

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.60175

营养米制品加工新技术研究进展及产业现状

丁 俭¹ 李玉鹏¹ 钱明继¹ 金征宇² 林亲录³
崔 波⁴ 赖夏荣⁵ 韦锦福⁶ 方 勇¹

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 3. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410004; 4. 齐鲁工业大学食品科学与工程学院, 山东 济南 250353; 5. 南京乐鹰科技股份有限公司, 江苏 南京 211100; 6. 柳州市乐哈哈食品科技有限公司, 广西 柳州 545007)

摘要:随着全民健康意识的提升,消费者对健康食品需求不断增长,营养米制品也受到越来越多的关注,开发新型营养米制品对丰富米制主食品类、改善糖代谢、降低慢性疾病发生和引领健康饮食具有重要意义。文章总结了提升营养米制品营养功能的物理、生物等新型加工技术的研究进展,综述了营养米制品产业发展现状,根据市场需求展望了营养米制品产业未来发展方向。

关键词:营养米制品;加工新技术;研究进展;产业现状;营养功能

Research progress and industry status of novel processing technology of nutritious rice products

DING Jian¹ LI Yupeng¹ QIAN Mingji¹ JIN Zhengyu² LIN Qinlu³
CUI Bo⁴ LAI Xiarong⁵ WAI Jinfu⁶ FANG Yong¹

(1. School of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 4. School of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology, Jinan, Shandong 250353, China; 5. Nanjing Leying Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211100, China; 6. Liuzhou Lehaha Food Technology Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545007, China)

Abstract:With the enhanced national health awareness, there is an increasing consumers' demand for healthy food, and more attentions are drawn to nutritious rice products. Therefore, the development of novel nutritious rice products is of great significance for diversifying the nutritional staple rice foods, improving glucose metabolism, avoiding chronic diseases, and promoting a healthier diet. The latest physical and biological processing technologies in improving the nutritional function of rice products are reviewed. The current status of the nutritious rice products industry is summarized and prospect is outlined for industrial development based on market demands.

Keywords: nutritious rice products; novel technologies; research progress; industry status; nutritional function

大米是全球最重要的粮食作物之一,全球人口中以大米为主食的超过 35 亿人,大米也是中国最稳定且最大的主食消费品。目前,随着中国主食消费需求结构的转型升级,大米消费向多元营养、便捷、健康发展已成必然趋势^[1]。此外,随着《健康中国行动》《国民营养计划》战略

的推进、国民慢性疾病问题的凸显和健康意识的增强,人们对营养健康食品寄托了更多期待,尤其对日常主食大米品质、营养、健康和食用功效体验更加关注。

中国大米精深加工行业自 2004 年以后快速发展,市场形成多元化经营竞争格局,行业逐步向规模化、品牌

基金项目:江苏省农业科技自主创新项目(编号:CX(23)3053);江苏省重点研发计划项目(编号:BE2023357);江苏现代农业产业技术体系建设项目(编号:JATS[2023]476);江苏省研究生创新项目(编号:KYCX24_1938)

通信作者:方勇(1982—),男,南京财经大学教授,博士。E-mail:fangyong10@nufe.edu.cn

收稿日期:2024-08-22 **改回日期:**2024-12-03

化、产业化方向发展,主要涉及的加工制品以米粉类、米糕类、粽类、汤团类、酒、醋类、方便米饭、方便粥、婴儿食品等为主,但产品同质化现象严重,深加工产业链不完整。随着国家政策导向,今后几年或十几年国内稻米加工业将面临重新“洗牌”,逐渐形成新的竞争格局,其中营养米制品加工将在大健康风口下迎来新机遇^[2]。营养米制品是指在传统稻米加工的基础上,通过加工或营养强化等方式开发出具有特定功能或改善健康效应的产品^[3]。2008年,中科院、上海市农科院、浙江省农科院等推出降血糖功能性稻米,营养功能米从此进入大众视野,以蒸谷米、富硒米、胚芽米、低GI米为代表的营养米制产品,在增强免疫力、轻调慢控、改善机体整体健康方面展现了显著的功能优势,成为健康主食的重要选择^[4-6]。营养米制品是大米精深加工行业的研究热点,也将成为食品行业高潜力赛道。中国营养米制产品目前有200多种,而日本营养米制新产品多达500种,因此中国营养米制品产业仍有较大发展空间。文章拟通过对营养米制品加工新技术进展与产业现状的梳理,旨在为营养米制品技术创新、产业高质量发展提供依据。

