

杂粮的活性成分与杂粮加工研究进展

王岸娜,王艺洁,吴立根*,屈凌波,朱俊友

河南工业大学 粮油食品学院,河南 郑州 450001

摘要:杂粮营养丰富,在人们饮食中的地位越来越重要。杂粮中含有多酚、 β -葡聚糖、植物甾醇等活性成分,对多种慢性疾病具有积极作用,但杂粮中也含有植酸、胰蛋白酶抑制剂、植物凝集素、皂苷等抗营养因子,不利人体对营养物质的吸收,甚至会出现中毒等现象,在杂粮加工中可采用超微粉碎、挤压、膨化、发酵、微波等方法对抗营养因子进行改性,使杂粮在食品工业中发挥更重要的作用。综述了杂粮中活性成分及功能、抗营养因子以及杂粮对健康的益处、杂粮加工方式等,为杂粮产业进一步发展提供参考。

关键词:杂粮;营养;活性成分;抗营养因子

中图分类号:TS210.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2383(2022)02-0117-09

DOI:10.16433/j.1673-2383.2022.02.016

Research progress on the active components and processing of coarse cereals

WANG Anna, WANG Yijie, WU Ligen*, QU Lingbo, ZHU Junyou

College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Coarse cereals are more and more important in people's daily diet due to their rich nutrition. In recent years, the occurrence of a series of chronic diseases, such as cancer, diabetes and cardiovascular disease, has increased and threatened people's health, which is attributed to an unhealthy diet structure and life style to a great extent. Reasonable diet is the basis of health, diversification of a reasonable diet has become a prerequisite for people's health. Coarse cereals have been paid more attention to because of their nutritional function, so the coarse cereals industry has an open market prospect. Coarse cereals contain many kinds of active ingredients and have positive effects on many kinds of chronic diseases. However, coarse cereals also contain many kinds of anti-nutritional factors, which cause adverse effects on the absorption of nutrients by the human body and even lead to poisoning. In the processing of coarse cereals, many processing methods can be used to modify the anti-nutritional factors in the coarse cereals, which are important in the food industry. In this review, the active components, anti-nutritional factors, health benefits and processing methods of coarse cereals were summarized to provide a reference for further development of the coarse cereals industry.

Key words: coarse cereals; nutrition; active ingredient; anti-nutritional factor

杂粮一般是指除水稻、小麦以外的谷类和豆类作物^[1]。杂粮种植特点一般表现为生育期短、种植面积小、地域性强、特殊粮食栽培方式多样^[2]。谷类杂粮主要包括高粱、小米、燕麦等;豆类杂粮一般包括绿豆、红豆、豌豆等。近年来,随

着经济社会快速发展,生活水平逐步提高,人们的饮食和消费观念不断转变,我国城乡居民的膳食结构都发生了重大变化^[3]。20 世纪 90 年代以前,南方饮食以大米、甘薯、苦荞等杂粮为主而北方饮食则以小麦、小米等为主;21 世纪以来,南方

收稿日期:2021-04-23

基金项目:粮食公益性行业科研专项(201313011)

作者简介:王岸娜(1972—),女,山西洪洞人,教授,研究方向为食品资源加工及利用。

* 通信作者:吴立根,博士,副教授,E-mail:ligen2016@126.com。

饮食以精米为主,而北方饮食则以精细面粉为主^[4]。肉蛋奶消费占消费总量的比重上升,粮食直接消费量下降^[3]。《健康中国行动(2019—2030年)》指出饮食因素导致的疾病负担占到15.9%,已成为影响人群健康的重要危险因素。饮食结构的重大变化,导致我国肥胖人群迅速增长,糖尿病、高血压、冠心病等慢性疾病患病率增加,人们的健康受到危害。

杂粮营养丰富且具有一定保健功能,其具有细粮不可替代的地位。杂粮对慢性病的防治有一定效果,在食品工业中发挥着重要作用^[5]。我国杂粮种类繁多,是世界上重要的杂粮主产国之一,杂粮的研究引起广泛关注。鉴于此,本文综述了杂粮中活性成分、抗营养因子以及杂粮对健康的益处、杂粮加工方式,为杂粮产业进一步发展提供参考。

1 杂粮的活性成分及功能

1.1 多酚

多酚是具有苯环并结合多个羟基化学结构的物质。多酚主要包括类黄酮、酚酸、姜黄素、木酚素、芪类化合物和单宁^[6]。Xie等^[7]检测发现黑米和荞麦中的多酚主要是黄酮类化合物,燕麦中的多酚类物质主要是酚酸。赵萌萌等^[8]通过对不同粒色藜麦营养品质、多酚组成与抗氧化活性的研究,得到白、红、黑藜麦中酚酸是含量较高的多酚的结论。Li等^[9]对青稞不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维中的总酚类组分进行了系统的研究,发现该组分富含较高抗氧化能力的酚类化合物。

