

杂粮重组米的功能特性及其影响因素

蔡青烽¹ 林星朱¹ 刘静雪¹ 高婷婷¹ 孙建军² 朱艳媛³

(1. 吉林农业科技学院食品科学与营养工程学院, 吉林 吉林 132101; 2. 通榆县农业科学技术推广站, 吉林 白城 137099; 3. 通榆县农产品质量安全监测中心, 吉林 白城 137299)

摘要: 杂粮重组米不仅富含蛋白质、矿物质、维生素等营养物质, 还含有多种活性成分, 对预防高血压、高血脂、高血糖等慢性疾病有重要作用。文章阐述了原辅料组成、加工工艺对杂粮重组米品质的影响, 重点阐述了其降血糖、调节肠道菌群、抗氧化、降血脂、降胆固醇、抗肥胖及补充人体所需矿物质等方面的功能特性研究现状, 并对功能性杂粮重组米的开发及品质改善研究进行了展望。

关键词: 杂粮; 重组米; 品质; 功能特性

Functional properties and influencing factors of multigrain recombinant rice

CAI Qingfeng¹ LIN Xingzhu¹ LIU Jingxue¹ GAO Tingting¹ SUN Jianjun² ZHU Yanyuan³

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin, Jilin 132101, China; 2. Agricultural Science and Technology Extension Station of Tongyu County, Baicheng, Jilin 137099, China; 3. Agricultural Product Quality and Safety Monitoring Center of Tongyu County, Baicheng, Jilin 137299, China)

Abstract: Multigrain recombinant rice is not only rich in protein, minerals, vitamins and other nutrients, but also contains a variety of active ingredients, playing an important role in preventing chronic diseases such as hypertension, hyperlipidemia, and hyperglycemia. This paper expounds the influences of the composition of raw materials and processing technology on the quality of multigrain recombinant rice, focusing on the research status of its functional properties such as lowering blood sugar, regulating intestinal flora, antioxidation, lowering blood lipids, lowering cholesterol, anti-obesity, and supplementing minerals needed by the human body. Furthermore, this paper makes an outlook on the development and quality improvement of multigrain recombinant rice.

Keywords: multigrain; recombinant rice; quality; functional property

杂粮通常是指除了大米、小麦、玉米、大豆及薯类五大类主粮之外的粮豆作物, 包括荞麦、藜麦、燕麦、小米、红豆等^[1], 含有丰富的营养价值和活性成分, 是调整饮食结构、促进机体健康的重要粮豆作物^[2]。杂粮重组米是指通过杂粮复配后重新加工得到的“杂粮米”, 也称工程米、复合米、人造米或再制米。在中国, 杂粮重组米及其制品应符合 NY/T 2074—2016。在感官上, 杂粮重组米形态要均匀、具有产品本身固有的光泽、色泽和气味且无病斑粒、无异味。

中国有超过 1/2 的人口对大米的需求和消费量仍占

主导地位^[3], 但天然食用大米营养较为单一, 不能满足特定人群的需求, 而杂粮重组米具有一定的特殊功能特性。在《中国居民营养膳食指南》金字塔中, 以“食物多样, 谷类为主”为理论基础, 优选杂粮如燕麦、大麦、糙米、黑米等以及富含植物化学成分的马铃薯、玉米等食物, 通过挤压生产的杂粮重组米, 可弥补普通大米的营养缺陷, 各营养成分搭配更加均衡^[4], 而且在增强机体功能、修复体质、调节免疫和内分泌、提高机体应激能力、预防疾病、抗癌、减肥、辅助治疗等方面也有非常好的效果, 对人体健康起着重要作用^[5-6]。但杂粮重组米存在口感较粗糙、适口性

基金项目: 国家级大学生科技创新创业训练计划项目(编号: 202411439013); 吉林省科技发展计划项目(编号: 20240303062NC)

通信作者: 刘静雪(1988—), 男, 吉林农业科技学院讲师, 硕士。E-mail: liujingxue08@163.com

高婷婷(1990—), 女, 吉林农业科技学院讲师, 硕士。E-mail: gaoting05@163.com

收稿日期: 2024-09-10 **改回日期:** 2024-12-06

较差和不易烹饪等问题^[5],不被大部分消费者接受、青睐,难以作为人们日常的主食。20世纪70年代,挤压重组米首次被研究,随后被广泛应用于食品加工中,在米制品的研制中具有独特的优势^[7],能够改善杂粮重组米口感粗糙、不易蒸煮的问题。随着生活品质的提高,国家积极开展“全民营养周”活动,大力宣传中国居民膳食指南内容,普及营养健康知识,人们对摄入主食的观念逐渐由“精”转变为“全”,更加注重主食的营养健康均衡^[8]。文章拟通过综述杂粮重组米品质,重点阐述其功能特性的研究进展,以期对杂粮重组米的开发与推广提供依据。

