative stability of oil [J]. *Food Chemistry*, 2022, 388: 133010.
- [93] GAO P, JIN J, LIU R J, et al. Chemical compositions of walnut (*Juglans regia* L.) oils from different cultivated regions in China[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2018, 95(7): 825–834.
- [94] CHEN Y H, WANG Y X, ZHENG X Y, et al. Novel disaturated triacylglycerol -rich fat from *Garcinia mangostana*: Lipid compositions, fatty acid distributions, triacylglycerol species and thermal characteristics [J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 197: 116506.
- [95] WANG Y D, WEI W, LIU R J, et al. Synthesis of eicosapentaenoic acid -enriched medium - and long-chain triglyceride by lipase-catalyzed transesterification: A novel strategy for clinical nutrition intervention[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(10): 4767–4777.
- [96] SHI C, CHANG M, LIU R J, et al. Trans-free Shortenings through the interesterification of rice bran stearin, fully hydrogenated soybean oil and coconut oil[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2015, 11(4): 467–477.
- [97] CHANG C, WU G C, ZHANG H, et al. Deep-fried flavor: Characteristics, formation mechanisms, and influencing factors[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(9): 1496–1514.
- [98] WANG X C, MCCLEMENTS D J, XU Z L, et al. Recent advances in the optimization of the sensory attributes of fried foods: Appearance, flavor, and texture[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 138: 297–309.
- [99] LI X, WU G C, HUANG J H, et al. Kinetic models to understand the coexistence of formation and decomposition of hydroperoxide during lipid oxidation[J]. *Food Research International*, 2020, 136: 109314.
- [100] XU L R, ZHANG Y B, GONG M Y, et al. Change of fatty acid esters of MCPD and glycidol during restaurant deep frying of fish nuggets and their correlations with total polar compounds[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(7): 2794–2801.
- [101] BAYRAM I, DECKER E A. Underlying mechanisms of synergistic antioxidant interactions during lipid oxidation[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 133: 219–230.
- [102] ALMEIDA N A, FREIRE L, CARNIELLI Q L, et al. Essential oils: An eco-friendly alternative for controlling toxigenic fungi in cereal grains[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(1): e13251.
- [103] JING G X, WANG Y Y, WU M P, et al. Photocatalytic degradation and pathway from mycotoxins in food: A review [J]. *Food Reviews International*, 2024, 40(1): 276–292.
- [104] WANG Z T, ZHAO J J, WANG Y D, et al. Advances in EPA-GPLs: Structural features, mechanisms of nutritional functions and sources[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 521–529.
- [105] HASHEMPOUR B F, TORBATI M, AZADMARD D S, et al. Vegetable oil blending: A review of physicochemical, nutritional and health effects [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 57: 52–58.
- [106] LIU R J, LIU R R, SHI L K, et al. Effect of refining process on physicochemical parameters, chemical compositions and *in vitro* antioxidant activities of rice bran oil[J]. *LWT*, 2019, 109: 26–32.
- [107] ZAABOUL F, ZHAO Q L, XU Y J, et al. Soybean oil bodies: A review on composition, properties, food applications, and future research aspects [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124(PA): 107296.
- [108] WANG Y D, ZHANG T, LIU R J, et al. Reviews of medium- and long-chain triglyceride with respect to nutritional benefits and digestion and absorption behavior [J]. *Food Research International*, 2022, 155: 111058.
- [109] MENIS H M E C, SCARTON M, PIRAN M V F, et al. Cereal fiber: Extrusion modifications for food industry[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2020, 33: 141–148.
- [110] HARTIKAINEN K, POUTANEN K, KATINA K. Influence of bioprocessed wheat bran on the physical