1 营养米制品加工新技术研究进展

目前,中国居民食品消费正由“食好”阶段向“营养”阶段晋升,米制品消费更趋于细分品类多样化、功能营养精准化和便捷化。根据原料特性及加工方式的不同,营养米制品可分为全谷物类、发芽类、挤压重组类和米糠等副产物高值化利用类。根据适宜人群和应用场景不同,营养米制品可分为低糖米、低蛋白米、高锌米、高镉米、生态米、寿司米等。营养米制品的加工需要新技术支撑,如基因工程技术、非热物理加工超微粉碎技术、挤压重组、生物酶解、生物发酵技术等,新技术的应用可最大限度保留或强化大米营养成分,同时改善产品口感和功能。

1.1 基因工程技术

营养功能米获取的第1种途径是从品种源头筛选功能型稻米,如适合肾功能障碍人群和糖尿病人群食用的低谷蛋白稻米,其蛋白质质量分数不超过4%,可有效减轻慢性肾脏病患者的肾脏负担。周田田等^[7]基于CRISPR/Cas9系统的基因编辑技术,以LGC-1作为供体亲本培育出粳稻品种为转基因受体,敲除全部3个A亚家族谷蛋白编码基因,使谷蛋白含量降至1.8%。

第2种是高抗性淀粉稻米,可有效预防和控制糖尿病并对血脂异常、肥胖症和肠道疾病起积极预防作用。普通稻米抗性淀粉含量不足1%,远低于健康饮食标准建议的10%。中国科学院李家洋团队对支链淀粉合成途径的14个基因分别进行系统性基因编辑,筛选出四突变体 $sbeI\ sbeIIb\ ssIIIa\ ssIIIb$ 和 $sbeI\ ssIVb\ ssIIIa\ ssIIIb$ 的抗性淀粉含量达到18%和20%,为培育兼顾产量与营养健康品

质的高抗性淀粉水稻品种提供了实用策略^[8]。白建江等^[9]研究表明,高抗性淀粉水稻新品系“降糖稻1号”对2型糖尿病CK大鼠血糖和血脂有显著的调控作用。

第3种是高花青素稻米,黑米、紫米和红米富含花青素或原花青,其中矢车菊素-3-葡萄糖苷及生物活性物质具有显著诱导癌细胞凋亡、预防改善心血管疾病,起到延缓衰老、养肝补血等食疗保健功效。Zhu等^[10]利用基因工程技术将高效多基因转化叠加载体系统,生物合成花青素,创造出富含花青素的水稻新品种“紫晶米”。

第4种是富含微量元素稻米,富铁稻米可以预防贫血症,富硒具有保护心血管、预防肿瘤的功效,富锌具有提高免疫力作用。郭孔雁等^[11]利用云南紫糯和(75069×香糯7-2)复合杂交选育香血糯新品种,其微量元素铁为普通糯米的3倍,锌元素含量也高于普通糯米。Gao等^[12]由T-DNA插入导致水稻幼苗细胞分裂素脱氢酶OsCKX4激活形成突变体,通过调控细胞分裂素代谢使该幼苗表现出冠根数目变多和根长变长,进而培育出富锌水稻。

第5种是高 γ -氨基丁酸(GABA)稻米,GABA可补充人体抑制性神经递质、健脑益智、促进睡眠,GABA米具有较好的抗氧化能力,能够阻止多种癌变细胞的生长,延缓脑衰老等功能。中国作物营养项目团队中国水稻研究所成功选育富含GABA的稻品种——巨胚1号,GABA含量显著高于常规糙米。刘玲珑等^[13]通过武运7号与富含GABA水稻品种Haiminori杂交,选育出巨胚水稻,经留胚米浸泡发芽后激活谷氨酸脱羧酶,促进GABA合成(含量高达586 mg/100 g)。

1.2 非热物理加工技术

非热物理加工技术的核心在于不使用任何化学物质或改变原料成分,通过物理方法提升营养米制品口感、营养和加工特性^[14]。主要包括低温适度碾磨、AI智能精准分离技术、超微粉碎和超高压处理等。

(1) 低温适度碾磨可以保留大米部分皮层、糊粉层和完整胚芽,防止微量营养元素、蛋白质、脂肪、矿物质和维生素等营养成分的损失,同时借助适度柔性加工、双层保鲜材质+混合惰性气体或纸罐密封等适碾锁鲜技术,将大米与外界空气隔绝,避免大米氧化,可以最大程度保持大米的新鲜度和营养成分^[15]。