1 杂粮重组米的品质

1.1 原辅料组成对杂粮重组米品质的影响

杂粮重组米的品质包括食用品质、感官品质及营养品质等。不同的原材料、辅料及添加剂的种类、数量等均会不同程度地影响杂粮重组米的品质。选择10%的薏米、燕麦、高粱挤压一次后,再与10%芸豆、60%大米进行二次挤压可得到复合杂粮重组米,加入薏米、燕麦、高粱和芸豆后,产品的营养效果好,且解决了单一杂粮原料所得产品品质差的问题^[9]。李兆钊^[10]发现,荞麦、青稞、藜麦、鹰嘴豆和燕麦麸皮5种杂粮添加物较原大米而言,蛋白质和膳食纤维含量高,总淀粉含量低,且均会显著提高杂粮重组米的回生值,降低重组米的口感。熊善波^[11]探究了玉米粉与不同米粉配比对杂粮重组米品质的影响,以及不同食品改良剂对其食用品质的改良情况。结果表明,当玉米粉与米粉配比为1:1时,米饭的黏附性、膨胀率降低,耐煮性和食用口感上升,且以粳米粉为原料的杂粮重组米的外观更有光泽、硬度更好。适当比例的大豆分离蛋白、单甘酯或复合改良剂加入以籼米为原料的杂粮重组米中,可解决杂粮重组米耐煮性差的问题。马铃薯内部分小颗粒淀粉不能被胃和小肠中的酶消化,具有类似于纤维的抗消化生理功能,常被作为主要原料用于改善食物的抗消化特性,提升产品的营养价值^[12]。然而马铃薯重组米存在外观、口感不足的问题,可加入改良剂以改善其品质^[13]。曾希珂等^[14-15]研究表明,当单甘酯添加量为0.3%,海藻酸钠添加量为0.4%,瓜尔豆胶添加量为0.4%时,可明显提高马铃薯重组米品质。孙威等^[16]研究发现,葛根重组米的总黄酮含量为0.13 mg/g,采用高效液相色谱测得葛根素纯度为76.9%,表明葛根重组米的营养价值较高。陈怡岑等^[17]选择大米、玉米、红小豆、高粱米为基础原料,经挤压膨化处理制成具有易消化、营养全面、不易回生的杂粮重组米。Kurniawati等^[18]将高粱、红米、玉米和毛豆按不同配比分6种配方制备杂粮重组米,其中40%高粱、10%红米、10%玉米、40%毛豆的杂粮重组米的营养成分最佳。

1.2 加工工艺对杂粮重组米品质的影响

1.2.1 挤压参数和技术 随着挤压技术的发展,杂粮重组米的加工从单螺杆挤出技术逐渐过渡到双螺杆挤出制备,双螺杆是制备杂粮重组米的有效途径。殷明等^[19]以大米、玉米、小麦、燕麦为原料,采用单螺杆挤压技术,确定最佳工艺条件为机筒温度120℃、物料水分含量24%、螺杆转速220 r/min,此时糊化度最高。李欣洋等^[20]以碎米为主要原料,添加马铃薯粉、大豆粉及燕麦粉为辅料,通过双螺杆挤压技术研制杂粮重组米。随着挤压温度的不断升高,杂粮重组米的硬度和黏聚性下降,当水分添加量为29%时,杂粮重组米的弹性、黏聚性、硬度和咀嚼性均高于对照组。当螺杆转速为180 r/min时,杂粮重组米的感官评分及糊化度最好。韩风等^[21]选择黑藜麦粉、绿豆粉及碎糙米粉为原料制备藜麦绿豆重组米,当挤压温度为140℃、螺杆转速为150 r/min、水分含量为33%时,藜麦绿豆重组米的游离多酚和结合多酚含量分别提高了14.58%和13.43%。何忠源等^[22]以碎米、燕麦、小米、玉米为原料,采用双螺杆制备杂粮重组米,在机筒温度60℃、物料水分含量30%、螺杆转速160 r/min的条件下制备的杂粮重组米的感官评分最高。谢天等^[23]对双螺杆挤压处理前后玉米重组米的理化特性及品质特性进行分析,发现挤压处理对玉米的理化特性指标有负面影响,但能明显提高产品加工性能和食用特性。预糊化能明显改善杂粮重组米的品质,张克等^[24]采用二次挤压的方法制备马铃薯重组米,先用单螺杆挤压机对马铃薯粉和早籼米粉进行预糊化,再用双螺杆挤出机制备出马铃薯重组米。结果表明,增加进料的糊化度可有效提高杂粮重组米的弹性。Liu等^[25]在60~90℃的挤压温度下,研究了杂粮重组米的消化特性,发现其可有效降低餐后血糖水平。

1.2.2 原料预处理 以大米为主要原料,富含膳食纤维、抗性淀粉的杂粮(燕麦、苦荞、杂豆等)为辅料,通过联用气流微膨化、生物酶解与修饰等原料预处理工艺,可促进淀粉质和脂类物质、膳食纤维等重组,形成淀粉脂、纤维脂等复合物,不仅可保证产品外观品质和营养性,还可生产出口感优良的低GI杂粮重组米^[26]。推文轩^[27]利用植物乳杆菌dy-1对大麦麸皮进行固态发酵处理,发现能够有效避免大麦重组米中 β -葡聚糖和酚类物质的损失,饱和脂肪酸含量显著降低。张依睿^[28]采用微波联合韧化的方法对马铃薯淀粉进行物理改性处理,将改性马铃薯淀粉与碎米粉进行挤压制得马铃薯重组米,当改性马铃薯淀粉加入量为40%时,米汤中固体溶出率最低,且马铃薯重组米蒸煮后不易碎。张克等^[29]分别将马铃薯全粉与淀粉酶、化学改性剂进行预处理,经挤压高温膨胀制备马铃薯重组米,目的是改善其在小肠阶段的消化特性,提升产品营养价值。研究发现,马铃薯和淀粉酶能够增强马铃薯重组米的抗消化特性;化学改性剂则会降低马铃薯重