多酚具有抗氧化、抗癌、抗心脑血管疾病、降血糖、抗菌等功能活性^[10]。高浓度的活性氧自由基会引起关节炎、癌症、糖尿病、动脉粥样硬化、免疫功能和内分泌功能的衰竭^[11]。青稞啤酒糟是一种含有大量抗氧化剂的酚酸,Ikram等^[12]对青稞啤酒糟中酚酸类物质进行研究,结果发现其最主要的酚酸是阿魏酸,其次是对香豆酸和少量咖啡酸。Ribeiro等^[13]围绕多酚类物质的微胶囊化进行研究,所制备的多酚类物质微胶囊具有抗氧化特性,可用于预防癌症、阿尔茨海默氏症和帕金森等疾病。Dzah等^[14]对通过4种预处理方式以及酸、碱水解处理后的苦荞麦壳提取物的酚类成分及抗氧化能力进行研究,结果表明超声辅助亚临界水预处理方式提取物中酚类成分对

HepG2肝癌细胞具有较强的抗氧化活性和细胞毒性。Darvin等^[15]研究发现高粱中所含有的多酚类物质对结肠癌细胞有抑制作用。Shen等^[16]对青稞多酚提取物抗氧化能力进行研究,并通过建立大鼠模型研究青稞多酚降血脂作用,研究发现其作为一种天然抗氧化剂具有促进健康和降低疾病风险的巨大潜力。张花利等^[17]研究发现黑豆皮中黄酮粗提物对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌均有不同程度的抑制作用,最低抑菌质量浓度分别为40.0、2.5、5.0 mg/mL。

1.2 β -葡聚糖

β -葡聚糖是葡萄糖结构单元以 β -糖苷键连接而成的一类非淀粉类多糖,广泛存在于高等植物、大型真菌、藻类、酵母和细菌等生物体中,不同来源 β -葡聚糖均有 β -1,3糖苷键以及数量各异的 β -1,4和 β -1,6糖苷键^[18]。杂粮中 β -葡聚糖的含量因杂粮种类不同而略有差异,一般以大麦和燕麦中含量较高。青稞是大麦的一种,与普通大麦相比,其 β -葡聚糖含量较高^[19]。

冯朵等^[20]通过研究得出硫酸化改性是提高青稞 β -葡聚糖功能性的有效途径,同时发现 β -葡聚糖具有稳定性、溶解性、发泡性及泡沫稳定性。Zhu等^[21]以大鼠2型糖尿病的指示指标研究燕麦 β -葡聚糖对糖尿病的作用,发现燕麦中提取的 β -葡聚糖具有显著的抗糖尿病作用同时可以保护肠黏膜屏障,塑造肠道微生物区系组成。Arcidiacono等^[22]通过研究发现 β -葡聚糖具有减轻全身炎症的功效。Piwińska等^[23]研究发现添加燕麦 β -葡聚糖纤维粉可用于生产高纤维面食产品。

1.3 植物甾醇

植物甾醇又称植物固醇,是一种天然甾体化合物,由植物甾醇及其饱和形式(甾醇)组成。它的结构与胆固醇类似,是具有多重生理活性的三萜烯。

植物甾醇存在于苦荞各个部位,包括 β -谷甾醇、菜油甾醇、豆甾醇等,主要以 β -谷甾醇为主,占70%左右^[24]。Dziedzic等^[25]测定了荞麦制品中植物甾醇的含量,结果发现从熟荞麦和生荞麦皮中提取的油脂中植物甾醇含量较高,分别为51.7、40.9 mg/g。玉米胚芽中的植物甾醇含量是所有食物资源中最高的,可达633 mg/(100 g)^[26]。

植物甾醇在降低胆固醇、预防心血管疾病等方面表现出良好的效果。食用植物甾醇可以促

进低密度胆固醇浓度降低 0.30~26 mmol/L,或降低 10%~12%^[27]。Hallikainen 等^[28]的研究发现,每天摄入 1~2 g 植物甾醇可降低血清胆固醇水平 10%~15%。Ming 等^[29]研究发现植物甾醇可以降低血清 LDL-C 含量,从而降低心血管病的发生。因此,一定摄入量的植物甾醇可以降低血液胆固醇水平,从而降低心血管疾病发病率。

2 杂粮中抗营养因子

虽然杂粮含有丰富的营养成分,但它们的营养价值会被一种或多种抗营养化合物的存在所抵消^[30]。这些抗营养化合物被称为杂粮中的抗营养因子,会影响人体对营养物质的消化、吸收和利用,引起胃肠胀气、腹泻、腹痛,甚至食物中毒等现象^[31]。

