

尚珊, 臧梁, 傅宝尚, 等. 全谷物原料的营养特性及食品开发研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 443–452. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040279

SHANG Shan, ZANG Liang, FU Baoshang, et al. Nutritional Characteristics of Whole Grain and Product Development Progress[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 443–452. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040279

· 专题综述 ·

全谷物原料的营养特性及食品开发研究进展

尚珊, 臧梁, 傅宝尚, 姜鹏飞, 刘莹, 祁立波*

(大连工业大学食品学院, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034)

摘要: 全谷物含有丰富的营养成分和生物活性物质, 是近些年来消费者关注的热点, 全谷物食品比精细加工的谷物制品更具有营养价值和保健功能。本文就小麦、大麦、燕麦、糙米、荞麦、高粱、小米和藜麦等几种常见谷物原料的营养特性及产品研究进展进行了总结; 对全谷物中不同营养成分的摄取对健康的益处和目前全谷物产品的开发现状进行了全面的概述, 同时也归纳了全谷物食品开发目前所面临的问题并对全谷物食品的未来前景进行了展望。以期全谷物在功能性食品开发中的应用提供理论参考。

关键词: 全谷物原料, 营养特性, 健康益处, 食品开发, 全谷物产品

中图分类号: TS213

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)08-0443-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040279



本文网刊:

Nutritional Characteristics of Whole Grain and Product Development Progress

SHANG Shan, ZANG Liang, FU Baoshang, JIANG Pengfei, LIU Ying, QI Libo*

(School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, National Engineering Research Center of Seafood, Dalian 116034, China)

Abstract: Whole grains are rich in nutrients and bioactive components, which have become the focus of consumers' attention in recent years. Whole grain food has more nutritional value and health benefits compared with refined grain product. This paper summarizes the nutritional characteristics and product research progress of several common cereal ingredients including wheat, barley, oat, brown rice, buckwheat, sorghum, millet and quinoa, as well as the health benefits of different nutrients and product development situation of whole grain. The issues that appear during whole grain food development and future prospects are also concluded and prospected. This review is aimed to provide theoretical reference for the application of whole grain in functional food development.

Key words: whole grain; nutritional characteristics; health benefit; product development; whole grain product

谷物作为传统美食, 是人们必不可少的食物之一, 也为人类生存提供了主要的营养物质和能量。在以往谷物制品的加工过程中, 人们都在追求谷物食品的口感, 大多食用的都是精制的大米、白面等。精制的大米、白面具有更好的外观和口感, 但谷物本身所含有的维生素、矿物质和膳食纤维等营养成分也因精制过程造成了损失。目前肥胖症、超重和心血管疾病发生率日益增加, 成为了影响世界的医疗健康问题^[1], 作为膳食重要组成的谷物食品引起了高度关

注, 科学合理的谷物加工是比较有效的改善手段。有些国家试图将 B 族维生素、钙、铁、锌等微量营养素采用强制性营养强化添加到食品中, 以弥补在精加工过程中损失的营养物质^[2]。

近年来, 许多研究表明, 谷物中不仅含有膳食纤维, 还包括具有抗氧化性能的生物活性物质。这些生物活性物质与营养素结合, 具有协同作用, 较单个营养素或单个活性物质更有利于人体健康^[3]。因此, 全谷物食品比精细加工的谷物制品更具有营养价值和

收稿日期: 2021-04-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0401203)。

作者简介: 尚珊 (1988-), 女, 硕士, 实验 (工程) 师, 研究方向: 农 (水) 产品精深加工, E-mail: 718586131@qq.com。

* 通信作者: 祁立波 (1974-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 农 (水) 产品精深加工, E-mail: 905390442@qq.com。

保健功能。本文就全谷物的营养特性、全谷物食品的研究现状、全谷物的摄取对健康的益处以及目前全谷物的精深加工产品和存在的问题等进行了全面的概述。

1 全谷物原料及营养特性

全谷物是目前世界上公认的对人体有价值的健康食品。从 20 世纪 80 年代开始,西方发达国家就对全谷物食品展开了一系列的调查研究,1999 年美国谷物化学家协会(AACC)对全谷物进行了定义^[4],定义指出全谷物是指完整、碾碎、破碎或压片的颖果,基本的组成包括淀粉质胚乳、胚芽与麸皮,各组成部分的相对比例与完整颖果一样,美国 FDA^[5]在《全谷物食品健康声明》中提出,全谷物食品中全谷物原料所占比例不得少于 51%。欧盟也对全谷物食品的定义做出了补充^[6]:表示在加工过程中允许存在小量损失,但损失量不能超过谷物的 2%,麸皮损失量不能超过麸皮总量的 10%,以去除细菌、霉菌、农药残留及重金属等杂质。各国家和机构对全谷物的定义大体上相似,均指出胚乳、胚芽和麸皮的比例应与天然谷粒相同。

全谷物中含有较为丰富的营养物质,营养成分主要包括碳水化合物、蛋白质、脂肪、维生素、矿物质、非淀粉多糖、植酸和植物化学素^[7]。其中大量的碳水化合物和蛋白质主要存在于谷物的胚乳中;维生素 B 类、矿物质和膳食纤维主要存在于谷物的麸皮中;而谷物的胚芽则富含维生素、矿物质、脂质和一些蛋白质^[8]。谷物中的碳水化合物主要指淀粉,其中支链淀粉含量较多。谷物中蛋白质含量也较为丰富,约占 6%~15%,谷物中的脂质含量相对较少,大多数以不饱和脂肪酸的形式存在,谷物中的维生素主要是生育酚和 B 族维生素,如 B₁、B₂、B₃ 等^[9]。谷物中所含的矿物元素包括钾、钠、钙、锰、铁、锌和硒等,其中含量最为丰富的是钾^[10]。本文就小麦、大麦、燕麦、糙米、荞麦、高粱、小米和藜麦等几种常见谷物原料的营养价值及保健功能进行介绍。

1.1 小麦

小麦是人类消耗的最重要的谷物之一,也是人类主要的能量来源。小麦由胚乳(83%)、麸皮(14%)和胚芽(3%)组成。与谷物的其他部分相比,它还含有最高水平的硫胺素、核黄素和烟酸。亚糊粉层蛋白质主要包括醇溶蛋白和麦谷蛋白,即形成面筋的蛋白质;胚乳的中心部分含有大量的非麸质(麦清蛋白和麦球蛋白)蛋白质。胚芽中富含脂质、蛋白质、复合维生素 E 和维生素 B 以及矿物质。麸皮是麦粒的最外层,主要由不溶性膳食纤维和抗氧化物组成。

全谷物小麦中的营养价值体现在膳食纤维上,小麦含有约 11.6%~17% 的纤维。纤维主要集中在麸皮部分,约 46% 是非淀粉多糖,包括阿拉伯木聚糖、纤维素和 β -葡聚糖,很多研究表明,膳食纤维虽不能被人体消化吸收,但可以抑制胆固醇的吸收,维

持正常的血糖水平^[11],小麦的麸皮还具有防止便秘的功效^[12]。全麦产品多集中于全麦面包、全麦饼干的研究与开发,因富含膳食纤维而受到消费者的青睐。肖志刚等^[13]将小麦麸皮进行酶解,发现面包体外淀粉消化特性和血糖生成指数明显降低。近年来有研究者从小麦麸皮中提取麦麸蛋白,并将麦麸蛋白酶解制获得的酶解液中含有 55 kDa 的疏水性多肽,具有明显的降压和抗氧化能力^[14]。因此小麦麸皮的制备、改性、麸皮中活性成分的提取和应用将是未来研究的热点。