(2) AI智能精准分离技术解决了碾米行业难以精准加工的卡脖子技术难题,使营养米的糊粉层中功能活性成分保留90%以上,膳食纤维、谷维素和酚类物质含量分别比传统精白米提高了500%,390%,30%,出米率提高3%~5%,同时降低能耗20%以上,使产品兼顾了功能营养与口感^[16]。

(3) 超微粉碎技术是高效、绿色的食品加工技术,利用机械或流体动力的方法在低温下将糙米、米糠等纤维含量较高的成分粉碎至粒径为10 μm 甚至1 μm 以下,加

工后的物料分散性、溶解性和生物功能性更好,易被人体消化吸收,一定程度上提高了米糠酚类物质的溶出率和体外抗氧化活性^[17]。胡婷等^[18]通过超微粉碎加工黑米糠粉使黑米糠中游离酚、总酚和花色苷含量分别提高了8.27%, 10.72%, 21.97%, 增强了黑米糠的抗氧化能力和 α -葡萄糖苷酶抑制能力。

(4) 超高压技术在稻米加工中是以水或油作为传压介质,在常温或稍高于常温(25~60℃)下对稻米进行100~1 000 MPa的加压处理,维持一定时间后能有效杀灭微生物,并最大限度地保持稻米原有品质。研究^[19]表明,在200~300 MPa/15 min以及600 MPa/5 min超高压条件下,可使稻谷淀粉分子长链断裂,形成短链结构,可改良陈米口感,提高淀粉黏度,降低硬度,改善光泽和香气等。孟玲等^[20]研究发现,超高压处理不仅能够改善黑米饭的质构和适口性,还能在贮藏过程中有效保留其营养成分和风味。

(5) 电子束辐照技术是通过破坏脂肪酶的空间结构,使脂肪酶的三级结构改变、功能活性丧失。徐鹏程等^[21]利用电子束辐照延长留胚米的贮藏期限,经0.5 kGy电子束辐照处理后,留胚米的留胚率、碎米率及腰爆率变化不显著,脂肪酶相对酶活力下降了28.2%,相比于未处理留胚米(15 d)保质期延长至60 d以上。

(6) 浸吸、喷覆技术使大米表面均匀覆盖一层营养薄膜,强化大米中营养素如维生素B₁、维生素B₂、矿物质钙、铁、锌等,从而制成复合营养米。但不同的营养强化方式对大米营养素的保留率有所不同。李庆龙^[22]采用多次喷涂浸吸与涂膜生产营养强化米,营养素溶液喷涂后,在缓苏干燥时表面喷涂非水溶性玉米醇溶蛋白,喷涂量为大米质量的0.5%~1.0%,可防止维生素B₁、维生素B₂、尼克酸和叶酸的损失。

1.3 新型热加工技术

热加工技术是通过热能改变食品性质与结构,从而实现米制品风味改善、营养价值增强。在大米加工中,常用的新型热加工技术有微波干燥、红外线辐射、气流膨化和挤压膨化技术等。

(1) 微波干燥技术的原理是利用高频电磁波使分子在微波场中受到电荷“同性排斥,异性相吸”产生运动。微波干燥可使稻米脱支酶活力明显下降,但不影响稻米的食用品质和糊化特性^[23]。Shen等^[24]通过微波干燥对发芽糙米进行烘干,结果表明适宜温度和微波强度能够显著提高发芽糙米中 γ -氨基丁酸(GABA)含量和整体品质,相比传统热风干燥可缩短加热时间,提高干燥效率的同时避免了褐变和炭化现象。朱松等^[25]优化了胚芽米微波灭酶工艺,当发芽米初始水分质量分数为16%,经微波强度为2.0 kW/kg、微波时间为2.6 min时,胚芽米脂肪酶灭活率为68.12%,且微波处理后胚芽米的主要指标未受到

明显影响。

(2) 红外线辐射技术是利用红外线辐射的热能对稻米进行加热,常用于米制品加工的烘干、杀菌等过程。Natthaporn等^[26]研究了红外辐射干燥对糙米、未预煮和预煮发芽糙米品质的影响,结果表明,红外辐射干燥可显著降低半熟发芽糙米的碎米率,缩短干燥时间,同时保留较多的GABA和 α -生育酚,使米粒更加多孔,煮熟后质地更柔软。

(3) 气流膨化技术是以空气为加热介质,利用水的瞬时相变及空气压力的变化,使谷物等米制品原料内水分突然汽化、闪蒸,从而成为疏松多孔的海绵状结构,制备谷物食品气流膨化的最佳工艺参数为膨化温度280℃、膨化时间45 s、坯料水分含量12%、进料速率1 000 g/min,可有效改善产品的微观结构和风味品质特性^[27]。