2.1 植酸

植酸,又称肌醇六磷酸、环己六醇六磷酸,分子式 $C_6H_{18}O_{24}P_6$ 。植酸主要存在于植物的种子、根干和茎中,其中以豆科植物的种子、谷物的麸皮和胚芽中含量最高。植酸在豆类中的含量最高,每 100 g 干物质中约含有 2 g 植酸,然而荞麦面食中植酸含量最低,不到 1 g/100 g^[32]。植酸是钙、铁和锌等矿物质阳离子的强力螯合剂,形成不溶盐,这些物质的产生对矿物质的吸收和消化产生不利影响^[33]。植酸能与蛋白质形成复合物,从而使蛋白质的结构发生改变,可能导致蛋白质溶解度、酶活性和蛋白水解消化率的降低^[34]。

Guo 等^[35]采用不同的辊磨机和清洗方法直接去除糊粉细胞,最大限度地降低了麸皮中植酸含量。Asres 等^[36]研究发现谷物发酵后,随着矿物质含量的增加,植酸和单宁含量显著降低。

2.2 胰蛋白酶抑制剂

胰蛋白酶抑制剂属于丝氨酸蛋白酶抑制剂家族,普遍存在于自然界的动物、植物、微生物中,但目前研究较多的胰蛋白酶抑制剂主要来源于杂粮,豆类是其主要来源^[37]。胰蛋白酶抑制剂分子中的活性部位是赖氨酸,其通过与胰蛋白酶的丝氨酸部位结合,使其失活,不可逆地形成无酶活性的复合物,抑制了生物对蛋白质的利用率^[38]。

赵现明^[39]通过对不同种属豆类胰蛋白酶抑制剂活性的研究,发现胰蛋白酶抑制剂活性从高到低依次为大豆属、菜豆属、豇豆属。Wang 等^[40]

研究发现烹饪加工豆类可降低其所含成分中的胰蛋白酶抑制剂的活性。胰蛋白酶抑制剂作为一种抗营养因子,降低了胰蛋白酶活性,影响人体对营养物质的吸收,但 Fernandes 等^[41]研究发现胰蛋白酶抑制剂也具有一定抗乳腺癌的作用,Quan 等^[42]研究发现胰蛋白酶抑制剂具有降血糖的功效。

2.3 植物凝集素

1888 年,Stillmark 报道了一种从蓖麻籽中提取的剧毒蛋白质,这种被称为“蓖麻毒素”的蛋白质具有凝血作用,后来被证明其是第一种凝集素^[43]。凝集素是一类分布广泛,具有不同分子结构的糖蛋白或糖结合蛋白,其最大特点是能识别并与红细胞特异性糖基结合,使血红细胞凝集,且具有抑制蛋白质合成和细胞毒性的作用^[44-45]。植物凝集素种类很多,其中豆科凝集素是研究最多的一类,且在植物凝集素中也最为丰富^[46]。芸豆中含量最高的一种过敏原蛋白就是凝集素蛋白,平均含量为 1 200 mg/100 g^[47]。植物凝集素还具有植物防御、抗肿瘤活性、固氮等功能特性^[43]。

2.4 皂苷

皂苷是分布广泛的植物天然产物,具有丰富的结构和功能多样性。它是苷元为三萜或螺旋甾烷类化合物的一类糖苷。许多研究表明,皂苷具有一定毒性。皂苷具有细胞毒性,会导致细胞凋亡^[48]。皂苷还具有溶血毒性,会导致红细胞溶解^[49]。Lin 等^[50]从藜麦壳中提取粗皂苷并对大鼠进行急性毒性和排泄试验,得出藜麦皂苷的急性毒性作用是有限的。Böttger 等^[51]研究发现皂苷的一般细胞毒性主要依赖于膜毒性,而膜毒性可能是由于细胞膜上胆固醇的流失引起的。Man 等^[52]研究发现皂苷具有很强的抗肿瘤活性。Zhao^[53]进一步对皂苷降胆固醇活性的因素进行研究,特别是皂苷在胃肠道吸收或代谢后的降胆固醇活性。Soliman 等^[54]以大豆为试验材料研究皂苷对大豆抗氧化代谢和生长的影响,研究发现 5%皂苷对大豆抗氧化具有积极作用。

3 杂粮对健康的益处

杂粮因其丰富的营养价值及其所含有的活性成分,在预防及辅助改善慢性病方面逐渐被人们所重视。

3.1 癌症

癌症是全世界一个主要死因,世界卫生组织

国际癌症研究机构发布了 2020 年全球癌症死亡病例 996 万例,其中男性 553 万例。目前 30%~50% 的癌症可以预防,可通过避免危险因素和落实现有的循证预防策略来实现。