1.2 大麦

大麦是全球最重要的谷物原料之一,除碳水化合物、蛋白质和脂肪外,大麦含有 β -葡聚糖、酚类物质、黄酮类物质和阿拉伯木聚糖等生物活性物质^[15],这些物质赋予了大麦特殊的营养学特性,而在这些物质中, β -葡聚糖是膳食纤维的重要来源,对健康的益处最多。通常来说,相比其他谷物,大麦中 β -葡聚糖含量最高,在 2.5%~11.3% 之间,其次是燕麦和小麦^[16],但 β -葡聚糖的含量因大麦的品种而异,有文献报道某些大麦品种中的 β -葡聚糖含量高达 17%^[17],且蜡质大麦品种和高直链淀粉含量的大麦品种中, β -葡聚糖的含量要高于普通大麦品种^[18]。

大麦中的 β -葡聚糖通常均匀地分布在大麦核中,因此在大麦的脱壳或者去皮过程不会显著影响大麦中 β -葡聚糖的含量。大量研究表明 β -葡聚糖有降血脂,预防心血管疾病;降血糖,预防糖尿病和改善肠道健康的功效^[19]。大麦除了富含 β -葡聚糖,还含有酚类化合物和黄酮类化合物,大麦多酚和黄酮含量越高,抗氧化活性越强^[20]。目前一系列以大麦为基础的食品包括早餐谷物、零食、烘焙类产品、饮料等目前已在市面上可以看见,相比以小麦为基础的产品,这些大麦产品为消费者提供了另一种选择^[21]。大麦的功能活性成分多样,其健康作用是多种活性物质协同作用的结果,如何进一步明确大麦某种成分的营养特性,开发出针对不同人群的大麦产品是研究重点。

1.3 燕麦

相比其他全谷物,燕麦是很多主要营养物质的重要来源,燕麦中淀粉含量低(27.3%~50.0%),纤维(13.6%~30.2%)、蛋白质(9.7%~17.3%)、多/单不饱和脂肪酸(5.2%~12.4%)含量高^[22]。燕麦中的 β -葡聚糖是由(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-葡萄糖基组成(图 1),因为(1 $\rightarrow$ 3)-链接可阻止分子紧密堆积,因此具有较高的溶解性^[23],使得燕麦溶液粘稠从而影响消化吸收。有研究者对比了燕麦中的 β -葡聚糖、燕麦抗性淀粉和全燕麦发现全燕麦在改善胰岛素抵抗和糖耐量时效果优于燕麦 β -葡聚糖和抗性淀粉^[24]。燕麦富含维生素 E、含有 β -葡聚糖和多种酚类化合物,燕麦的总抗氧化与清除自由基的能力与多酚含量呈正相关^[25]。研究表明,燕麦具有抗癌、降低血糖、帮助肠胃消化和防治心血管疾病的发生等功效,这些通常与燕麦所

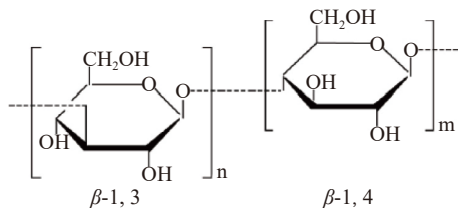


图 1 β -葡聚糖与 β -(1,4) 和 β -(1,3) 键的 β -结构^[27]

Fig.1 β -Structure of β -glucan with β -(1,4) and β -(1,3) linkages

含的膳食纤维和酚类化合物有关^[26]。燕麦目前被广泛用于制作粥、燕麦片、麦片粥、格兰诺拉燕麦棒、燕麦面粉、燕麦面包、饼干和饼干、燕麦牛奶、以燕麦为基础的益生菌饮料、早餐麦片、薄片和婴儿食品。未来针对不同人群,将聚焦燕麦的主要功能性成分(表 1)作为功能性食品配料用于产品开发中,具有广阔的应用前景。

表 1 燕麦主要功能性成分、功效和应用前景

Table 1 Main functional components, efficacy and application prospect of oat		
成分	功效	在食品中的应用前景
β -葡聚糖	降低血糖、改善 II 型糖尿病、降低胆固醇和降低血液胆固醇和低密度脂蛋白水平,对冠心病患者有健康益处 ^[28-29] 。	在降血糖的功能性食品和代餐类低能量食品具有广阔的发展前景。
蛋白肽	燕麦蛋白通过酶解后会生成不同的燕麦蛋白肽,不同处理条件下的蛋白肽具不同的抗氧化活性 ^[30] 。有研究指出燕麦蛋白肽能够抑制癌细胞的繁殖 ^[31] 。	可作为具有促进健康作用的功能性食品配料。
酚类化合物	燕麦中的多酚和黄酮类化合物具有明显的抑菌功效 ^[32] 。	可作为食品天然的防腐剂和抗氧化剂。

1.4 糙米

糙米是由麸皮胚芽和胚乳组成,糙米富含一系列营养和生物活性成分,比如膳食纤维、 γ -谷维素、维生素和矿物质^[33]。另外,糙米的麸皮和胚芽中富含一些游离氨基酸和芳香化合物^[34]。相比大米,糙米含有相当一部分维生素集中在糙米的糊粉层中,比如维生素 B₁、维生素 B₂、烟酸和维生素 E;糙米富含矿物质元素,主要集中在糙米的外壳层,且矿物质元素的含量根据糙米的种类、土壤环境等因素而异^[35]。糙米对于健康的益处主要来源于糙米中的一些富有抗氧化特性的酚类化合物。有研究指出糙米中花青素物质主要是矢车菊素和芍药素葡萄糖苷,这两种物质起到主要的抗氧化特性^[36]。

近年来消费者逐渐意识到糙米的营养特性,有研究者用 20%、40%、60%、80% 和 100% 的糙米粉替代小麦粉用于饼干的制作发现,糙米粉能够显著增加饼干的纤维含量,40% 的替代量可接受较高^[37]。日本曾成功研制出富含 γ -氨基丁酸的发芽糙米,并得到广泛认可,目前我国市面上糙米食品主要有糙米粥、糙米休闲食品和糙米婴幼儿食品等,目前一般对糙米进行挤压膨化、发芽、发酵和酶处理等处理来改

善糙米食品的可食性^[38]。Wang 等^[39]发现通过发芽和高压处理,糙米粉的流变学特性得到提高。糙米的成分和营养特性表明,食用糙米对人体健康有益,以糙米为原料开发的产品具有很大的消费者接受潜力,被认为是促进健康的功能性食品。

1.5 荞麦

荞麦是抗性淀粉和直链淀粉的良好来源,总碳水化合物约 70%,荞麦淀粉颗粒比小麦淀粉颗粒小 10 倍,并且有较高含量的直链淀粉(39.0%)和较高的糊化温度和糊化焓的抗性淀粉^[40]。荞麦蛋白质由不同的氨基酸组成,其必需氨基酸含量约为 40.77 mg/100 g(干基),其中谷氨酸含量最高,其次是精氨酸、天冬氨酸和丝氨酸,荞麦粒约有 3.25%~3.3% 的脂质,其中游离脂质占 2.5%,结合脂质占 1.5%,三酰甘油酯是荞麦脂类的主要成分,包含 10 种饱和脂肪酸和 9 种不饱和脂肪酸,其中油酸含量最高,其次是亚油酸和棕榈酸^[41]。