(4) 挤压重组技术是物料在腔内经高温、高压、高剪切作用,物料呈现熔融状态,从模口挤出瞬间,压力突然降低、水分瞬间蒸发,使米制品熟化、半熟化,不易“回生”,便于长期贮藏^[28]。Wang等^[29]研究表明,添加紫甘薯的挤压重组大米质构特性改善,消化率显著降低。李卢等^[30]通过挤压重组技术以燕麦粉、马铃薯全粉、南瓜粉为主要原料得到具有降血糖效果的重组米,体外消化实验血糖指数GI值达到68.36,有效改善复配重组米的质构特性和感官评价。

1.4 生物加工技术

生物加工技术是运用生物手段如微生物发酵和酶促反应等来改变米制品的营养结构、风味和功能特性,从而提升其营养价值、保质期或功能性。微生物发酵是利用微生物菌种如酵母、乳酸菌或醋酸菌等对米类原料进行发酵,发酵不仅能赋予米制品独特风味,还能够显著提升其营养价值和功能性^[31]。任元元等^[32]利用植物乳杆菌、酿酒酵母菌、干酪乳杆菌协同发酵生产鲜湿米粉,其产品的蛋白质、脂肪含量下降,直链淀粉和挥发性风味物质含量显著升高,发酵米粉产品品质和风味良好。Ali等^[33]通过控制米糠发酵和添加南瓜泥协同改善产品硬度、感官特性及抗氧化能力。唐慧等^[34]研究了乳酸菌发酵大米粉制备米发糕,通过工艺条件的优化制作的米发糕感官评分较高,具有柔软细腻的口感和发酵香气。

酶法加工是通过酶的催化作用对稻米及其副产品进行改性,从而满足不同消费需求的一类加工方法。营养米制品所用酶类主要包括淀粉酶、纤维素酶、蛋白酶等^[35]。钱鑫等^[36]综述了酶法抗鲜湿米粉老化,如利用 α -淀粉酶、 β -淀粉酶、环葡聚糖水解酶和葡聚糖分支酶可以通过对淀粉的改性,显著抑制淀粉老化。王子妍等^[37]在复合酶解法基础上联合预糊化技术制备婴幼儿留胚米粉,产品具有较好的吸水性、冲调分散性和糊化特性。朱玲凤等^[38]利用白碎米、小米、发芽黑糙米和糖纳红小豆开

发了一款谷物饮品,通过优化配方和淀粉酶解工艺,筛选了最佳稳定剂组合,制得的发芽糙米红豆饮品米香浓郁,口感纯正。纤维素酶可以改善稻米及其副产品的口感、营养价值和功能性,纤维素酶将稻米副产物米糠中不可溶性膳食纤维转化为可溶性膳食纤维,降解米糠非淀粉多糖改善米糠口感粗糙、溶解性差等问题,提升了米糠消化利用率。因此,纤维素酶在全谷物类和富含膳食纤维的米制品生产中具有重要作用^[39]。Lu等^[40]研究表明,通过超声辅助纤维素酶预处理可以增强糙米的冻融稳定性,提升糙米的口感质地和营养价值。蛋白酶可以提高米制品中蛋白质的可消化性、改善质地和营养功能。Honda等^[41]研究发现,通过蛋白酶降解 α -谷蛋白生成的水解产物可提高无麸质大米淀粉面包的口感与质地。Fang等^[42-43]通过胰蛋白酶的可控酶解,使富硒蛋白的酶解物中含有高抗氧化活性和免疫活性的SeMDPGQQ和TSeMMM低相对分子质量硒肽,为开发食品源大米硒肽及其在功能食品中的应用奠定了基础。