组米的水解度和消化率。罗佳倩^[3]采用发芽、发芽联合热处理对苦荞麦进行预处理,两种预处理方式均能提高其总黄酮、总酚、芦丁、槲皮素等功能性物质含量,且体外抗氧化能力、 α -淀粉酶抑制效果较好,此杂粮重组米可供高血糖人群食用。谢天^[30]运用酶法改性、物理改性及化学改性等改性方法对玉米进行改性,并用挤压技术制备玉米重组米。玉米原料的改性使营养物质有损失但能显著改善产品的加工特性。李慧等^[31]以玉米、大米、燕麦及小麦为主要原料,对玉米粉进行化学改性,通过试验优化工艺参数,制得的玉米重组米在外观、风味及口感上均呈现

较高的品质。

2 杂粮重组米的功能特性

部分杂粮重组米的活性成分及功能特性见表 1。杂粮中除了含有膳食纤维、蛋白质、矿物质等较高的营养成分外,还含有大米中没有的活性成分,如糙米中的谷维素、谷胱甘肽、 γ -氨基丁酸;大麦中的 β -葡聚糖及酚类物质;紫薯中的花色苷及莲子中的莲子多酚、多糖等。这些活性成分赋予杂粮重组米一定的功能性,包括降血糖、抗氧化、降血脂、改善肠道菌群、抗肥胖及补充矿物质等。

表 1 杂粮重组米的活性成分及功能特性

Table 1 Active ingredients and functional properties of multigrain recombinant rice

杂粮重组米	活性成分	功能特性	参考文献
大麦重组米	β -葡聚糖、酚类物质	调血脂、降血糖	[27]
糙米重组米	膳食纤维、谷维素、谷胱甘肽等	降低血糖的释放速度和浓度及肥胖三高和糖尿病的发病率	[32]
玉米重组米	多不饱和脂肪酸、膳食纤维、花青苷等	减少心血管、糖尿病等慢性疾病的患病风险	[33—34]
马铃薯重组米	胶体蛋白、维生素 C、膳食纤维等	预防高血压、高血脂;血糖生成指数适中,防治糖尿病	[35]
莲子重组米	莲子糖蛋白、多酚、多糖等	抗氧化、清除自由基、抗衰老;降血糖、降血脂;改善肠道菌群	[36]
葛根重组米	黄酮类、三萜类、生物碱类等多种化合物、葛根素	抗衰老、抗氧化、降血压、降血脂和增强免疫力	[37]
紫薯重组米	花青素、花色苷	DPPH 自由基、ABTS 自由基清除率分别为 86.71%, 87.55%, 抗氧化功能	[38]
芋艿头重组米	特殊蛋白、含碱性物质、黏液蛋白	帮助消化,起到补中益气作用;转化成人需要的免疫球蛋白,增强人体的抵抗能力	[39—40]

2.1 降血糖

根据血糖生成指数的不同,可将食物分为高 GI 食物($GI>70$)、中 GI 食物($55<GI\leq 70$)和低 GI 食物($GI\leq 55$),且抗性淀粉(RS)含量越高,越不易被小肠消化吸收,餐后血糖的峰值越低,GI 越低^[41]。彭文斌^[32]以大米、糙米、玉米、小米和荞麦作为原料,制成的杂粮重组米比普通大米具有更为均衡、丰富的营养成分,可有效减缓或降低消化过程中血糖的释放速度和浓度,降低肥胖三高和糖尿病的发病率,从而促进身体健康。代娇等^[33]以玉米粉、青稞、藜麦、鹰嘴豆、红芸豆为原料,以 GI 值和感官评分为指标,制备出 $GI<55$ 的低 GI 杂粮重组米。该产品可减少心血管、糖尿病等慢性疾病的患病风险。刘成梅等^[34]研究表明,高直链玉米淀粉可以形成难以消化的 v 型淀粉结晶,可明显降低高直链玉米淀粉重组米的水解速率和蒸煮后的 GI 值。Chauhan 等^[42]研究发现,添加高粱会极大提高杂粮重组米的营养品质,且血糖指数由 55.2 下降到 52.0。Kishore 等^[43]研究发现,珍珠米、高粱及熟米挤压而成的小米类似米能够降低血糖水平,代替普通大米作为糖尿病患者的主食。当藜麦添加量 $>40\%$,青稞添加量为 50% 时,藜麦、青稞重组米的 GI 值低于 55,属于低

GI 食品,可有效降低糖尿病人的餐后血糖,且对血糖的调节有积极作用。因此,控制好杂粮添加量,对杂粮重组米的品质、缓解血糖升高有一定帮助^[44]。大麦尤其是大麦麸皮中富含 β -葡聚糖、酚类物质等活性成分,具有调血脂、降血糖等多种生理活性功能^[27]。推文轩^[27]通过分析大麦重组米的体外淀粉消化水解曲线,发现大麦重组米的血糖生成指数显著降低,GI 值为 55~70,属于中 GI 食品。