普通荞麦(*Fagopyrum esculentum* Moench)和苦荞(*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn)是许多生物活性化合物的来源,如芦丁、槲皮素、大黄素、光敏素和其他(多)酚类化合物^[42]。槲皮素以其抗氧化活性而闻名,以芦丁的形式自然产生,芦丁是一种天然的类黄酮,存在于许多食物中,特别是荞麦。芦丁具有显著的抗氧化活性,是重要的药用资源,Peng 等^[43]研究了芦丁、槲皮素和苦荞对高脂饮食大鼠脂质代谢的影响,发现芦丁、槲皮素和苦荞有降低大鼠肝脏脂肪沉积的趋势。荞麦种子中有一种重要的化合物叫做苦荞麦糖醇,它可以作为膳食补充剂使用,因为它很容易被 α -半乳糖苷酶水解并降低非胰岛素依赖型糖尿病受试者的血糖,助于维持血液中的正常葡萄糖水平,可用于治疗糖尿病和多囊性卵巢综合征^[44-45]。荞麦及其生物活性化合物可作为具有生产低血糖指数的功能性食品的潜力。

1.6 高粱

高粱中的营养成分主要是碳水化合物(淀粉和非淀粉多糖)、蛋白质和脂肪。相比其他谷物,高粱的营养特性主要来源于大量缓慢消化的淀粉,可以延迟肠道中淀粉的消化和吸收^[46]。高粱是良好的纤维素来源,高粱中的纤维素主要来源于高粱的胚乳细胞壁中^[47]。非淀粉化合物主要是阿拉伯聚糖和 β -葡聚糖组成的,阿拉伯聚糖主要是葡糖醛酸-阿拉伯木聚糖,包含对香豆酸和阿魏酸^[48]。高粱中的蛋白质可分为醇溶蛋白(比如高粱醇溶蛋白)和非醇溶蛋白质(比如球蛋白,谷蛋白和清蛋白),高粱醇溶蛋白占据了全高粱谷物蛋白的 70%,因为高粱醇溶蛋白聚合程度很高,且二硫键多,因此对酶消化的耐受度比较高^[49]。淀粉和蛋白质缓慢的消化性使得高粱成为针对肥胖和糖尿病人群良好的食物来源。

高粱中生物活性成分主要是酚类化合物,其中酚酸、黄酮类化合物(3-脱氧花青素)和单宁在酚类物质中占比很高^[50]。高粱产品常见于蒸制或煮制产品,

烘焙食品和发酵食品或饮料产品。目前对全高粱粉在食品中的应用也有研究, Wu 等^[51]用白高粱全谷物粉和红高粱全谷物粉制作馒头时发现, 馒头的抗氧化性因加入高粱粉而大大提升, 但蒸制会大大降低面团中酚类物质的含量。目前有研究尝试从高粱中提取酚类活性物质如单宁来开发功能性食品, Links 等^[52]将高粱中的单宁包封在高粱醇溶蛋白颗粒中而制作了一款功能食品, Girard 等^[53]发现高粱提取的单宁能够显著提高面团和面糊的黏度和稳定性, 浓缩单宁作为一种天然成分可以改善面筋品质, 未来可作为功能性原料应用于食品中。

1.7 小米

小米含有 5%~8% 的蛋白质, 65%~75% 碳水化合物, 15%~20% 的膳食纤维, 脂肪含量很低, 在 1.3% 左右^[54]。小米中的粗纤维含量要显著高于小麦和小米。小米中的碳水化合物含量与其他大部分谷物一样, 同样含有大量的可溶性和不可溶的膳食纤维, 在降低慢性血管疾病方面是非常有用的。小米富含异亮氨酸、蛋氨酸、色氨酸、苏氨酸和缬氨酸等必需氨基酸, 这些氨基酸对维持人体正常功能很重要。特别是蛋氨酸和色氨酸, 这两种氨基酸在其他谷物中并不常见。相比其他谷物, 小米中的钙的含量是最高的, 小米还富含镁、钾、钠、锰等矿物质元素。小米中含有脂溶性和水溶性维生素, 比如维生素 B₁、维生素 B₂、烟酸、维生素 C 和生育酚, 水溶性的 B 族维生素主要集中在小米的糊粉层, 而脂溶性维生素主要位于小米胚芽中^[55]。小米还具有一些生物活性物质, 参见表 2, 具有广阔的应用前景。

表 2 小米中的生物活性物质
Table 2 Bioactive components of millet

成分	功效	在食品中的应用前景
木聚糖	小米种皮中可提取出水溶性木聚糖 ^[56] 。	小米种皮是潜在的木聚糖来源, 用于益生元XOS生产的丰富的替代来源。
小米多肽	用胰蛋白酶水解得到的小米肽能够清除自由基 ^[57] , 用挤压和发酵方法制备的多肽具有血管紧张转换酶抑制作用和自由基清除能力 ^[58] 。	在缓解疲劳、增强机体免疫力的功能性食品中具有应用前景。
酚类化合物	小米种子外壳是生物活性物质包括多酚、生物黄酮素和植酸的重要来源, 有研究者从不同小米作物中都提取出了可溶性和结合酚类化合物, 酚类抗氧化物质在降低血糖、胆固醇、血压和肥胖方面有重要作用 ^[59] 。	可添加到食品中提高产品附加值。

1.8 藜麦

藜麦中蛋白质含量在 13.8%~16.5%, 平均在 15% 左右^[60], 藜麦被认为是一种完全蛋白质, 因为它含有人体所需的 9 种必需氨基酸, 即赖氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸、色氨酸、缬氨酸、组氨酸和蛋氨酸^[61]。Sharbir 等^[62]对比了 WHO/FAO 成人每日氨基酸推荐摄入量 and 美国农业部(USDA)国家营养标准中藜麦氨基酸含量, 由表 3 可知, 藜麦中的

氨基酸可满足成人对于基本氨基酸的需求。藜麦中蛋白质主要成分是麦清蛋白和麦球蛋白(占总蛋白质的 44%~77%), 而醇溶蛋白(0.5%~7.0%)占次要成分, 因此藜麦被认为是无麸质的, 因为它含有很少的醇溶蛋白, 这与患有谷蛋白不耐症的人特别相关^[63]。藜麦蛋白质的生物价值(biological value of protein, BV)为 83%, 高于鱼类(76%)、牛肉(74.3%)、大豆(72.8%)、小麦(64%)、大米(64%)和玉米(60%), 低于全蛋(93.7%)和牛奶(84.5%)^[64]。藜麦含有丰富的钙、镁、铁、铜和锌, Konishi 等^[65]用 X-射线检测, 磷、钾和镁存在于胚芽中, 果皮中的钙和磷存在细胞壁的果胶化合物中。藜麦富含 α -胡萝卜素和烟酸, 相比大麦和小麦, 藜麦中的核黄素(B₂)、 α -生育酚(维生素 E)和胡萝卜素较多。

表 3 WHO/FAO 推荐成人每日氨基酸摄入量与 USDA 公布的藜麦中氨基酸按量对比

Table 3 Daily amino acids intake by adult recommended by WHO/FAO compared with quinoa provided by USDA