一些体外和体内研究表明,杂粮中含有多种成分,如植物甾醇、 β -葡聚糖、木脂素、多酚等,它们在预防乳腺癌、前列腺癌、结直肠癌和其他癌症方面发挥着重要作用。Shahzad 等^[55]研究发现富含植物甾醇的饮食可以降低 20% 的癌症风险。植物甾醇还可以影响宿主系统,通过提高对癌症的免疫应答识别,影响激素依赖的内分泌肿瘤生长,并通过甾醇的生物合成调节来实现抗肿瘤反应。此外,植物甾醇还表现出直接抑制肿瘤生长的特性,包括减少细胞周期进程、诱导细胞凋亡和抑制肿瘤转移。膳食纤维通过排毒、消炎、肠道菌群和脂代谢的调控参与抗癌,其对多种癌症的不同发展阶段都有作用,对消化道癌症、生殖系统癌症、肺癌及其他癌症均有影响^[56]。

3.2 心血管疾病

心血管疾病已成为全球的头号死因,低密度脂蛋白胆固醇升高是心血管疾病的主要危险因素。因此,降低血清胆固醇水平是预防心血管疾病的主要措施之一。杂粮具有抗氧化和降低胆固醇的特性,因此可以降低患冠心病的风险。

Aune 等^[57]分析了 45 项关于杂粮谷物摄入量与心血管疾病和其他疾病死因的关系,结果发现摄入特定类型的全谷物,包括全麦面包、全麦早餐麦片以及全麦早餐谷物,与心血管疾病或所有原因死亡的风险降低有关。每天全谷物杂粮摄入量达到 90 g,可以降低冠心病风险 19%,降低心血管疾病整体危险 22%。Ha 等^[58]汇总了 26 项随机对照试验,结果发现膳食中摄入含有 130 g/d 豆类能够显著降低低密度脂蛋白胆固醇水平,进而降低心血管疾病的风险。

3.3 糖尿病

糖尿病是一组以高血糖为特征的代谢性疾病,近年来由于患者的日渐增长在全世界范围受到了越来越多的重视^[59]。杂粮作为一种重要的食物原料,含有许多具有调节血糖作用的功能成分,如多酚类、多糖类、黄酮类等^[60]。

燕麦中具有调节血糖作用的功效成分主要包括多糖类和多肽类物质,对降低肠道对糖的吸收效率、提高胰岛素敏感性及改善胰岛素抵抗有重要影响。丁慧^[61]研究荞麦复配米饭发现,随着荞麦添加量的增加可呈剂量依赖性地降低米饭

的 GI 值,富含荞麦碱的复配米饭降低餐后血糖的成效显著。Lee 等^[62]研究发现大麦芽多酚提取物通过激活 AMPK,肝脏中细胞自噬抑制 SREBP2,降低了小鼠的空腹血糖,同时可降低胆固醇浓度。

4 杂粮加工方式

杂粮中含有多种活性成分,在加工过程中要尽可能地保护这些成分使其免受破坏。同时,杂粮中还含有抗营养因子,会降低人们对杂粮中营养成分的吸收,所以需要改进加工过程。应结合现代新技术和新工艺,对杂粮进行加工,从而提高可加工性,使其利于消化和吸收,满足人们日常饮食。

4.1 超微粉碎

近年来,超微粉碎技术被广泛应用于谷物类食品的加工技术研究。杂粮质地粗糙,口感不佳且不易熟化。在杂粮的加工过程中使用超微粉碎技术可明显改善谷类食品的粒径、比表面积、持水性、溶解性等物理性能,同时通过超微粉碎后,谷物中活性物质溶出率提高,营养成分如破碎淀粉的含量提高,谷物食品因质地粗糙而影响口感的问题得到改善^[63]。

程佳钰等^[64]研究发现超微粉碎可使苦荞粉粒径减小,破损淀粉含量增加,糊化特性提升,也改善了用超微粉碎制作的全苦荞面条的品质。Wang 等^[65]对豌豆膳食纤维进行超微粉碎处理后膳食纤维的结构碎裂、比表面积增大,具有较高的溶胀性和保水、保油能力。Du 等^[66]对青稞膳食纤维进行超微粉碎处理后,青稞粉中可溶性膳食纤维含量显著增加,膳食纤维抗氧化活性提高,清除 DPPH· 的能力和铁离子还原能力也提高。

4.2 挤压加工

食品挤压加工技术是集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、膨化及成型为一体的高新技术^[67]。翟小童等^[68]研究发现挤压加工可显著降低糙米速食粥的消化率和 GI 值。赵妍嫣等^[69]以小麦麸皮膳食纤维为原料,采用双螺杆挤压机进行挤压加工,提高了小麦麸皮膳食纤维中可溶性膳食纤维的含量。

4.3 膨化

膨化是原料在加热、加压的情况下突然减压而使之膨胀。膨化技术一般包括挤压膨化和非

挤压膨化,其中非挤压膨化技术包括气流膨化、微波膨化、油炸膨化及焙烤膨化。

Huang 等^[70]研究了气流膨化对小米、大麦、黑米等谷物的营养成分、物理特性和消化率的影响,研究发现:气流膨化后的谷物籽粒的营养成分中总糖含量较高,水分、淀粉和脂肪含量较低;显著提高了籽粒中淀粉和蛋白质的消化率。刘兴丽等^[71]研究发现紫薯粉通过挤压膨化后添加到面团中可以提高面制品的出品率,有助于延缓面团的老化,延长保质期。