1.5 组分互作与品质调控技术

组分互作与品质调控技术是指食品中营养成分碳水化合物、蛋白、脂质等与自身或与其他具有功能活性的生物大分子多糖、蛋白、脂质、酚类等相互作用,同时借助超声、挤压等加工技术调控食品品质的方法。王炜华等^[44]通过米糠膳食纤维调控挤压重组米的质构特性,当米糠膳食纤维添加量为4%时对重组米的硬度、胶着性和咀嚼性影响较大,对大米弹性和内聚性影响较小。研究学者们也通过添加荞麦、青稞、藜麦、鹰嘴豆、燕麦麸皮和马齿苋等杂粮为辅料制备挤压重组米,这些成分的添加经组分间相互作用显著降低了重组米的衰减值,杂粮形成的重组米回生值显著增加,改善了杂粮重组米的糊化特性和抗氧化特性^[45-46]。Guan等^[47]通过在早籼米粉中添加可溶性大豆多糖,降低了米粉的糊化黏度,抑制了淀粉颗粒的膨胀和崩解,有效改善了干米粉的蒸煮和感官品质,其中可溶性大豆多糖侧链与米淀粉间产生较强相互作用,提升了鲜湿米粉中高抗性淀粉含量,使米粉食用品质和降低血糖指数得到进一步改善。李才明等^[48]利用发酵型多糖可得然胶与米粉发生相互作用,在添加量为0.4%~0.6%时,可得然胶可显著提高米粉的硬度、弹性、咀嚼性及蒸煮质量比,降低米粉的蒸煮时间、断条率及蒸煮损失,同时对米淀粉老化过程中各种晶体的形成具有抑制作用,加固凝胶稳定性,从而优化产品品质。Ji等^[49]基于高强度超声改性的豌豆蛋白修饰大米淀粉,开发出适合吞咽困难饮食的柔软、富含蛋白质的淀粉基凝胶产品,结果证明高强度超声改性的豌豆蛋白与大米直链淀粉产生非共价缔合作用,使热凝胶中大米淀粉形成随机的无定形状态,而不是有序的结晶结构,进而影响复合凝胶的流变学特性。

2 营养米制品产业现状与前景分析

随着大众消费能力、健康管理意识的提高,对特殊膳食的需求正不断增加。目前营养米制品产业借助加工技术的创新和不断升级,产品呈现功能细分和多样化的发展现状。预计到2030年,中国营养米制品市场规模将超1000亿,功能配料创新、增材制造、大数据和AI智能等新兴技术交叉融合进一步加速并深刻影响传统米制品行业发展,催生产业形成新业态、新模式。当前,居民餐桌上传统的白米饭正被粗粮米、发芽米、富硒米、功能低GI米、低谷蛋白米等营养米所替代。因此,消费者对营养米制品的关注和认可成为营养米制品产业迅速增长的核心推动力。

2.1 营养米制品产业布局与现状

目前,中国大米市场规模超过7000亿元,大米企业数量超过10000家,但产品同质化竞争严重,品牌化运作的企业数量较少。据统计^[50],收入超过10亿元的大米企业数量仅约50家,头部品牌市场占有率不足两位数。因此,未来传统米制品行业将面临着转型升级,营养米制品将打破同质化竞争,打造差异化产品,成为稻米加工产业发展的主趋势。目前,营养米制品产业分布与水稻主产区密切相关,主要分布在长江流域和东北地区,且更多集中在沿海等经济技术发达地区如江苏、浙江、广东、上海,如江南米道江苏科技有限公司、浙江青莲食品股份有限公司、上海米特加食品科技有限公司等。当前营养米制品行业迎来了百花齐放^[51],行业品牌企业中的江南米道江苏科技有限公司、绿巨人生物技术有限公司和新锐品牌“慢教授”、嘉士利等以构建功能性稻米全产业链模式为目标,重点布局了低GI大米、低谷物蛋白大米、高膳食纤维大米、“宜糖”米、控糖米线、米饼、通心薯粉、稳糖米竹筒粉等多样化的主食类米制产品^[52],未来这些企业将继续加强基础研究持续突破技术创新,迭代大米市场格局。

2.2 营养米制品市场需求与前景展望

营养米制品除传统的低糖米、低蛋白米、富硒米、低GI功能米外,定制个性化人群营养米制品也是未来重要的发展方向,未来基于大数据和AI智能技术,实现个性化产品精准定制。继续突破不同人群营养复配、分子重构互作、食味提升、淀粉缓慢消化、精准回生调控等关键技术,定制开发儿童营养米、断乳期米制品、孕妈妈胚芽米、低GI米制品、减肥人群低碳水魔芋米和高纤米、高花青素米和不同类别米制品(炒饭类、粥米类、汤圆、米线、粽子)等专用产品,为“健康关注者”提供全面的食品解决方案。此外,在药食同源的消费趋势下,美容功能米或许是下一个蓝海。在当今社会老龄化、家庭小型化、食物多样化的背景下,针对目前中国稻米产品结构单一、产品目

标人群细分不清晰、产业链延伸不足等突出问题,重点解决营养米制品精细化和个性化的发展需求,以营养米制品为切入点,中国大米行业未来将会有更多可探索的创新点和商业机遇,推动行业格局继续变化发展。

3 结语

近年来中国营养米制品加工技术取得了显著进步,推动了行业快速发展,未来营养米制品产业面临全新的竞争需要做好“差异化”。从科研育种、先进技术迭代转化、兼具口味与营养新产品研发、生产评价标准体系完善、市场端需求匹配、个性化用户人群挖掘等方面仍需全方位理解和深度融合,最终实现营养米制品产业的蓬勃发展,加速推进中国传统米制品行业的转型升级。