氨基酸	WHO/FAO 推荐成人摄入量 (g/100 g 蛋白质)	USDA 藜麦中氨基酸含量 (g/100 g 蛋白质)
组氨酸	1.5	2.9
异亮氨酸	3.0	3.6
亮氨酸	5.9	5.9
蛋氨酸+半胱氨酸	2.2	3.6
苯丙氨酸+酪氨酸	3.8	6.1
苏氨酸	2.3	3.0
缬氨酸	3.9	4.2
赖氨酸	4.5	5.4
色氨酸	0.6	1.2

有研究者在藜麦种子中检测到多种酚类物质和黄酮类物质, 且藜麦种子的抗氧化活性超过苋菜、水稻和荞麦^[66]。有研究者发现添加藜麦粉可提高小麦面条面团的稳定性、改善面条硬度及弹性, 并且可有效降低淀粉的消化特性^[67]。范三红等^[68]发现添加藜麦的石头饼血糖生成指数明显降低。藜麦还可用于开发酿造藜麦啤酒和高纤维蛋白饮品等产品^[69-70]。藜麦因氨基酸种类比较齐全, 未来可与其他食品原料比如豆类搭配来提高食物的蛋白质含量并满足特定人群的氨基酸日常需求量。

2 全谷物的摄入对健康的益处

全谷物对人类健康有益, 流行病学研究发现, 全谷物食品在预防慢性疾病中起着至关重要的作用, 有研究结果表明每天摄入全谷物 48~80 g, 可降低心血管疾病及 2 型糖尿病风险的 21%~26%, 同时, 体重增长的风险也降低了 17%, 当每天摄入水平增加至 90 g 时, 其患结直肠癌的风险也大大降低^[71]。根据中国营养学会 2021 年发布的中国居民膳食指南科学研究报告, 与全谷物摄入水平低的人群相比, 高水平摄入全谷物的人群可更好的维持体重, 延缓体重增

长,降低患慢性疾病的风险和全因死亡的发生风险(图 2)。这主要是由于全谷物食品中丰富的膳食纤维、抗性淀粉和低聚糖,以及酚类化合物等抗氧化活性物质,这些物质都是预防疾病的重要成分^[72]。全谷物中的营养成分对健康的益处如表 4。

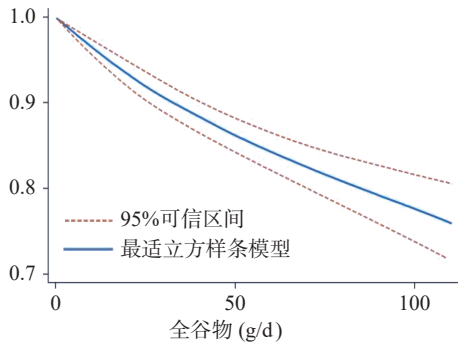


图 2 每日全谷物摄入水平与全因死亡发生风险的非线性剂量反应关系^[71]

Fig.2 Non-linear dose-response relationship between daily whole grain intake and the risk of all-cause death^[71]

3 全谷物产品开发现状

3.1 预拌粉

预拌粉是指选用不同特性的,设置不同种类的粉状原料和不同配方,添加不同的其他辅助组分,按照先进的物理、化学、生物等技术进行完全的混合^[84]。预拌粉把各种谷物的粉状原料合理搭配,更科学地方便人们食用。不仅可以为人们提供谷物丰富的营养价值,也在很大程度上缩短了制作时间。预拌粉有很多种类,如馒头预拌粉、面条预拌粉、蛋糕预拌粉、煎炸预拌粉等,可适用于蒸煮油炸等一系列制品^[85]。全谷物预拌粉富含谷物的营养物质,还有膳食纤维、抗氧化成分等生物活性物质,具有较好的保健功能。周雷等^[86]选用小麦、玉米、糙米为实验对象,研究全谷物营养组分并通过复配技术开发特色全谷物家庭预拌粉,研究表明,三种全谷物粉在营养成分上互补,通过配方制得的馒头感官品质较好。李妍等^[87]选用燕麦粉和荞麦粉为原料,以马芬蛋糕预拌

粉配方为基础,研发杂粮马芬蛋糕预拌粉,研究表明,燕麦马芬蛋糕预拌粉的蛋白含量较高,烘焙产品硬度小,荞麦马芬蛋糕预拌粉的灰分和黄酮含量较高,烘焙产品有麦香味,根据杂粮马芬蛋糕预拌粉配方烘焙的产品在马芬蛋糕风味基础上提高了营养价值。

对于小型食品厂和家庭来说,预拌粉的价格较低,相较于分别采购原料,预拌粉更简单方便,综合成本低,更容易受消费者的青睐。同时,预拌粉还可以机械自动化生产加工,既节省人力物力,也能够保证产品的品质。但目前家庭预拌粉并没有更深入的研究,预拌基础粉的配比也没有相关的文献资料介绍。预拌粉的优势虽然极大,但该方面的发展进展缓慢,还有一系列加工技术上和市场上的问题有待商讨。

3.2 烘焙产品

目前市场上,主要谷物烘焙产品是全麦面包,其既含有谷物中丰富的营养物质,同时具有小麦本身的麦香气,受欢迎度比较高。小麦是最主要谷物,小麦有面筋蛋白(麦谷蛋白和麦醇溶蛋白),面筋决定了面团的弹性、持气性和稳定结构的作用^[88]。全麦面包是以全麦粉或以按配方比例添加小麦麸皮后的普通面粉为原料,经过一系列加工工序最后烘焙而成的面包产品^[89]。非全麦的谷物,比如燕麦和大麦,并不能形成面筋,所以这种谷物粉很难形成面团结构。麸皮和胚芽也会影响面筋的形成,小麦麸皮会增加面团吸水的能力因为麸皮中存在戊聚糖^[90]。因为麸皮表面比较粗糙,会削弱或破坏面筋网络的形成,降低持气能力,形成比较粗糙的质构。尽管麸皮的添加会增加终产品的营养特性,但是它破坏了面筋的结构,不利于面团结构的形成。

虽然全麦面包等全谷物烘焙食品因其营养价值逐渐被消费者认可,但依然有些问题尚待解决,由于含有丰富的植物化学素、酶类、脂肪酸等,使得产品的保质期大大缩短,为了延长其保质期,在加工的过程中就要采取特殊技术处理或特殊包装,这也在很大程度上加大了全谷物食品的投入^[91-92]。同时面包老

表 4 全谷物中的营养成分对健康的益处
Table 4 Health benefits of nutrients in whole grains

营养成分	对健康的益处
膳食纤维	膳食纤维可增强饱腹感,降低能量摄入,控制体重,有研究表明小麦麸皮膳食纤维结合乳清蛋白可改善腹部肥胖患者的脂代谢,降低餐后甘油酸三脂 ^[73] 。
β -葡聚糖	β -葡聚糖是可溶性膳食纤维,可提高免疫力,促进益生菌增殖,改善肠道菌群 ^[74] ,有研究显示,全大麦饼干具有较低的血糖指数,且一块饼干可提供0.75 g以上的 β -葡聚糖,可降低血液胆固醇和心脏病风险 ^[75] 。
抗性淀粉	抗性淀粉是一种新型膳食纤维,可维持血糖稳定,摄入抗性淀粉后可在大肠内发酵产生短链脂肪酸,可促进肠道健康,保持肠道微生物稳态,并促进矿物质的吸收 ^[76-77] 。
低聚糖	低聚糖可促进营养物质吸收,能够降低胆固醇,抑制肥胖,有较强的免疫调节功能和心脏保护作用 ^[78] 。同时低聚糖还具有一定的抗炎活性,有益肠道健康预防结肠癌 ^[79] 。
酚类化合物	其抗氧化活性和抑菌作用对人体健康状况起到有益作用,它能够清除自由基,并且可调节机体的免疫系统,预防慢性疾病如心血管疾病、癌症等 ^[80] 。
氨基酸	氨基酸是人体不可缺少的营养素,有研究表明以玉米作为间歇性主食连续数天或数周摄入,其中赖氨酸的间歇性摄入可能具有癌症预防或治疗的价值和潜力 ^[81] 。
维生素和矿物质	是维持人体日常功能所需的营养素,与机体健康息息相关。谷物中富含丰富的B族维生素和镁、钾、锌等矿物质,对人体新陈代谢、营养、胃肠生理和免疫调节功能等有双向的影响作用 ^[82-83] 。