4.4 发酵

发酵指人们借助微生物在有氧或无氧条件下的生命活动来制备微生物菌体本身、直接代谢产物或次级代谢产物的过程^[72]。Liu 等^[73]通过研究大豆发酵过程中营养物质的变化,结果发现发酵可产生许多功能性物质如生物活性肽、不饱和脂肪酸、游离大豆异黄酮、维生素和矿物质等使豆制品更加营养和健康。近代研究发现利用固态发酵生产的一些食品中含有生理活性物质,Jiang 等^[74]利用芽孢杆菌对豆渣进行固态发酵,发酵后的豆渣中胰蛋白酶抑制剂、植酸和单宁等抗营养因子降低。谷物发芽过程中会产生一系列变化,其中活性物质含量大大提高,从而提高了谷物的功能活性。Singh 等^[75]研究发现谷物经发芽和发酵处理后其营养价值和功能特性提高,蛋白质含量增加,抗营养因子减少,矿物质的利用率提高。Zahir 等^[76]研究发现发芽和发酵对提高大豆蛋白消化率具有积极作用。

4.5 微波

近年来,微波技术已广泛应用于各个领域,尤其是在食品行业中。微波是一种电磁波,频率在 1~300 GHz 之间。微波加热速度快,加热均匀。在杂粮的加工过程中常使用微波熟化,从而使杂粮的营养价值提高。

张子敬等^[77]用微波预处理红米粉并研究处理后红米的理化性质,结果表明,微波预处理可提升蒸煮后红米的熟化程度,提升其淀粉水解率。Bai 等^[78]对青稞进行了流态化、微波和烘焙等 3 种热处理,热处理后青稞中总酚、总黄酮、结合酚含量显著下降,游离酚、 β -葡聚糖提取率、抗氧化活性显著增加,但流态化热处理对青稞营养价值的提升最大。姜鹏等^[79]将高粱浸泡后用微波处理进行熟化,发现熟化后高粱的蒸煮时间大大缩短,该研究为高粱食品便捷食用提供技术可能。

5 结语

杂粮在我国历史悠久,营养丰富,且杂粮具有独特的生理功效。近年来,由于人们饮食结构和生活方式的改变,癌症、糖尿病、心血管疾病等一系列慢性疾病发病率增高,威胁人们健康。合理膳食是健康的基础,多元化合理搭配饮食成为健康的前提,杂粮因其营养功能受到人们的重视,因此产业具有广阔的市场前景。杂粮营养丰富,是食品原料良好的营养强化剂;杂粮具有独特的风味和色素,是食品天然的风味剂和着色剂,因此在食品工业已获得了一定的应用,但杂粮的加工过于粗糙,口感及色泽较差,改善产品加工方式,加强精深加工与修饰变得尤为重要。因此,重点开发杂粮内在品质,以生产独特的、不同种类的食品品种,有助于改善我国居民饮食习惯,平衡膳食结构,保证大众健康。在食品加工工业的良好发展前景下,进一步发展杂粮产业具有重大意义。

参考文献:

- [1] JI Y, MA N, ZHANG J M, et al. Dietary intake of mixture coarse cereals prevents obesity by altering the gut microbiota in high-fat diet fed mice [J]. Food and chemical toxicology, 2021, 147: 111901.
- [2] YU Z Y, HAFEEZ M, LIU L H, et al. Evaluating the minor coarse cereals product crowdfunding platform through evolutionary game analysis [J]. Sustainability, 2019, 11 (5): 1299.
- [3] LU C X, LIU A M, XIAO Y, et al. Changes in China's grain production pattern and the effects of urbanization and dietary structure [J]. Journal of resources and ecology, 2020, 11(4): 358.
- [4] 向月,曹亚楠,赵钢,等. 杂粮营养功能与安全研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 362-370.
- [5] FU J, ZHANG Y, HU Y C, et al. Concise review: coarse cereals exert multiple beneficial effects on human health [J]. Food chemistry, 2020, 325: 126761.