庄新栋等^[45]以魔芋葡甘聚糖和谷物为原料,通过挤压技术获得魔芋重组米,并建立了 2 型糖尿病大鼠模型。结果显示,魔芋重组米可有效提高 2 型糖尿病小鼠的糖耐量,改善胰岛素抵抗,说明魔芋重组米具有降血糖功效。Kang 等^[46]以小麦粉、发芽荞麦粉、黑米粉及紫薯粉为原料制备杂粮重组米,与市售大米相比含有更高水平的黄酮、多酚,且 GI 值为 68.86,是可以缓解血糖水平升高的中等 GI 杂粮重组米。孙远明等^[47]将大米、魔芋粉、燕麦和鹰嘴豆进行复配,经过特定的挤压造粒工序得到一种低血糖生成指数的重组米。经体外淀粉消化试验及体内血糖应答试验验证,该魔芋重组米可明显延缓淀粉水解、血糖升高,血糖生成指数低至 46.25,适合 2 型糖尿病人长期食

用。Wang等^[35]以大米粉和马铃薯全粉为主料,加入有降血糖功能的燕麦麸来制备杂粮重组米。当燕麦麸添加量>50%时,杂粮重组米的GI<55,可能原因是燕麦麸皮中的水溶性膳食纤维主要为 β -葡聚糖,因此具有显著的调节血糖和降低血脂的功能。李卢等^[48]研究发现,在挤压米中加入15%的南瓜粉时,体外消化试验血糖生成指数最低。

2.2 调节肠道微生物菌群

抗性淀粉(RS)具有改善肠道菌群,促进肠道有益微生物繁殖,减弱炎症等优质生理功能,进而具有改善宿主糖脂代谢、肠道屏障、免疫应答等作用^[36]。莲子、马铃薯、亚麻籽、燕麦麸皮等中均含有较高含量的RS。高帅^[49]通过不同饮食干预下大鼠肠道菌群的变化情况,发现莲子重组米对肠道菌群的紊乱有积极的调节作用。袁梓程等^[50]通过体外消化模拟发现亚麻籽重组米具有抗消化特性,可以降低消化率。邓慧清等^[51]指出燕麦麸皮、鹰嘴豆粉、荞麦粉、藜麦粉、青稞粉均能提高复合杂粮重组米的RS含量,降低快速消化淀粉(RDS)含量和淀粉消化水解率,其中添加量为20%的燕麦麸皮和鹰嘴豆可显著提高重组米的RS含量。Chauhan等^[42]发现,添加小米、玉米及高粱的杂粮重组米的RS含量增加至0.6 g/100 g。Wu等^[37]研究得出,燕麦添加量为44%的杂粮重组米的RS含量达6.06%。

2.3 抗氧化

施建斌等^[38]采用干燥、粉碎制得的葛根全粉能够极大地限度地保留其功能活性成分和营养成分,且20%葛根全粉可显著增加葛根重组米中黄酮、多酚含量,说明葛根重组米可能具有抗氧化功能。王洁洁等^[52]将挤压空白米、市售粳米和挤压重组紫薯米进行体外抗氧化试验,对比发现挤压重组紫薯米的DPPH自由基清除率和ABTS自由基清除率均较前两者显著升高,其主要原因是紫薯中富含抗氧化活性物质花色苷。戚家慧等^[53]利用碎米和马齿苋制备具有抗氧化特性的马齿苋复配米,并研究得出其对DPPH自由基和ABTS自由基的清除率分别为92.37%,85.15%。Kim等^[54]研究了补充黑豆的杂粮重组米对高脂饮食诱导的肥胖小鼠的抗氧化能力的影响。结果表明,黑豆重组米的总抗氧化能力、超氧化物歧化酶活性均显著增加。张琪^[55]在马铃薯重组米中加入一定量的肉苁蓉,而肉苁蓉中的松果菊苷可赋予该杂粮重组米抗氧化活性,且每100 g杂粮重组米中含有93.45 mg的抗氧化活性成分。王奔等^[56-57]发现,豌豆中含有的丰富营养素(如维生素B₁₂、叶酸等)能够减轻体内组织氧化损伤过程,提高机体应激能力。

2.4 降血脂、降胆固醇

Zhang等^[58]采用莲子重组米、普通大米制作的高脂饲

料对大鼠进行膳食干预后发现,普通大米会导致大鼠体内脂代谢紊乱和脂质代谢物质堆积增加;而莲子重组米能更大程度地改善脂质代谢紊乱和脂质物质积累,证实了莲子重组米对脂质代谢紊乱和机体损伤具有较好的调节作用。刘海英^[59]将高粱、燕麦、黑米、荞麦、大麦和大米制成可降低胆固醇的杂粮重组米,降低了肝脏总胆固醇(TC)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C),升高了高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量,说明此产品可修复轻微肝损伤,利于肝脏健康。彭春晓^[60]通过大量试验得出,喂食含玉米抗性淀粉、小米和藜麦的杂粮重组米后,可对高脂饮食干扰造成脂代谢紊乱的小鼠起到防护作用,修复受损组织,通过调节脂肪酸和胆固醇两种途径共同调节脂代谢。 γ -氨基丁酸对高血压、高血脂等慢性病有积极作用^[61]。韩基明等^[62]利用萌动时期的黄豆和绿豆杂 γ -氨基丁酸丰富的特点,研制出富含 γ -氨基丁酸的杂粮重组米。Rubio等^[63]将两种以大米和豌豆或芸豆为基础的新型杂粮重组米以25%的添加量加入大鼠的正常热量或致肥饮食中,评估该杂粮重组米对血脂的影响。结果表明,在饮食中加入杂粮重组米可降低TC、甘油三酯和LDL-C值,对脂代谢有益。Kim等^[54]研究表明,黑豆重组米可以降低肥胖小鼠的总胆固醇水平,表明其具有控制血脂异常和降低动脉粥样硬化性心血管疾病风险的潜力。