化和脂肪酸氧化产生哈败味等问题都会影响全谷物食品的风味。

3.3 面条、馒头等传统主食

馒头和面条都是中国的传统面制食品,是日常主食之一。将杂粮全谷物与馒头面条等结合起来,能够使馒头面条具有一定的营养和保健功能。馒头有东方面包之称,但由于生产者一味追求馒头的白度和外观,使馒头的口感风味及营养价值单一。因此许多学者针对馒头的工艺优化和品质改良作了许多研究。吕静等^[93]以小米糠为原料,制备小米糠膳食纤维,开发小米粉馒头,研究发现,小米粉馒头感官评价良好,血糖生成指数为中等水平,有利于控制血糖。蒯艳君等^[94]采用酶法改良全麦馒头的品质,结果显示葡萄糖氧化酶、戊聚糖酶和纤维素酶三种酶符合可显著改善全麦馒头的感官品质。

面条也是很受欢迎的面制食品,利用谷物杂粮来制作的面条产品在市场上也比较有特色,如荞麦面条、玉米面条、燕麦面条等。高彩凤等^[95]研究发现微粉处理的苦荞挂面具有良好的感官品质,同时可以缓解餐后血糖指数的升高,具有一定的保健功能。袁添璿等^[96]以藜麦为研究对象,将其引入面条,通过测定面条的品质确定藜麦粉的推荐添加量为20%,熟化藜麦粉的推荐添加量为30%。

尽管面条、馒头等面制主食相关技术已经逐渐成熟,但在面条、馒头中加入全谷物制成特色杂粮产品依旧存在一些问题,首先需要解决的就是口感问题,因为全谷物食品口感都较为粗糙,作为日常食用的主食,许多消费者更能接受细腻柔软的产品。其次就是面筋形成问题,谷物中含有大量的纤维素等成分,使得面筋网络结构的稳定性变差,降低面团的持气能力,进而使得产品的径高和比容较小,口感粗糙^[97]。因此优化加工工艺及使用有效的改良剂对改善全谷物食品至关重要。

3.4 冲调型全谷物食品

随着加工技术的逐渐成熟,谷物冲调粉行业快速发展。市场上出现了不少谷物冲调食品,如燕麦粥、黑芝麻糊、核桃粉、薏仁粉等多种谷物粉,这类产品不仅具有较高的营养价值,同时只需要经过简单烧煮或沸水冲调后即可食用,非常方便快捷。张丽颖等^[98]以红豆、糙米、燕麦、荞麦和薏米为原料,通过挤压膨化技术调整谷物粉的冲调性,优化工艺配比,得到了口感风味良好的全谷物早餐粉。胡晗等^[99]以速冻鲜莲为原料研制出了冲调性较好的莲子速溶粉,并在此基础上复配开发了莲子代餐粉,其蛋白质含量较高且热量低。

在谷物冲调粉行业高速发展的过程中,越来越多的消费者关注到其营养保健的功效,如通过食用低脂肪、低热量的谷物代餐粉可达到减肥、预防肥胖等目的。然而谷物冲调粉的营养加工及生产销售也存在了一定的缺陷,长期将冲调粉作为主食容易导致内

分泌失调和营养不良等问题^[100]。同时许多消费者对全谷物以及全谷物食品定义不清楚,全谷物是具有糊粉层、麸皮、胚芽和胚等完整的结构,并不是多种精制谷物混在一起就称为全谷物。这也致使一些不良厂商趁虚而入,虚假宣传。因此如何向更多的消费者普及全谷物食品的概念,在保证冲调粉口感的同时注重健康、营养、保健等方面的功效成为目前尚待解决的问题。

3.5 无谷蛋白(Gluten-free)的全谷物食品

小麦、黑麦和大麦中的面筋蛋白会引发自身免疫性失调造成腹泻。全世界中大约100人中有1人有腹泻疾病,而无面筋蛋白的食品是当下唯一的解决办法,即产品中不能含有小麦、黑麦和大麦成分^[101]。不含面筋的谷物食品一般使用精制面粉和/或者玉米淀粉、木薯淀粉制成。随着消费者对全谷物产品需求量的上升和腹泻现象的存在,一些不含面筋蛋白的全谷物食品越来越多,包括用荞麦、糙米做的早餐五谷食品和用荞麦、藜麦做的意大利面制品^[102]。随着越来越多的谷物被消费者熟悉,生产商家会制备出越来越多的营养和口感更好的不含面筋蛋白的全谷物产品。

4 结论

随着生活水平的提高,人们的消费观念发生了一定的改变,国民对健康食品的要求越来越严格。未来全谷物食品的发展一方面是应用现代加工新技术解决全谷物食品生产过程中存在的问题,保留全谷物中的营养物质,开发出口感优良、营养丰富的全谷物食品;另一方面针对全谷物中的生物活性物质的提取和应用需要深入研究,全谷物食品必将随着人们更加关注于膳食平衡营养全面等方面而不断深入研究下去,全谷物产业将是我国食品粮食加工工业的发展方向,对提高国民健康水平等方面有着重大的意义。

参考文献

- [1] 彭小霞. 全谷物酸牛奶的发酵技术及营养功能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. [PENG X X. Studies on the fermentation technology and nutritional functionality of whole grain yogurt[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.]
- [2] 谭斌, 谭洪卓, 刘明, 等. 全谷物食品的国内外发展现状与趋势[J]. 中国食物与营养, 2009(9): 4-7. [TAN B, TAN H Z, LIU M, et al. Development status and trend of whole grain food at home and abroad[J]. Food and Nutrition in China, 2009(9): 4-7.]
- [3] SLAVIN J. Whole grains and human health[J]. Nutrition Research Reviews, 2004, 17(1): 99-110.
- [4] AACC International. Definition of whole grain[EB/OL]. <http://www.aaccnet.org/definitions/wholegrain.asp>, 1999.
- [5] FDA(Food and Drug Administration). Health claim notification for whole grain foods[EB/OL]. 2018-09-14. <https://www.fda.gov/food/food-labeling-nutrition/health-claim-notification-whole-grain-foods>.
- [6] 袁佐云. 全麦粉抗氧化特性及全麦馒头品质改良研究[D].