- [6] 梁进欣, 白卫东, 杨娟, 等. 植物多酚的研究进展 [J]. 农产品加工, 2020(21): 85-91.
- [7] XIE F Y, LEI Y C, HAN X, et al. Antioxidant ability of polyphenols from black rice, buckwheat and oats: in vitro and in vivo [J]. Czech journal of food sciences, 2020, 38(4): 242-247.
- [8] 赵萌萌, 杨希娟, 党斌, 等. 不同粒色藜麦营养品质及多酚组成与抗氧化活性比较分析 [J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 29-35.
- [9] LI Q, YANG S H, LI Y Q, et al. Antioxidant activity of free and hydrolyzed phenolic compounds in soluble and insoluble dietary fibres derived from hullless barley [J]. LWT-food science and technology, 2019, 111: 534-540.
- [10] 谢佳函, 刘回民, 刘美宏, 等. 杂粮多酚功能活性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(14): 326-329, 335.
- [11] GUO T L, HORVATH C, CHEN L, et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (Qingke): a review [J]. Trends in food science & technology, 2020, 103: 109-117.
- [12] IKRAM S, ZHANG H J, MING H Y, et al. Recovery of major phenolic acids and antioxidant activity of highland barley brewer's spent grains extracts [J]. Journal of food processing and preservation, 2020, 44(1): e14308.
- [13] RIBEIRO A M, ESTEVINHO B N, ROCHA F. Microencapsulation of polyphenols: the specific case of the microencapsulation of *Sambucus Nigra* L. extracts: a review [J]. Trends in food science & technology, 2020, 105: 454-467.
- [14] DZAH C S, DUAN Y Q, ZHANG H H, et al. Effects of pretreatment and type of hydrolysis on the composition, antioxidant potential and HepG2 cytotoxicity of bound polyphenols from Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* L. Gaerth) hulls [J]. Food research international, 2021, 142: 110187.
- [15] DARVIN P, JOUNG Y H, S P N, et al. Sorghum polyphenol suppresses the growth as well as metastasis of colon cancer xenografts through co-targeting jak2/STAT3 and PI3K/Akt/mTOR pathways [J]. Journal of functional foods, 2015, 15: 193-206.
- [16] SHEN Y B, ZHANG H, CHENG L L, et al. In vitro and in vivo antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland barley [J]. Food chemistry, 2016, 194: 1003-1012.
- [17] 张花利, 冯进, 董晓娜, 等. 黑豆皮中黄酮提取及粗提物抑菌效果研究 [J]. 大豆科学, 2011, 30(3): 497-501.
- [18] 陈婷, 叶发银, 赵国华. β -葡聚糖在结构化功能性配料制造中的应用进展 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 283-292.
- [19] 冯格格, 余永新, 洪思慧, 等. 青稞中主要功效成分最新研究进展 [J]. 农产品质量与安全, 2020(2): 82-89.
- [20] 冯朵, 王靖, 季晓娇, 等. 青稞功效成分和保健功能研究进展 [J]. 食品科技, 2020, 45(9): 57-61.
- [21] ZHU Y Y, DONG L E, HUANG L, et al. Effects of oat β -glucan, oat resistant starch, and the whole oat flour on insulin resistance, inflammation, and gut microbiota in high-fat-diet-induced type 2 diabetic rats [J]. Journal of functional foods, 2020, 69: 103939.
- [22] ARCIDIACONO M V, CARRILLO-LÓPEZ N, PANIZO S, et al. Barley- β -glucans reduce systemic inflammation, renal injury and aortic calcification through ADAM17 and neutral-sphingomyelinase2 inhibition [J]. Scientific reports, 2019, 9: 17810.
- [23] PIWIŃSKA M, WYRWISZ J, KUREK M, et al. Effect of oat β -glucan fiber powder and vacuum-drying on cooking quality and physical properties of pasta [J]. CyTA-journal of food, 2016, 14(1): 101-108.
- [24] 张余, 黄小燕, 刘昌敏, 等. 苦荞营养保健成分及其食品开发研究进展与展望 [J]. 粮食与油脂, 2019, 32(8): 12-14.
- [25] DZIEDZIC K, GÓRCEKA D, MARQUES A, et al. Content of phytosterols in raw and roasted buckwheat groats and by-products