- and chemical properties of dough and on wheat bread texture[J]. *Cereal Chemistry*, 2014, 91(2): 115–123.
- [111] ZANNINI E, WATERS D M, ARENDT E K. The application of dextran compared to other hydrocolloids as a novel food ingredient to compensate for low protein in biscuit and wholemeal wheat flour[J]. *European Food Research and Technology*, 2014, 238(5): 763–771.
- [112] TIWARI B K, BRENNAN C S, CURRAN T, et al. Application of ozone in grain processing[J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 51(3): 248–255.
- [113] ZHAO L, JIN H T, LAN J, et al. Detoxification of zearalenone by three strains of *Lactobacillus plantarum* from fermented food *in vitro*[J]. *Food Control*, 2015, 54: 158–164.
- [114] PÉTERI Z, TÉREN J, VÁGVÖLGYI C, et al. Ochratoxin degradation and adsorption caused by as-taxanthin-producing yeasts [J]. *Food Microbiology*, 2007, 24(3): 205–210.
- [115] SUN X Y, SUN J D, YE Y L, et al. Metabolic pathway-based self-assembled Au@MXene liver microsome electrochemical biosensor for rapid screening of aflatoxin B<sub>1</sub>[J]. *Bioelectrochemistry*, 2023, 151: 108378.
- [116] WU S, SHENG L N, LU X, et al. Screening of bio-recognition elements by phage display and their application in the detection of foodborne pathogens [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 171: 117481.
- [117] JOHNSTON R, MARTIN J M, VETCH J M, et al. Controlled sprouting in wheat increases quality and consumer acceptability of whole-wheat bread[J]. *Cereal Chemistry*, 2019, 96(5): 866–877.
- [118] OYEYINKA S A, ADEPEGBA A A, et al. Chemical, antioxidant and sensory properties of pasta from fractionated whole wheat and Bambara groundnut flour[J]. *LWT*, 2021, 138: 110618.
- [119] JIMOH K A, HASHIM N, SHAMSUDIN R, et al. Recent advances in the drying process of grains [J]. *Food Engineering Reviews*, 2023, 15(3): 548–576.
- [120] HEINIÖ R L, NOORT M W J, KATINA K, et al. Sensory characteristics of wholegrain and bran-rich cereal foods – A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 47: 25–38.
- [121] WANG L Z, SUN J D, YE J, et al. One-step extraction and simultaneous quantitative fluorescence immunochromatography strip for AFB<sub>1</sub> and Cd detection in grain [J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131684.
- [122] ZHOU J, WANG T Y, LAN Z, et al. Strategy of functional nucleic acids-mediated isothermal amplification for detection of foodborne microbial contaminants: A review [J]. *Food Research International*, 2023, 173: 113286.
- [123] GUO H Y, JI J, WANG J S, et al. Deoxynivalenol: Masked forms, fate during food processing, and potential biological remedies [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 895–926.
- [124] YANG D D, YE Y L, SUN J D, et al. Occurrence, transformation, and toxicity of fumonisins and their covert products during food processing[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 64(12): 1–14.
- [125] FANG J P, SHENG L N, YE Y L, et al. Recent advances in biosynthesis of mycotoxin-degrading enzymes and their applications in food and feed[J/OL]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, (2023–12–18)[2024–04–15]. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2294166>.
- [126] QIAO C C, ZENG F K, WU N N, et al. Functional, physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking treatment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 121: 107057.
- [127] TIAN X H, TAN B, WANG L X, et al. Effect of rice bran with extrusion cooking on quality and starch retrogradation of fresh brown rice noodles during storage at different temperatures [J]. *Cereal Chemistry*, 2022, 99(6): 1296–1307.
- [128] LONG Y, WEI X, WU S W, et al. Plant molecular farming, a tool for functional food production[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(7): 2108–2116.
- [129] LIU Y X, MENG N, SUN Y, et al. Three thermal treated methods improve physicochemical and functional properties of wheat bran-germ and the bran-germ containing products[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(9): 4317–4328.
- [130] YE G D, WU Y N, WANG L P, et al. Comparison of six modification methods on the chemical

composition, functional properties and antioxidant capacity of wheat bran [J]. LWT, 2021, 149: 111996.

[131] TAN B, WU N N, ZHAI X T. Solutions for whole grain food development[J]. Nutrition Reviews, 2020, 78(Supplement\_1): 61–68.

## Molecular Basis and Regulation of Quality-oriented Precision Processing for Cereal and Oil-based Foods

Jin Zhengyu<sup>1</sup>, Jiang Lianzhou<sup>2</sup>, Wang Xingguo<sup>1</sup>, Tan Bin<sup>3</sup>, Gu Zhengbiao<sup>1</sup>, Sun Xiulan<sup>1</sup>, Li Xiaoxi<sup>4</sup>

*(<sup>1</sup>School of Food Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu*

*<sup>2</sup>College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030*

*<sup>3</sup>Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037*

*<sup>4</sup>College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)*

**Abstract** Cereals and oils are the most important strategic materials of the country and the cereal and oil industry are crucial components of national strategy, playing a fundamental role in the country's economy. It is closely intertwined with the national economy, people's livelihoods, and public health. The nutrient composition and multi-scale structure of cereals and oils are intricate, while the processing methods exhibit variability, thereby influencing the sensory attributes, safety aspects, digestion and absorption, nutritional value, as well as health effects associated with cereal and oil-based foods. The present paper provides a comprehensive review of the current development status and industrial strategic significance of cereal and oil-based foods, as well as the existing challenges faced in quality-oriented processing and manufacturing of cereal and oil-based foods. According to three perspectives: process control, multi-scale structure change and reconstruction of nutrient components, and multi-dimensional quality characteristics regulation, the molecular basis and regulation mechanisms of precision processing of quality-oriented cereal and oil-based foods were systematically analyzed, focusing on the adaptability of processing and the mechanism of interaction for main nutrient components in cereal and oil-based foods, as well as the impact of cereal and oils-based food processing on quality characteristics such as sensory quality, health quality, and safety quality. Additionally, the structure-activity relationships between multi-dimensional quality and processes, along with their correlation regulation mechanisms that restrict future development directions for cereal and oil-based foods were explored. The aim is to establish the theoretical foundation, technical methodologies, and novel green processing strategies for quality-oriented precision processing for cereal and oil-based foods, providing the necessary theoretical support for creating nutritious and healthy cereal and oil-based foods with synergistic enhancement of sensory attributes, safety standards, and health benefits, and ultimately facilitating the high-quality development of China's cereal and oil-based food processing industry.

**Keywords** cereal and oil-based food; nutrient components; interaction; precision processing; multi-dimensional quality regulation