- 北京: 中国农业科学院, 2016. [YUAN Z Y. Study on antioxidant activity of whole wheat flour and quality improvement of whole wheat Chinese steamed bread[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2016.]
- [7] 李富华, 郭晓晖, 夏春燕, 等. 全谷物酚类化合物抗氧化活性研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(13): 299–304. [LI F H, GUO X H, XIA C Y, et al. Research advance in antioxidant activity of phenolic compounds in whole grains[J]. Food Science, 2012, 33(13): 299–304.]
- [8] 左乃北. 改良挤压技术制备全谷物物质构米及其品质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012. [ZUO N B. Preparation and qualities of whole grain rice produced by improved extrusion cooking technology[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.]
- [9] 杨淑妮, 李理. 全谷物酸奶的理化及功能特性研究[J]. 中国乳品工业, 2016, 44(4): 17–20. [YANG S N, LI L. Researches on the physicochemical and functional properties of whole grain yogurt[J]. China Dairy Industry, 2016, 44(4): 17–20.]
- [10] 龚凌霄. 青稞全谷物及其防治代谢综合征的作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. [GONG L X. Studies on whole grain of Tibetan hull-less barley and its effect on metabolic syndrome[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.]
- [11] 张倩芳, 李敏, 孟晶岩, 等. 小麦麸皮改性及在食品中的应用研究进展[J]. 农产品加工, 2021(1): 64–67. [ZHANG Q F, LI M, MENG J Y, et al. Research progress on wheat bran modification and its application in food[J]. Farm Products Processing, 2021(1): 64–67.]
- [12] BAE W, LEE S H, YOO S H, et al. Utilization of a maltotetraose-producing amylase as a whole wheat bread improver: Dough rheology and baking performance[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(8): 1535–1540.
- [13] 肖志刚, 李芮芷, 罗志刚, 等. 添加改性麸皮对含麸皮面包结构及消化特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 39–44. [XIAO Z G, LI R Z, LUO Z G, et al. Effect of modified wheat bran on the structure and digestibility of bread[J]. Food Science, 2021, 42(6): 39–44.]
- [14] CIAN R. Structure-mechanism relationship of antioxidant and ACE I inhibitory peptides from wheat gluten hydrolysate fractionated by pH[J]. Food Research International, 2015, 2: 246–251.
- [15] JOANNE S. Why whole grains are protective: Biological mechanisms[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2007, 62(1): 129–134.
- [16] RIEDER A, KNUTSEN S H, BALLANCE S. In vitro digestion of beta-glucan rich cereal products results in extracts with physicochemical and rheological behavior like pure beta-glucan solutions-A basis for increased understanding of in vivo effects[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 67: 74–84.
- [17] SHARMA P, GUJRAL H S, SINGH B. Antioxidant activity of barley as affected by extrusion cooking[J]. Food Chemistry, 2012, 131(4): 1406–1413.
- [18] OSCARSSON M, ANDERSSON R, AMAN P, et al. Effects of cultivar, nitrogen fertilization rate and environment on yield and grain quality of barley[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 1998, 78(3): 359–366.
- [19] AOKI S, IWAI A, KAWATA K, et al. Oral administration of the *Aureobasidium pullulans*-derived β -glucan effectively prevents the development of high fat diet-induced fatty liver in mice[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10457.
- [20] 慕文涛, 陈文若, 陈银基, 等. 大麦功能活性物质含量与抗氧化活性的关系[J]. 中国食品学报, 2018, 18(11): 232–238. [QI W T, CHEN W R, CHEN Y J, et al. An exploration of the correlation between the contents of functional active substances in barley and their antioxidant capacity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(11): 232–238.]
- [21] SHARMA P, GUJRAL H S. Antioxidant potential of wheat flour chapattis as affected by incorporating barley flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56(1): 118–123.
- [22] STERNA V, ZUTE S, BRUNAVA L. Oat grain composition and its nutrition benefice[J]. Agriculture & Agricultural Science Procedia, 2016, 8: 252–256.
- [23] DAOU C, ZHANG H. Oat beta-glucan: Its role in health promotion and prevention of diseases[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2012, 11: 355–365.
- [24] ZHU Y, DONG L, HUANG L. 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.
- [25] PETERSON D M, HAHN M J, EMMONS C L. Oat avenanthramides exhibit antioxidant activities in vitro[J]. Food Chemistry, 2002, 79(4): 473–478.
- [26] THONDRE P S, RYAN L, HENRY C J K, et al. Influence of polyphenols on vitro starch digestibility of oat porridges[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2011, 70(OCE4): 138.
- [27] 田西, 代以琴, 杨梅, 等. 燕麦化学成分及其生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11): 353–368. [TIAN X, DAI Y Q, YANG M, et al. Research progress on chemical constituents and biological activities of oats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(11): 353–368.]
- [28] JOYCE S A, KAMIL A, FLEIGE L, et al. The cholesterol-lowering effect of oats and oat beta glucan: Modes of action and potential role of bile acids and the microbiome[J]. Frontiers in Nutrition, 2019, 6: 171.
- [29] TONG L T, GUO L N, ZHOU X R, et al. Effects of dietary oat proteins on cholesterol metabolism of hypercholesterolaemic hamsters[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(4): 1396–1401.
- [30] OA S-V, ALVAREZ A, CUEVAS-R E O, et al. Impact of in vitro gastrointestinal digestion on peptide profile and bioactivity of cooked and non-cooked oat protein concentrates[J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 93–104.
- [31] GUO W M, NIE L, WU D Y, et al. Avenanthramides inhibit proliferation of human colon cancer cell lines in vitro[J]. Nutrition and Cancer, 2010, 62(8): 1007–1016.
- [32] 王双慧, 梅群芳, 冯晓汀. 燕麦 β -葡聚糖、多酚及黄酮的抑菌活性研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(12): 96–101. [WANG S H, MEI Q F, FENG X T. Study on the antibacterial activity of oat beta-glucan, polyphenols and flavonoids[J]. Food Re-

[search and Development](#), 2020, 41(12): 96–101.]

[33] CHO D H, LIM S T. Germinated brown rice and its bio-functional compounds[J]. [Food Chemistry](#), 2016, 196(1): 259–271.

[34] ITANI T, TAMAKI M, ARAI E, et al. Distribution of amylose, nitrogen, and minerals in rice kernels with various characters[J]. [Journal of Agricultural & Food Chemistry](#), 2002, 50(19): 5326.

[35] MIR S A, BOSCO S, SHAH M A, et al. Variety difference in quality characteristics, antioxidant properties and mineral composition of brown rice[J]. [Journal of Food Measurement and Characterization](#), 2015, 10(1): 177–184.

[36] HU C, ZAWISTOWSKI J, LING W, et al. Black rice (*Oryza sativa* L. indica) pigmented fraction suppresses both reactive oxygen species and nitric oxide in chemical and biological model systems[J]. [Journal of Agricultural & Food Chemistry](#), 2003, 51(18): 5271–5277.

[37] DHILLON B, SODHI N S, ANEJA E, et al. Physico-chemical and textural (sensorial and electromyographic) evaluation of cookies formulated using different ratios of brown rice flour and refined wheat flour[J]. [Journal of Food Measurement and Characterization](#), 2020: 1–9.

[38] 吕呈蔚, 岳玉兰, 王政, 等. 糙米营养价值及加工技术研究进展[J]. [粮油食品科技](#), 2020, 28(6): 140–144. [LV C Y, YUE Y L, WANG Z, et al. Research progress on the nutritional value and processing technology of brown rice[J]. [Science and Technology of Cereals, Oils and Foods](#), 2020, 28(6): 140–144.]