参考文献

- [1] 郑红明. 2023年中国大米产业报告[N]. 粮油市场报, 2023-11-07(T10).
ZHENG H M. China rice industry report 2023[N]. Grain and Oil Market Journal, 2023-11-07(T10).
- [2] 刘锐, 苗艺源, 黄家章, 等. 营养功能型稻米产业研究进展与展望[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(6): 215-224.
LIU R, MIAO Y Y, HUANG J Z, et al. Research progress and prospect of functional rice industry[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(6): 215-224.
- [3] 胡时开, 胡培松. 功能稻米研究现状与展望[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(4): 311-325.
HU S K, HU P S. Research progress and prospect of functional rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2021, 35(4): 311-325.
- [4] KASOTE D, SREENIVASULU N, ACUIN C, et al. Enhancing health benefits of milled rice: current status and future perspectives[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(29): 8 099-8 119.
- [5] 周婷, 程威威, 林亲录, 等. 发芽糙米制备工艺研究现状[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(7): 6-8.
ZHOU T, CHENG W W, LIN Q L, et al. Research status of preparation technology of germinated brown rice[J]. Cereals & Oils, 2013, 26(7): 6-8.
- [6] 傅亚平. 我国米制食品发展现状及思路[J]. 农业与技术, 2023, 43(20): 33-36.
FU Y P. Current situation and thinking of rice-based food development in China[J]. Agriculture and Technology, 2023, 43(20): 33-36.
- [7] 周田田, 唐兆成, 李笑, 等. 利用基因编辑技术创制低谷蛋白水稻种质[J]. 作物学报, 2024, 50(10): 2 435-2 446.
ZHOU T T, TANG Z C, LI X, et al. Development of low-glutelin rice germplasm by gene editing technology[J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(10): 2 435-2 446.
- [8] WANG A Q, CHENG W J, LI M X, et al. Creation of high-resistant starch rice through systematic editing of amylopectin biosynthetic genes in rs4[J]. Plant Biotechnology Journal, 2024, 19: 1-9.
- [9] 白建江, 朱辉明, 李丁鲁, 等. 高抗性淀粉稻米对GK糖尿大鼠的血糖和血脂代谢的影响[J]. 中国食品学报, 2012, 12(9): 16-20.
BAI J J, ZHU H M, LI D L, et al. Effect of the high resistant starch rice on blood glucose and lipid metabolism in diabetic GK mice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(9): 16-20.
- [10] ZHU Q L, YU S Z, ZENG D C, et al. Development of "purple endosperm rice" by engineering anthocyanin biosynthesis in the endosperm with a high-efficiency transgene stacking system[J]. Molecular Plant, 2017, 10(7): 918-929.
- [11] 郭孔雁, 陈立云, 肖层林, 等. 稻米营养价值及其食味的研究[J]. 湖南农学院学报, 1989, 15(4): 1-5.
GUO K Y, CHEN L Y, XIAO C L, et al. A preliminary study on the nutrient and eating quality of scent rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 1989, 15(4): 1-5.
- [12] GAO S P, XIAO Y H, XU F, et al. Cytokinin-dependent regulatory module underlies the maintenance of zinc nutrition in rice[J]. New Phytologist, 2019, 224(1): 202-215.
- [13] 刘玲珑, 江玲, 刘世家, 等. 巨胚水稻W025糙米浸水后 γ -氨基丁酸含量变化的研究[J]. 作物学报, 2005, 31(10): 1 265-1 270.
LIU L L, JIANG L, LIU S J, et al. Accumulation of the γ -aminobutyric acid in brown rice-a new rice strain W025 with giant-embryo during water soaking[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(10): 1 265-1 270.
- [14] MEIJER G W, LÄHTEENMÄKI L, STADLER R H, et al. Issues surrounding consumer trust and acceptance of existing and emerging food processing technologies[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(1): 97-115.
- [15] 李丽云. “六步鲜米精控技术”全产业链呵护稻米新鲜品质[N]. 科技日报, 2021-07-19(3).
LI L Y. 'Six steps of fresh rice control technology' to protect the fresh quality of rice throughout the whole industrial chain [N]. Science and Technology Daily, 2021-07-19(3).
- [16] 李欣, 齐家敏, 程昊, 等. 基于机器视觉的谷糙分离检测方法[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 97-103.
LI X, QI J M, CHENG H, et al. Grain and chaff separation detection method based on machine vision[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 97-103.
- [17] 彭国泰, 吴娜娜, 谭斌, 等. 超微粉碎处理对糙米粉理化性质的影响[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(2): 17-21.
PENG G T, WU N N, TAN B, et al. Study on the effect of superfine grinding on physicochemical properties of brown rice flour[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(2): 17-21.
- [18] 胡婷, 王鑫, 耿可赞, 等. 超微粉碎对黑米糠多酚的组成及活