- [J]. Czech journal of food sciences, 2016, 33(5): 424-430.
- [26] 任婷婷, 李书国. 玉米胚芽的营养保健价值及其食品的研究开发[J]. 粮食加工, 2012, 37(2): 60-64.
- [27] ABUMWEIS S S, MARINANGELI C P F, FROHLICH J, et al. Implementing phytosterols into medical practice as a cholesterol-lowering strategy: overview of efficacy, effectiveness, and safety[J]. Canadian journal of cardiology, 2014, 30(10): 1225-1232.
- [28] HALLIKAINEN M A, SARKKINEN E S, UUSITUPA M I J. Plant stanol esters affect serum cholesterol concentrations of hypercholesterolemic men and women in a dose-dependent manner[J]. The journal of nutrition, 2000, 130(4): 767-776.
- [29] MING Z M, CHEN Q S, ZHANG L, et al. Evaluation of the efficacy of phytosterol and phytosterol-supplemented dairy products in reducing the risk of cardiovascular and cerebrovascular diseases[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 174-183.
- [30] SINGH A K, SINGH R, SUBRAMANI R, et al. Molecular approaches to understand nutritional potential of coarse cereals[J]. Current genomics, 2016, 17(3): 177-192.
- [31] 梁叶星, 张玲, 高飞虎, 等. 杂粮中的抗营养因子检测技术研究进展[J]. 南方农业, 2016, 10(34): 39-43.
- [32] VOJTÍŠKOVÁ P, KRÁČMAR S. Crude protein, fibre and phytic acid in vitro digestibility of selected legume and buckwheat samples[J]. Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis, 2013, 61(1): 227-232.
- [33] RABOY V. Seeds for a better future: 'low phytate' grains help to overcome malnutrition and reduce pollution[J]. Trends in plant science, 2001, 6(10): 458-462.
- [34] KUMAR V, SINHA A K, MAKKAR H P S, et al. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: a review[J]. Food chemistry, 2010, 120(4): 945-959.
- [35] GUO J, BIAN Y Y, ZHU K X, et al. Reducing phytate content in wheat bran by directly removing the aleurone cell content with teeth roller mill and ultrasonic cleaner[J]. Journal of cereal science, 2015, 64: 133-138.
- [36] ASRES D T, NANA A, NEGA G. Complementary feeding and effect of spontaneous fermentation on anti-nutritional factors of selected cereal-based complementary foods[J]. BMC pediatrics, 2018, 18(1): 394.
- [37] 王荣春, 孙建华, 何述栋, 等. 胰蛋白酶抑制剂的结构与功能研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(9): 364-368.
- [38] 付焯赫. 鹰嘴豆胰蛋白酶抑制剂的纯化及其部分特性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2010.
- [39] 赵现明. 豆类胰蛋白酶抑制剂的提取分离及纯化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [40] WANG N, HATCHER D W, TYLER R T, et al. Effect of cooking on the composition of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and chickpeas (*Cicer arietinum* L.)[J]. Food research international, 2010, 43(2): 589-594.
- [41] FERNANDES J P C, MEHDAD A, VALADARES N F, et al. Crystallographic structure of a complex between trypsin and a nonapeptide derived from a Bowman-Birk inhibitor found in *Vigna unguiculata* seeds[J]. Archives of biochemistry and biophysics, 2019, 665: 79-86.
- [42] QUAN N V, XUAN T D, TRAN H D, et al. Contribution of momilactones A and B to diabetes inhibitory potential of rice bran: evidence from in vitro assays[J]. Saudi pharmaceutical journal, 2019, 27(5): 643-649.
- [43] VAN HOLLE S, VAN DAMME E J M. Signaling through plant lectins: modulation of plant immunity and beyond[J]. Biochemical society transactions, 2018, 46(2): 217-233.
- [44] TSANEVA M, VAN DAMME E J M. 130 years of plant lectin research[J]. Glycoconjugate journal, 2020, 37(5): 533-551.
- [45] 蔡茜茜, 李巧玲, 刘舒云, 等. 植物凝集素研究与展望[J]. 食品科学技术学报,