2.5 抗肥胖

杂粮中的一些多糖活性物质有助于人体减脂和控制体重。罗凯云^[64]制备了由玉米淀粉、燕麦 β -葡聚糖等组成的膳食纤维拟谷物结构体,并研究其对高脂饮食肥胖小鼠的干预作用。结果表明,燕麦中的燕麦 β -葡聚糖占比达85%以上,燕麦 β -葡聚糖可以减少肥胖小鼠饮食摄入量,增加饱腹感,达到抗肥胖的作用,且在膳食纤维拟谷物结构体的饮食干预下,肥胖小鼠体重比高脂饮食干预的降低42%。张华等^[65]发明了由大米粉、小米粉、藜麦粉、小麦胚芽粉、菊粉及黑木耳多糖等多组分组成的杂粮重组米,不仅营养全面,还具有多种活性成分且相互协同,促进肠胃蠕动,维护肠道健康,从而达到低脂减肥的功效。

2.6 补充矿物质

杂粮重组米富含矿物质,可以促进机体健康。Ma等^[39]发现,紫米或黑米重组米中富含铁、钙、锌和镁等矿物质元素,可以为人体补充部分矿物质。硒元素是人体必不可少的微量元素,虽然人体需求量较少,但其对人体健康非常重要,缺乏硒可导致克山病、营养不良及大骨病等疾病,且硒元素在天然食物中含量低,需要从加工食品中获取。王霞等^[40, 66]的研究提及了富硒食品,如富硒芋艿头重组米(由粳米碎米和芋艿头全粉为主要原料,加入硒营养强化剂及复合质构调节剂制备而成)可满足人们

对硒的摄入。董状^[67]制备了富硒发芽糙米,与普通糙米制备成富硒发芽糙米重组米相比,其不仅富含有机硒元素,满足人体需求,还具有良好的口感。

3 结论与展望

目前,杂粮重组米的种类越来越多,有玉米、马铃薯、紫薯、复合杂粮重组米等,通过对杂粮配方的不断优化,杂粮重组米品质得到一定改善,且生产了具有不同功能特性的杂粮重组米,其中降血糖方面的杂粮重组米较为突出。然而,对于原辅料的选择,大多是为了解决大米营养不均衡的问题,对其功效研究较少,且杂粮添加量或种类过多会造成口感不适,而加入改良剂可改善杂粮重组米的品质。在加工工艺上,由于单螺杆挤压操作困难,挤出不稳定,逐步向双螺杆挤压技术过渡;进行原料预处理不仅可改善品质,还能提高功效成分。在杂粮重组米功能特性上,尤其对降低血糖方面的研究较为深入,且市面上出现较多有关低血糖生成指数的产品。综上,虽然杂粮重组米在加工方面取得突破性进展,但在其应用方面还存在一些问题,如杂粮重组米的加工工艺复杂,成本高,口感及外观上与大米还有差距等需进一步研究。在其他功能特性方面还需进一步研究,且对功能特性的研究大多基于体外模拟试验,有待向动物体内试验进一步探索研究。

参考文献

- [1] 朱益清,倪萍,赵卿宇,等. 预糊化处理对杂粮米饭食用品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 114-124.
ZHU Y Q, NI P, ZHAO Q Y, et al. Effect of pre-gelatinization treatment on the eating quality of multigrain rice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(12): 114-124.
- [2] 朱文静. 四季杂粮米饭伴侣开发及其品质研究[D]. 成都: 成都大学, 2023: 8.
ZHU W J. Study on the development and quality of four seasons multigrain rice companion[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023: 8.
- [3] 罗佳倩. 发芽联合热处理对苦荞功效特性的影响及其重组米的研制[D]. 长沙: 湖南大学, 2023: 8-18.
LUO J Q. Effect of sprouting combined with heat treatment on efficacy characteristics of Tartary buckwheat and preparation of artificial rice[D]. Changsha: Hunan University, 2023: 8-18.
- [4] 喻勤. 挤压重组米的配方工艺及其理化特性和血糖生成指数研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 2.
YU Q. Research on formulation, process of extruded reconstituted rice and its physical, glycemic index characteristics [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 2.
- [5] 朱冰清,李琳,朱晓炜,等. 杂粮食品加工现状及市场前景[J]. 衡水学院学报, 2024, 26(1): 17-21.
ZHU B Q, LI L, ZHU X W, et al. Processing status and market prospects of miscellaneous grain foods[J]. Journal of Hengshui University, 2024, 26(1): 17-21.
- [6] 孟如君,刘静,沈汪洋,等. 挤压膨化技术在杂粮加工业的应用研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 189-193.
MENG R J, LIU J, SHEN W Y, et al. Research on the application of extrusion technology in the processing of multigrain[J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 189-193.
- [7] 李兆钊,吴卫国,廖卢艳,等. 挤压杂粮重组米糊化特性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 54-58.
LI Z Z, WU W G, LIAO L Y, et al. Studies on gelatinization properties of extruded rice with coarse grains[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 54-58.
- [8] 沈宇光,肖志刚,柴媛,等. 工程重组米的研究进展[J]. 农产品加工, 2019(2): 63-65, 70.
SHEN Y G, XIAO Z G, CHAI Y, et al. Research advance of restructuring rice[J]. Farm Products Processing, 2019(2): 63-65, 70.
- [9] 邓力,何腊平,李秋萍,等. 双螺杆挤压复合杂粮米的工艺优化[J]. 农产品加工(学刊), 2013(22): 35-39, 42.
DENG L, HE L P, LI Q P, et al. Optimization of twin-screw extrusion process of composite grains-rice[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2013(22): 35-39, 42.
- [10] 李兆钊. 挤压杂粮重组米体外消化特性及食用品质研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020: 13, 47.
LI Z Z. Study on the in vitro digestion characteristics and edible quality of extruded coars grain recombined rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020: 13, 47.
- [11] 熊善波. 挤压工程重组米生产工艺及品质改良研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011: 22-23.
XIONG S B. improvement of artificial rice's produce technology and sensory quality[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2011: 22-23.
- [12] 宋燕燕,张克,赵丹,等. 薯类淀粉挤压制备重组米的加工特性研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 1-7.
SONG Y Y, ZHANG K, ZHAO D, et al. Study on processing characteristics of rice analogs prepared by extrusion of tuber starch[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(6): 1-7.
- [13] 雷婉莹,曾希珂,章丽琳,等. 马铃薯全粉—碎米混合粉的糊化特性及其挤压重组米品质[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 94-98, 111.
LEI W Y, ZENG X K, ZHANG L L, et al. Pasting properties of rice powders blending with potato granule and the quality of restructured potato rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(17): 94-98, 111.
- [14] 曾希珂,章丽琳,张喻. 马铃薯挤压重组米品质改良剂配方优化[J]. 激光生物学报, 2018, 27(1): 75-80.