[39] WANG H, HU F F, WANG C F, et al. Effect of germination and high pressure treatments on brown rice flour rheological, pasting, textural, and structural properties[J]. [Journal of Food Processing and Preservation](#), 2020, 44(6): e14474.

[40] LIU W, BRENNAN M, SERVENTI L, et al. Buckwheat flour inclusion in Chinese steamed bread: Potential reduction in glycemic response and effects on dough quality[J]. [European Food Research and Technology](#), 2017, 243(6): 1105–1106.

[41] SENTHIL S A. Effect of hydrothermal treatment on the nutritional and functional properties of husked and dehusked buckwheat[J]. [Journal of Food Processing & Technology](#), 2015, 6(7): 1–7.

[42] LUTHAR Z, GERM M, LIKAR M, et al. Breeding buckwheat for increased levels of rutin, quercetin and other bioactive compounds with potential antiviral effects[J]. [Plants](#), 2020, 9(12): 1638.

[43] PENG L X, ZHANG Q, ZHANG Y H. Effect of tartary buckwheat, rutin, and quercetin on lipid metabolism in rats during high dietary fat intake[J]. [Food Science & Nutrition](#), 2019: 1–15.

[44] CHRISTA K, M SORAL-ŠMIETANA. Buckwheat grains and buckwheat products-nutritional and prophylactic value of their components-a review[J]. [Czech Journal of Food Sciences](#), 2003, 26(3): 153–162.

[45] GAO J F, IVAN K, CHAO G M, et al. Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) starch, a side product in functional food production, as a potential source of retrograded starch[J]. [Food Chemistry](#), 2016, 190: 552–558.

[46] BARROS F, AWIKA J, ROONEY L W. Effect of molecular weight profile of sorghum proanthocyanidins on resistant starch

formation[J]. [Journal of the Science of Food & Agriculture](#), 2014, 94(6): 1212–1217.

[47] MARTINO H, TOMAZ P A, ÉEICA A M, et al. Chemical characterization and size distribution of sorghum genotypes for human consumption[J]. [Revista do Instituto Adolfo Lutz](#), 2012, 71(2): 337–344.

[48] VERBRUGGEN M A, BELDMAN G, VORAGEN A. Enzymic degradation of sorghum glucuronoarabinoxylans leading to tentative structures[J]. [Carbohydrate Research](#), 1998, 306(1–2): 275.

[49] DA S L, TAYLOR J, TAYLOR J R. Transgenic sorghum with altered kafirin synthesis: Kafirin solubility, polymerization, and protein digestion[J]. [Journal of Agricultural and Food Chemistry](#), 2011, 59(17): 9265–9270.

[50] XIONG Y, ZHANG P, WARNER R D, et al. Sorghum grain: From genotype, nutrition, and phenolic profile to its health benefits and food applications[J]. [Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety](#), 2019, 18(6): 2025–2046.

[51] WU G, SHEN Y, QI Y, et al. Improvement of *in vitro* and cellular antioxidant properties of Chinese steamed bread through sorghum addition[J]. [LWT](#), 2018, 91: 77–83.

[52] LINKS M R, TAYLOR J, KRUGER M C, et al. Sorghum condensed tannins encapsulated in kafirin microparticles as a nutraceutical for inhibition of amylases during digestion to attenuate hyperglycaemia[J]. [Journal of Functional Foods](#), 2015, 12: 55–63.

[53] GIRARD A L, TEFERRA T, AWIKA J M. Effects of condensed vs hydrolysable tannins on gluten film strength and stability[J]. [Food Hydrocolloids](#), 2018, 89: 36–43.

[54] CHETHAN S, MALLESHI N G. Finger millet polyphenols: Characterization and their nutraceutical potential[J]. [American Journal of Food Technology](#), 2007, 2(7): 618–629.

[55] OBILANA A B, MANYASA E. Pseudocereals & less common cereals[M]. Germany: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG, 2002: 177–217.

[56] AYYAPPAN P, SHANMUGA S Y, SARAVANAN S, et al. Characterization of xylan from rice bran and finger millet seed coat for functional food applications[J]. [Journal of Cereal Science](#), 2017, 75: 296–305.

[57] HIMANI A, ROBIN J, MAHESH G. Isolation, purification and characterization of antioxidative peptide of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) protein hydrolysate[J]. [Food Chemistry](#), 2016, 204(8): 365–372.

[58] 侯殿志, 陈静, 沈群. 挤压和发酵对小米多肽 ACE 抑制活性及抗氧化作用的影响[J]. [中国食品学报](#), 2020, 20(5): 174–180. [HOU D Z, CHEN J, SHEN Q. Effect of extrusion and fermentation on ace inhibitory activity and antioxidant activity of foxtail millet polypeptide[J]. [Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology](#), 2020, 20(5): 174–180.]

[59] DEVI P B, VIJAYABHARATHI R, SATHYABAMA S, et al. Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fiber: A review[J]. [Journal of Food Science and Technology](#), 2014, 51(6): 1021–1040.

[60] KOZIOL M J. Chemical composition and nutritional evalu-

ation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. *J Food Composition Analysis*, 1992, 5(1): 35–68.

[61] REPO-CARRASCO R, ESPINOZA C, JACOBSEN S E. Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and Kaiwa (*Chenopodium pallidicaule*)[J]. *Food Reviews International*, 2003, 19(1): 179–189.

[62] SHABIR A, ANNAMALAI M, MANZOOR A S. Whole grains processing, product development, and nutritional aspects[M]. US: CRC Press, 2019: 163.

[63] VALENCIA-CHAMORRO S A. Quinoa: Overview[J]. *Encyclopedia of Food Grains*, 2016: 341–348.

[64] MEZQUITA P C, BARRIENTOS E A, VALDIVIA G R, et al. Development of a high content protein beverage from Chilean mesquite, lupine and quinoa for the diet of preschoolers[J]. *Nutrition Hosp*, 2012, 27(1): 232–243.

[65] KONISHI Y, HIRANO S, TSUBOI H, et al. Distribution of minerals in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds[J]. *Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan*, 2004, 68(1): 231–234.

[66] GONZALEZ J A, KONISHI Y, BRUNO M, et al. Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(6): 1222–1229.

[67] 王庆卫, 刘启玲. 藜麦粉对面条品质以及体外消化特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(1): 31–34. [WANG Q W, LIU Q L. Effects of quinoa powder on noodle quality and *in vitro* digestion characteristics[J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(1): 31–34.]

[68] 范三红, 许珍珍, 白宝清, 等. 藜麦石头饼的工艺及消化特性[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(7): 150–156. [FAN S H, XU Z Z, BAI B Q, et al. Processing and digestive characteristics of quinoa stone cake[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(7): 150–156.]

[69] 杨贵恒, 聂聪, 姚青海, 等. 藜麦啤酒的酿造方法及香气化合物[J]. *食品工业*, 2020, 41(11): 51–54. [YANG G H, NIE C, YAO Q H, et al. Brewing method and aroma compounds of quinoa beer[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(11): 51–54.]

[70] 董吉林, 安双双, 申瑞玲, 等. 藜麦复合高纤维蛋白饮品的研制[J]. *食品工业*, 2021, 42(2): 151–154. [DONG J L, AN S S, SHEN R L, et al. Development of quinoa compound high fibrin beverage[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(2): 151–154.]

[71] SCHWINGSHACKL L, SCHWEDHELM C, HOFFMANN G, et al. Food groups and risk of all-cause mortality: A systematic review and meta-analysis of prospective studies[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2017, 105(6): 1531–1548.