- 2013, 31(6): 51-57.
- [46] 殷晓丽, 李婷婷, 刘东亮, 等. 豆科凝集素研究进展 [J]. 中国生物工程杂志, 2011, 31(7): 133-139.
- [47] 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.
- [48] MOSES T, PAPADOPOULOU K K, OSBOURN A. Metabolic and functional diversity of saponins, biosynthetic intermediates and semi-synthetic derivatives [J]. Critical reviews in biochemistry and molecular biology, 2014, 49(6): 439-462.
- [49] ZHENG S Q, WANG Y B, LIU H M, et al. Prediction of hemolytic toxicity for saponins by machine-learning methods [J]. Chemical research in toxicology, 2019, 32(6): 1014-1026.
- [50] LIN B J, QI X, FANG L, et al. *In vivo* acute toxicity and mutagenic analysis of crude saponins from *Chenopodium quinoa* Willd husks [J]. RSC advances, 2021, 11(8): 4829-4841.
- [51] BÖTTGER S, MELZIG M F. The influence of saponins on cell membrane cholesterol [J]. Bioorganic & medicinal chemistry, 2013, 21(22): 7118-7124.
- [52] MAN S L, GAO W Y, ZHANG Y J, et al. Chemical study and medical application of saponins as anti-cancer agents [J]. Fitoterapia, 2010, 81(7): 703-714.
- [53] ZHAO D Y. Challenges associated with elucidating the mechanisms of the hypocholesterolaemic activity of saponins [J]. Journal of functional foods, 2016, 23: 52-65.
- [54] SOLIMAN M H, ABDULMAJEED A M, AL-HAITHLOUL H, et al. Saponin bioprimer positively stimulates antioxidants defense, osmolytes metabolism and ionic status to confer salt stress tolerance in soybean [J]. Acta physiologiae plantarum, 2020, 42(7): 1-13.
- [55] SHAHZAD N, KHAN W, MD S, et al. Phytosterols as a natural anticancer agent: current status and future perspective [J]. Bio-medicine & pharmacotherapy, 2017, 88: 786-794.
- [56] 罗非君, 聂莹. 膳食纤维抗癌作用及其分子机理的研究进展 [J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(12): 1233-1238.
- [57] AUNE D, KEUM N, GIOVANNUCCI E, et al. Whole grain consumption and risk of cardiovascular disease, cancer, and all cause and cause specific mortality: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies [J]. BMJ, 2016, 353: i2716.
- [58] HA V, SIEVENPIPER J L, DE SOUZA R J, et al. Effect of dietary pulse intake on established therapeutic lipid targets for cardiovascular risk reduction: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Canadian medical association journal, 2014, 186(8): E252-E262.
- [59] 李兆钊, 吴卫国, 廖卢艳, 等. 杂粮中辅助调节血糖功效成分研究进展 [J]. 中国粮油学报, 2020, 35(7): 195-202.
- [60] 李笑蕊, 王世霞, 负婷婷, 等. 杂粮健康功效和作用机理的分子营养学解析 [J]. 粮油食品科技, 2016, 24(1): 46-49.
- [61] 丁慧. 富含荞麦碱荞麦复配米饭的制备及其对血糖生成指数的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [62] LEE J H, LEE S Y, KIM B, et al. Barley sprout extract containing policosanols and polyphenols regulate AMPK, SREBP2 and ACAT2 activity and cholesterol and glucose metabolism *in vitro* and *in vivo* [J]. Food research international, 2015, 72: 174-183.
- [63] 刘颖, 高帅, 张云亮, 等. 超微粉碎对大豆、玉米、发芽糙米物化特性影响 [J]. 食品科技, 2020, 45(9): 168-173.
- [64] 程佳钰, 高利, 汤晓智. 超微粉碎对苦荞面条品质特性的影响 [J]. 食品科学, 2021, 42(15): 99-105.
- [65] WANG M, CHEN X H, DONG L C, et al. Modification of pea dietary fiber by ultrafine grinding and hypoglycemic effect in diabetes mellitus mice [J]. Journal of food science,

- 2021,86(4):1273-1282.
- [66] DU B, ZHU F M, XU B J. Physicochemical and antioxidant properties of dietary fibers from Qingke (hull-less barley) flour as affected by ultrafine grinding [J]. *Bioactive carbohydrates and dietary fibre*, 2014, 4 (2): 170-175.
- [67] 潘苗苗, 孙业荣, 何礼喜, 等. 我国杂粮主食化及加工技术 [J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(15): 13-15, 19.
- [68] 瞿小童, 杨新生, 刘艳香, 等. 米面制品的体外消化特性研究 [J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(9): 28-33.
- [69] 赵妍嫣, 徐苗均, 姜绍通, 等. 小麦麸皮膳食纤维挤压加工工艺研究 [J]. *包装与食品机械*, 2012, 30(2): 1-4, 20.
- [70] HUANG R R, PAN X D, LV J G, et al. Effects of explosion puffing on the nutritional composition and digestibility of grains [J]. *International journal of food properties*, 2018, 21(1): 2193-2204.
- [71] 刘兴丽, 赵双丽, 靳艳军, 等. 挤压膨化紫薯粉对小麦面团糊化特性和热机械学特性的影响 [J]. *食品科学*, 2019, 40(15): 106-111.
- [72] 段鸿斌, 王文静, 乔新荣, 等. 食品微生物检验技术 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2015.
- [73] LIU L B, CHEN X Q, HAO L L, et al. Traditional fermented soybean products: processing, flavor formation, nutritional and biological activities [J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2022, 62(7): 1971-1989.
- [74] JIANG K, TANG B, WANG Q, et al. The bio-processing of soybean dregs by solid state fermentation using a poly γ -glutamic acid producing strain and its effect as feed additive [J]. *Bioresource technology*, 2019, 291: 121841.
- [75] SINGH A K, REHAL J, KAUR A, et al. Enhancement of attributes of cereals by germination and fermentation: a review [J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2015, 55(11): 1575-1589.
- [76] ZAHIR M, FOGLIANO V, CAPUANO E. Effect of soybean processing on cell wall porosity and protein digestibility [J]. *Food & function*, 2020, 11(1): 285-296.
- [77] 张子敬, 朱璿, 孙娟, 等. 微波预处理和熟化对红米消化和理化特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(15): 165-170.
- [78] BAI Y P, ZHOU H M, ZHU K R, et al. Effect of thermal treatment on the physicochemical, ultrastructural and nutritional characteristics of whole grain highland barley [J]. *Food chemistry*, 2021, 346: 128657.
- [79] 姜鹏, 李忍, 戴凌燕, 等. 浸泡和微波处理对三种高粱熟化的影响 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(8): 70-74.

(责任编辑 周凤航)