- ZENG X K, ZHANG L L, ZHANG Y. Optimization for quality improver of restructured potato rice[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2018, 27(1): 75-80.
- [15] 章丽琳. 马铃薯挤压重组米制备及其品质研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017: 29.
- ZHANG L L. Preparation and properties study of potato rice by extrusion cooking technology[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017: 29.
- [16] 孙威, 陈轩. 葛根重组米的蒸煮特性和黄酮提取研究[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(7): 57-62.
- SUN W, CHEN X. Study on cooking characteristics and flavonoids extraction of Radix Puerariae reconstituted rice[J]. *Cereals & Oils*, 2022, 35(7): 57-62.
- [17] 陈怡岑, 何欢, 杨华, 等. 粮谷重组米质构特性及其米粉品质特性的研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(12): 199-204.
- CHEN Y C, HE H, YANG H, et al. Study on the texture characteristics of grain remaking rice and the quality characteristics of rice flour[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(12): 199-204.
- [18] KURNIAWATI E, PUTRI R P, WAHYONO A. Formulation of instant multigrain rice enriched with high levels of dietary fiber and protein[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1 338(1): 012049.
- [19] 殷明, 姜勇, 王艳丽, 等. 新型杂粮人造米的研制[J]. *宁夏农林科技*, 2013, 54(1): 114-117.
- YIN M, JIANG Y, WANG Y L, et al. Study on the synthetic rice with minor cereals[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2013, 54(1): 114-117.
- [20] 李欣洋, 汤晓智, 杨春华, 等. 挤压工艺对碎米重组米品质特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(1): 19-24.
- LI X Y, TANG X Z, YANG C H, et al. Effect of extrusion process on quality characteristics of broken rice-based reconstituted rice[J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(1): 19-24.
- [21] 韩风, 朱潇, 龚魁杰, 等. 挤压工艺制备藜麦绿豆重组米[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(11): 34-38.
- HAN F, ZHU X, GONG K J, et al. Preparation of quinoa and mung bean recombinant rice by extrusion technology[J]. *Cereals & Oils*, 2023, 36(11): 34-38.
- [22] 何忠源, 马天文, 王庆峰, 等. 双螺杆挤压工艺对杂粮重组米感官品质影响研究[J]. *农业科技与装备*, 2017(9): 63-68.
- HE Z Y, MA T W, WANG Q F, et al. Study on the effect of twin-screw extrusion process on the sensory quality of extruded composite grain rice[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2017(9): 63-68.
- [23] 谢天, 孙洪蕊, 康立宁, 等. 双螺杆挤压对玉米重组米理化特性及品质特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 183-189.
- XIE T, SUN H G, KANG L N, et al. Effect of twin-screw extrusion on physicochemical properties and quality characteristics of corn flour[J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 183-189.
- [24] 张克, 朱子博, 毕荃, 等. 二次挤压制备重组米的响应面优化及品质研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(16): 133-139.
- ZHANG K, ZHU Z B, BI Q, et al. Response surface optimization and quality research during the preparation of recombinant rice by two times of extrusion shaped[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(16): 133-139.
- [25] LIU R H, GENG Z H, LI T, et al. Effects of different extrusion temperatures on the physicochemical properties, edible quality and digestive attributes of multigrain reconstituted rice[J]. *Food & Function*, 2024, 15(11): 6 000-6 014.
- [26] 张群. 营养复合米加工技术研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2020, 39(5): 112.
- ZHANG Q. Research on nutrition composite rice processing technology[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2020, 39(5): 112.
- [27] 推文轩. 大麦重组米制备技术及品质功能特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023: 8, 47, 69.
- TUI W X. Study on the preparation technology and quality functional characteristics of barley reconstituted rice[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023: 8, 47, 69.
- [28] 张依睿. 马铃薯淀粉的微波糊化及其在挤压重组米中的应用基础研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2021: 34-41.
- ZHANG Y R. Microwave-annealing of potato starch and its application in extruded rice[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2021: 34-41.
- [29] 张克, 王世光, 宋燕燕, 等. 直接挤压改性对重组米结构及营养特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(11): 72-78.
- ZHANG K, WANG S G, SONG Y Y, et al. Effect of direct extrusion modification on the structure and nutritional properties of rice analogues[J]. *Food Science*, 2023, 44(11): 72-78.
- [30] 谢天. 不同改性方法对挤压重组米原料品质影响及加工工艺参数的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019: 17, 50.
- XIE T. Study on the influence of different modification methods on the quality of extruded rice raw materials and processing parameters[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019: 17, 50.
- [31] 李慧, 谢天, 刘静雪, 等. 玉米重组米的加工工艺研究[J]. *粮食加工*, 2023, 48(6): 22-26.
- LI H, XIE T, LIU J X, et al. Study on the processing technology of corn reconstituted rice[J]. *Grain Processing*, 2023, 48(6): 22-26.
- [32] 彭文斌. 一种复合米及其制备方法: CN101589777[P]. 2009-12-02.
- PENG W B. A composite rice and its preparation method: CN101589777[P]. 2009-12-02.
- [33] 代娇, 李凤林, 谢天, 等. 低GI高膳食纤维重组米加工工艺研究[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(6): 30-35.
- DAI J, LI F G, XIE T, et al. Study on processing technology of low GI and high dietary fiber restructured rice[J]. *Cereals &*