[72] 鞠兴荣, 何荣, 易起达, 等. 全谷物食品对人体健康最重要的营养健康因子[J]. *粮食与食品工业*, 2011, 18(6): 1–6. [JU X R, HE R, YI Q D, et al. The most important nutrition and health factors on human health existing in whole-grain food[J]. *Cereal & Food Industry*, 2011, 18(6): 1–6.]

[73] RAKVAAG E, FUGLSANG-NIELSEN R, KNUDSEN K, et al. Whey protein combined with low dietary fiber improves lipid profile in subjects with abdominal obesity: A randomized, con-

trolled trial[J]. *Nutrients*, 2019, 11(9): 2191.

[74] M MARTÍNEZ-SUBIRÀ, ROMERO M P, PUIG E, et al. Purple, high β -glucan, hulless barley as valuable ingredient for functional food[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 131: 109582.

[75] PINO J L, MUJICA V, ARREDONDO M. Effect of dietary supplementation with oat β -glucan for 3 months in subjects with type 2 diabetes: A randomized, double-blind, controlled clinical trial[J]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 77: 104311.

[76] ZHOU Y, WEI Y, YAN B, et al. Regulation of tartary buckwheat-resistant starch on intestinal microflora in mice fed with high-fat diet[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(7): 3243–3251.

[77] MARTINEZ O, THEODORO J, GRANCIERI M, et al. Dry heated whole sorghum flour (BRS 305) with high tannin and resistant starch improves glucose metabolism, modulates adiposity, and reduces liver steatosis and lipogenesis in Wistar rats fed with a high-fat high-fructose diet[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 99: 103201.

[78] 陈秋燕, 王国, 尹娜, 等. 发酵麦麸阿魏酰低聚糖的纯化工艺及其心脏保护作用研究 [J/OL]. *中国粮油学报*: 1–17[2021-04-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210318.1004.004.html>. [CHEN Q Y, WANG Y, YIN N, et al. Study on the purification technique of feruloylated oligosaccharide from fermented wheat bran and its heart protection activities[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*: 1–17[2021-04-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210318.1004.004.html>.]

[79] PLONGBUNJONG V, GRAIDIST P, KNUDSEN K, et al. Isomaltooligosaccharide synthesised from rice starch and its prebiotic properties *in vitro*[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52(12): 2589–2595.

[80] 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 hulless barley[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 111: 534–540.

[81] GHULAM S, BOTTING H G, PEACE R W. Amino acid rating method for evaluating protein adequacy of infant formulas[J]. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 2020(4): 4.

[82] STACCHIOTTI V, REZZI S, EGGERSDORFER M, et al. Metabolic and functional interplay between gut microbiota and fat-soluble vitamins[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020(3): 1–22.

[83] COUDRAY C, LEVRAT-VERNY M A, TRESSOL J C, et al. Mineral supplementation of white wheat flour is necessary to maintain adequate mineral status and bone characteristics in rats[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine & Biology*, 2001, 15(2-3): 131–137.

[84] GEORGHIOU L, METCALFE J S, GIBBONS M, et al. Flour milling and baking research association and tweedy of burnley: Chorleywood bread process[M]. Palgrave Macmillan UK, 1986.

[85] 袁佐云, 朱运平, 俞伟祖, 等. 蒸煮与发酵对全谷物粉甲醇提取物抗氧化活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(2): 25–32. [YUAN Z Y, ZHU Y P, YU W Z, et al. Effect of steam and

fermentation on the antioxidant activity of the methanol extract of whole grain[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(2): 25-32.]

[86] 周雷. 全谷物家庭预拌基础粉工艺参数及馒头产品研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015. [ZHOU L. Research on the process parameters and steamed bread products of whole grain pre-mix based powder for family[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015.]

[87] 李妍. 杂粮马芬蛋糕预拌粉的配方优化与评价[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014. [LI Y. Optimization and evaluation of mixed mixtures of multigrain muffin cake[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2014.]

[88] 皮俊翔. 茶多酚对面筋蛋白网络结构影响机制的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [PI J X. Research on the influence mechanism of tea polyphenols on gluten protein network structure[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]

[89] 王玉婉, 涂政, 叶阳. 超微茶粉对全麦面包品质及其淀粉消化特性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 79-85. [WANG Y W, TU Z, YE Y. Effect of superfine tea powder on quality and starch digestion properties of whole-wheat bread[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 79-85.]

[90] PENELLA J S, COLLAR C, HAROS M. Effect of wheat bran and enzyme addition on dough functional performance and phytic acid levels in bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48(3): 715-721.

[91] 卢黄华, 丁玉琴, 曾端辉, 等. 糙米全谷物食品加工新技术及产品的开发[J]. *食品工业*, 2015, 36(6): 246-250. [LU H H, DING Y Q, ZENG D H, et al. Research on new technology of food processing and products development in whole grain brown rice[J]. *The Food Industry*, 2015, 36(6): 246-250.]

[92] 温青玉, 张康逸, 屈凌波, 等. 青麦仁分离蛋白理化性质及功能特性的研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9): 8. [WEN Q Y, ZHANG K Y, QU L B, et al. Study on the physicochemical properties and functional properties of green wheat kernel protein isolate[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(9): 8.]

[93] 吕静. 小米糠膳食纤维结构和营养特性及在馒头中的应用研究[D]. 郑州: 郑州轻工业学院, 2017. [LV J. Structure and nutritional characteristics of millet bran dietary fiber and its application research in steamed bread[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2017.]

[94] 简艳君. 复合酶处理对全麦馒头品质的改良作用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. [LIN Y J. Quality improvement of whole wheat Chinese steamed bread with compound enzyme[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.]

[95] 高彩凤, 魏婷, 方纯, 等. ACIM 制粉对苦荞粉及其挂面品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(6): 13-21. [GAO C F, WEI T, FANG C, et al. Effect of ACIM power on quality of tartary buckwheat flour and its noodle[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(6): 13-21.]

[96] 袁添璐. 藜麦面条加工工艺研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020. [YUAN T Z. Research on the processing technology of quinoa noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.]

[97] 杨新生, 翟小童, 谭斌, 等. 加工方式对全谷物粳米制品体外消化特性的影响[J]. *粮油食品科技*, 2017, 25(2): 5-10. [YANG X S, ZHAI X T, TAN B, et al. Effects of processing methods on the *in vitro* digestion characteristics of rice products[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2017, 25(2): 5-10.]

[98] 张丽颖. 杂粮代餐粉冲调性质的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017. [ZHANG L Y. A study on the drums of cooked food[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.]

[99] 胡晗. 莲子速溶粉加工工艺的研究及代餐粉的开发[D]. 福州: 福建农林大学, 2020. [HU H. Research on processing technology of lotus seed instant powder and development of meal replacement powder[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.]

[100] 冯飞. 复合杂粮冲调粉的制备工艺及风味品质评价[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2020. [FENG F. Preparation technology and flavor quality evaluation of compound grains preparation powder[D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Sciences, 2020.]

[101] MAKINEN O E, ZANNINI E, ARENDT E K. Germination of oat and quinoa and evaluation of the malts as gluten free baking ingredients[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2013, 68(1): 90-95.

[102] HEMERY Y, CHAURAND M, HOLOPAINEN U, et al. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, Part I: Influence of ultra-fine grinding[J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 53(1): 1-8.