- 性的影响[J/OL]. 现代食品科技. (2024-09-18) [2024-10-08]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GZSP20240914007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- HU T, WANG X, GENG K Z, et al. Effect of superfine grinding on composition and activity of polyphenols from black rice bran[J/OL]. China Industrial Economics. (2024-09-18) [2024-10-08]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GZSP20240914007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [19] 管弋钰. 超高压结合热处理对大米粉理化特性及蛋白质的影响[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017: 34-35.
- GUAN Y X. Effects of Combined ultra-high pressure and thermal treatment on physicochemical properties and proteins of rice flour [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017: 34-35.
- [20] 孟玲. 超高压黑米饭贮藏中品质变化及再生特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 37-39.
- MENG L. Study on quality changes and regeneration characteristics of black rice in storage under ultra-high pressure [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 37-39.
- [21] 徐鹏程, 王苾玮, 罗小虎, 等. 电子束辐照对留胚米理化性质及食用品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(4): 41-47.
- XU P C, WANG J W, LUO X H, et al. Effect of electron beam irradiation on physicochemical properties and edible qualities of rice with remained germ[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(4): 41-47.
- [22] 李庆龙. 一种采用多次喷涂浸吸与涂膜生产营养强化米的方法: CN 200510019124.5[P]. 2006-01-11.
- LI Q L. Method for producing nutrition-enhanced rice by using multiple spraying soaking and coating procedures: CN 200510019124.5[P]. 2006-01-11.
- [23] 于秀荣, 陈建仁, 黄社章, 等. 微波干燥粮食初探[J]. 中国粮油学报, 2000, 15(5): 57-62.
- YU X R, CHEN J R, HUANG S Z, et al. Exploration of drying grain by microwave[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2000, 15(5): 57-62.
- [24] SHEN L Y, GAO M, ZHU Y, et al. Microwave drying of germinated brown rice: correlation of drying characteristics with the final quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 70: 102673.
- [25] 朱松, 宋善武, 进伟, 等. 胚芽米微波灭酶工艺[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(6): 603-609.
- ZHU S, SONG S W, LI J W, et al. Study on the technology of inactivation enzyme in embryo-remaining rice by microwave [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(6): 603-609.
- [26] CHATCHAVANTHATRI N, JUNYUSEN T, ARJHARN W, et al. Effects of parboiling and infrared radiation drying on the quality of germinated brown rice[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(11): e15892.
- [27] 吕晓莲. 气流膨化技术对核桃早餐谷物食品质构的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(4): 22-25.
- LU X L. Effect of air puffing technology on texture of walnut cereal breakfast[J]. Food Science, 2012, 33(4): 22-25.
- [28] 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. Nutritional composite rice processing technology research[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(5): 112.
- [29] WANG J J, LI M F, WANG C, et al. Effect of extrusion processing and addition of purple sweet potatoes on the structural properties and *in vitro* digestibility of extruded rice [J]. Food & Function, 2021, 12(2): 739-746.
- [30] 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.
- [31] BILAL M, IQBAL H M N. State-of-the-art strategies and applied perspectives of enzyme biocatalysis in food sector: current status and future trends[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(12): 2 052-2 066.
- [32] 任元元, 李宇航, 孟资宽, 等. 协同发酵生产的鲜湿米粉及其品质特性和风味研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(11): 185-191.
- REN Y Y, LI Y H, MENG Z K, et al. Quality and flavor characteristics of fresh rice noodles produced by co-fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48 (11): 185-191.
- [33] SADEGHI A, EBRAHIMI M, RAEISI M, et al. Improving the antioxidant capacity of bread rolls by controlled fermentation of rice bran and addition of pumpkin (*Cucurbita pepo*) puree [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 2 837-2 845.
- [34] 唐慧, 范洪臣, 茜琳, 等. 酵母发酵米浆制作米发糕工艺[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(22): 68-73.
- TANG H, FAN H C, XI L, et al. Technology of making rice-steamed Chinese sponge cake with yeast-fermented rice paste [J]. Food Research and Development, 2023, 44(22): 68-73.
- [35] 张瑞莉. 挤压与酶法集成制备糙米乳工艺和营养特性的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013: 41-43.
- ZHANG R L. Study on the process and nutritional properties of brown rice milk prepared by integrating extrusion and enzyme method [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013: 41-43.
- [36] 钱鑫, 周文化, 李良怡, 等. 鲜湿米粉抗老化研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 208-214.
- QIAN X, ZHOU W H, LI L Y, et al. Research progress on anti-retrogradation of fresh rice noodles [J]. Food & Machinery,