- Oils, 2022, 35(6): 30-35.
- [34] 刘成梅, 方冲, 刘云飞, 等. 不同添加物对挤压重组米血糖生成指数和理化性质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(3): 96-102.
- LIU C M, FANG C, LIU Y F, et al. Effects of different additives on glycemic index and physicochemical properties of extruded Rice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(3): 96-102.
- [35] WANG X, ZHOU X Q, HU H H, et al. Effect of different additives on visual appearance, microstructure, cooking and eating quality and in vitro glycemic index of extruded artificial rice[J]. Food Science, 2018, 39(11): 60-68.
- [36] 王绪昆, 郑慧心, 宋冰梅, 等. 重组米品质特性及其功能性产品的研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(17): 96-104.
- WANG X K, ZHENG H X, SONG B M, et al. Progress of quality characteristics of reformed rice and its functional products[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(17): 96-104.
- [37] WU J L, ZHU K, ZHANG S J, et al. Impact of oat supplementation on the structure, digestibility, and sensory properties of extruded instant rice[J]. Foods, 2024, 13(2): 217.
- [38] 施建斌, 隋勇, 熊添, 等. 葛根全粉添加对重组米蒸煮特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(20): 53-60.
- SHI J B, SUI Y, XIONG T, et al. Effect of pueraria lobata powder addition on cooking characteristics of recombinant rice [J]. Food Research and Development, 2024, 45(20): 53-60.
- [39] MA Y R, LI J X, XUE Y, et al. Comprehensive improvement of nutrients and volatile compounds of black/purple rice by extrusion-puffing technology[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1248501.
- [40] 王霞, 郭世龙, 鹿保鑫, 等. 富硒芋头重组米的制备及其消化特性研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(8): 142-152.
- WANG X, GUO S L, LU B X, et al. Preparation and digestive characteristics of artificial rice supplemented by selenium-rich taro[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(8): 142-152.
- [41] 齐瀚, 高嫚, 孟翔烁, 等. 低GI米制品研究进展[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(10): 8-10, 62.
- QIAO H, GAO M, MENG X S, et al. Research progress of low GI rice products[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(10): 8-10, 62.
- [42] CHAUHAN S, SONAWANE S K, ARYA S S. Nutritional evaluation of multigrain khakra[J]. Food Bioscience, 2017, 19: 80-84.
- [43] KISHORE S G, DWIVEDI M, DALBHAGAT C G, et al. Development of extruded millet analogue rice: a comparison of rheological, structural, physiochemical, and cooking properties with conventional rice[J]. ACS Food Science & Technology, 2024, 4(10): 2 504-2 516.
- [44] 张鑫, 任元元, 邱道富, 等. 不同杂粮添加量对挤压重组米饭品质及体外消化特性的影响[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(5): 36-41.
- ZHANG X, REN Y Y, QIU D F, et al. Effects of different amount of coarse cereals on quality and in vitro digestibility of extruded reconstituted rice[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2021, 57(5): 36-41.
- [45] 庄新栋, 钟静, 邓婕, 等. 魔芋重组米对2型糖尿病大鼠糖脂代谢的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(23): 1-6.
- ZHUANG X D, ZHONG J, DENG J, et al. Effect of konjac rice on glycolipid metabolism in type 2 diabetic rats[J]. Food Research and Development, 2020, 41(23): 1-6.
- [46] KANG L T, LUO J Q, SU Z P, et al. Effect of sprouted buckwheat on glycemic index and quality of reconstituted rice [J]. Foods, 2024, 13(8): 1148.
- [47] 孙远明, 王达, 李美英, 等. 一种低血糖生成指数魔芋重组米及其制备方法: CN202011056019.X[P]. 2020-12-25.
- SUN Y M, WANG D, LI M Y, et al. A low glycemic index of konjac recombinant rice and its preparation method: CN202011056019.X[P]. 2020-12-25.
- [48] 李卢, 刘震远, 李喜宏, 等. 南瓜粉对挤压米膳食血糖指数及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(11): 39-45.
- LI L, LIU Z Y, LI X H, et al. Contribution of pumpkin powder addition on dietary glycemic index and quality of fresh extruded rice[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(11): 39-45.
- [49] 高帅. 碎米重组米研制及其对肠道菌群影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021: 33-52.
- GAO S. Study on preparation of reformed broken rice and its effect on intestinal flora[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2021: 33-52.
- [50] 袁梓程, 肖洪, 屠辛, 等. 亚麻籽重组米特性研究[J]. 食品科技, 2022, 47(8): 146-151.
- YUAN Z C, XIAO H, TU X, et al. Research on the characteristics of flaxseed reconstituted rice[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(8): 146-151.
- [51] 邓慧清, 吴卫国, 廖卢艳, 等. 挤压杂粮重组米体外消化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(6): 10-17.
- DENG H Q, WU W G, LIAO L Y, et al. External digestibility of combined rice extruded coarse grains[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(6): 10-17.
- [52] 王洁洁, 邵子晗, 韩晶, 等. 挤压重组紫薯米工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 137-142, 150.
- WANG J J, SHAO Z H, HAN J, et al. Optimization of process parameters and antioxidant activity of extrusion recombinant purple sweet potato rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 137-142, 150.
- [53] 戚家慧, 陈善峰, 闫玉红, 等. 马齿苋复配米工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 184-190.
- QI J H, CHEN S F, YAN Y H, et al. Optimization of process parameters and antioxidant activity of purslane compound rice [J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 184-190.
- [54] KIM H, KANG S M, GO G W. Black beans (*Glycine max* (L.)

- Merrill) included in a multi-grain rice reduce total cholesterol and enhance antioxidant capacity in high-fat diet-induced obese mice[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2024, 33(12): 2 857-2 864.
- [55] 张琪. 肉苁蓉—马铃薯复配米挤压工艺的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019: 50.
- QI Z. Study on Extrusion technology of cistanche deserticola-potato composite rice[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019: 50.
- [56] 王奔. 基于镉超标大米与豌豆全粉的再造米的加工工艺及其功能的初步研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018: 9, 53.
- WANG B. Study on processing technology and function of remanufactured rice based on cadmium-excess rice and whole pisum sativum powder[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2018: 9, 53.
- [57] ARRIBAS C, CABELLOS B, CUADRADO C, et al. The effect of extrusion on the bioactive compounds and antioxidant capacity of novel gluten-free expanded products based on carob fruit, pea and rice blends[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 52: 100-107.
- [58] ZHANG Y L, DOU B X, WANG Y, et al. Study on the effect of crushed rice-lotus seed starch reconstituted rice on lipid metabolism histology in rats[J]. *Journal of Food Quality*, 2022, 2 022(1): 9105936.
- [59] 刘海英. 一种降低胆固醇的重组米及其制备方法: CN202110636755.0[P]. 2023-08-22.
- LIU H Y. A recombinant rice for lowering cholesterol and its preparation method: CN202110636755.0[P]. 2023-08-22.
- [60] 彭春晓. 强化抗性淀粉重组米特性分析及对脂代谢的调控作用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022: 75-76.
- PENG C X. Characterization of extruded rice with enhanced resistant starch and modulation of lipid metabolism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022: 75-76.
- [61] 王清莲, 张云亮, 高帅, 等. 重组米产品研究及展望[J]. *农产品加工*, 2021(4): 78-82.
- WANG Q L, ZHANG Y L, GAO S, et al. Research and prospect of recombinant rice[J]. *Farm Products Processing*, 2021(4): 78-82.
- [62] 韩基明, 田志芳, 卢健鸣, 等. 富含 γ -氨基丁酸杂粮营养强化米的研制[J]. *农产品加工(学刊)*, 2012(10): 49-50, 67.
- HAN J M, TIAN Z F, LU J M, et al. Grains nutrition fortified rice in gamma-amino-butyric[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2012(10): 49-50, 67.
- [63] RUBIO L A, ARANDA-OLMEDO I, CONTRERAS S, et al. Inclusion of limited amounts of extruded legumes plus cereal mixes in normocaloric or obesogenic diets for rats: effects on intestinal microbiota composition[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(15): 5 546-5 557.
- [64] 罗凯云. 膳食纤维—淀粉拟谷粒结构体的构建及其对肥胖抑制和血糖平衡作用机制的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 31-39.
- LUO K Y. Anti-obesity and glucose homeostasis regulation by dietary fiber and starch in a whole-grain like structural form [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 31-39.
- [65] 张华, 彭春晓, 王振宇, 等. 一种减肥降脂的多组分即食功能重组米及其制备方法: CN202111038358.X[P]. 2021-11-30.
- ZHANG H, PENG C X, WANG Z Y, et al. A multicomponent ready-to-eat functional recombinant rice for weight loss and fat reduction and its preparation method: CN202111038358.X[P]. 2021-11-30.
- [66] 郭世龙, 肖志刚, 陈革, 等. 芋艿头全粉对富硒芋艿头营养重组米结构及特性的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(1): 232-239.
- GUO S L, XIAO Z G, CHEN G, et al. Effects of whole taro flour on structure and characteristics of selenium-rich taro nutrition recombined rice[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(1): 232-239.
- [67] 董状. 富硒发芽糙米及其挤压米工艺优化[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021: 9.
- DONG Z. Optimization of selenium-enriched germinated brown rice and its extruded rice[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021: 9.