- 2021, 37(10): 208-214.
- [37] 王子妍, 刘颖, 贾健辉, 等. 预糊化—复合酶解法制备婴幼儿留胚米粉及其理化性质研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 228-234.
- WANG Z Y, LIU Y, JIA J H, et al. Preparation and physicochemical properties of pregelatinization-composite enzymatic digestion of rice flour with embryos for infants and children[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 228-234.
- [38] 朱玲凤, 谢秋涛, 袁洪燕, 等. 发芽糙米红豆饮品研制[J]. 食品工业, 2024, 45(2): 1-4.
- ZHU L F, XIE Q T, YUAN H Y, et al. Preparation of germinated brown rice and red bean beverage[J]. Food Industry, 2024, 45(2): 1-4.
- [39] 陈款, 周游, 庄坤, 等. 纤维素酶处理改善糙米米线食用品质的研究[J]. 食品科技, 2023, 48(4): 168-175.
- CHEN K, ZHOU Y, ZHUANG K, et al. Improving the edible quality of brown rice noodles by cellulase treatment[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(4): 168-175.
- [40] LU S Y, MU Y F, XU M H, et al. Ultrasound-assisted cellulase pretreatment and cooking with enzymatic hydrolysates enhance the freeze-thaw stability of brown rice[J]. LWT, 2023, 173: 114390.
- [41] HATTA E, MATSUMOTO K, HONDA Y. Bacillolysins, papain, and subtilisin improve the quality of gluten-free rice bread[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 61: 41-47.
- [42] FANG Y, CATRON B, ZHANG Y F, et al. Distribution and *in vitro* availability of selenium in selenium-containing storage protein from selenium-enriched rice utilizing optimized extraction[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(17): 9 731-9 738.
- [43] WU J, DING J, SHI Y, et al. Inhibition of immunotoxicity of Pb²⁺-induced RAW264.7 macrophages by selenium species in selenium-enriched rice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2021, 148: 111943.
- [44] 王炜华, 黄丽, 刘成梅, 等. 米糠膳食纤维对强化大米质构的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(3): 16-18, 31.
- WANG W H, HUANG L, LIU C M, et al. Effect of rice bran dietary fiber on texture properties of fortified rice[J]. Food & Machinery, 2011, 27(3): 16-18, 31.
- [45] 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.
- [46] 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 compound rice[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 184-190.
- [47] GUAN C M, LIU J J, GAN S L, et al. Effects of soluble soybean polysaccharide on cooking and eating quality of dry rice noodles under single- and twin-screw extrusions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 187: 115352.
- [48] 李才明, 陈荻, 陆瑞琪, 等. 可得然胶对米粉加工及食用品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 23-28.
- LI C M, CHEN D, LU R Q, et al. Effect of curdlan on processing and eating quality of rice noodles[J]. Food Science, 2021, 42(16): 23-28.
- [49] JI X, XIONG Y L, JIANG J. Tunable rice protein-starch composite soft gels: structural role of ultrasound-modified protein[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109462.
- [50] 于衍霞, 安红周, 宗英俊, 等. 米制品国内外研究与发展现状[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(7): 141-146.
- YU Y X, AN H Z, ZONG Y J, et al. The current situation of rice processed product research and development at home and abroad[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(7): 141-146.
- [51] 陈思逸, 龙靖玮, 梁建芬. 低生糖指数(GI)主食产品开发研究策略[J/OL]. 食品研究与开发. (2024-10-14) [2024-11-02]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SPYK20241012001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- CHEN S Y, LONG J W, LIANG J F. Strategies focusing on staple food innovation and development with low glycemic index[J/OL]. Food Research and Development. (2024-10-14) [2024-11-02]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SPYK20241012001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [52] 对话慢教授李俊堃: 控糖风潮下, 大食品赛道的“低GI”革命[EB/OL]. (2024-05-20) [2024-11-02]. <https://xueqiu.com/9132294412/290725767>.
- Dialogue with professor Li Junkun: the 'low GI' revolution in the big food track under the sugar control trend[EB/OL]. (2024-05-20) [2024-11-02]. <https://xueqiu.com/9132294412/290725767>.