

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.01.007

王丹, 翟小童, 张娜, 等. 全谷物糙米的消化特性及其影响因素研究进展[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(1): 80-86.

WANG D, ZHAI X T, ZHANG N, et al. Research progress on the digestion characteristics and influencing factors of whole grain brown rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(1): 80-86.

全谷物糙米的消化特性及其影响因素研究进展

王丹^{1,3}, 翟小童², 张娜¹, 吴娜娜², 谭斌²✉

1. 哈尔滨商业大学 食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150076;
2. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮油加工研究所, 北京 100037;
3. 齐齐哈尔大学 化学与化学工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要: 大力发展全谷物产业是我国贯彻落实《粮食安全保障法》与“健康中国”战略, 践行大食物观的重要举措。稻米是我国居民重要的主食来源, 在日常膳食中, 用部分糙米替代精白米食用是摄入全谷物的有效途径之一。研究表明, 全谷物糙米具有血糖血脂调节、体重控制等营养健康作用, 一方面得益于糙米中富含的膳食纤维、多种微量营养素及生物活性物质, 另一方面是通过上述营养活性物质改变碳水化合物、蛋白质等相关膳食营养素的消化与吸收效率实现的。食物消化过程是关联上述影响的关键环节, 当前表征糙米消化过程的研究方法主要包括体外静态模拟、体外动态模拟及体内消化等。本文系统综述了稻米宏量及微量营养组分、生物活性物质, 不同加工精度及糙米加工技术对稻米淀粉消化特性的影响及其可能机制, 以为全谷物糙米的研发与加工技术选择提供参考依据。

关键词: 糙米; 消化特性; 品种; 营养物质; 加工精度; 加工技术

中图分类号: TS217; S511 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)01-0080-07

网络首发时间: 2024-12-24 14:22:54

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20241224.1016.004>

Research Progress on the Digestion Characteristics and Influencing Factors of Whole Grain Brown Rice

WANG Dan^{1,3}, ZHAI Xiao-tong², ZHANG Na¹, WU Na-na², TAN Bin²✉

- (1. School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150076, China;
2. Institute of Cereal and Oil Science and Technology, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;
3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

收稿日期: 2024-06-25; 修回日期: 2024-07-24; 录用日期: 2024-07-26

基金项目: 国家粮食和物资储备局科学研究院自选课题“预制全谷物主食中重要活性物质的生物可利用度研究”(JY2404)

Supported by: Independent Research Project of Academy of National Food and Strategic Reserves Administration “The Bioaccessibility and Bioavailability of Bioactive Compounds from Pre-cooked Whole Grain Staple Food” (No. JY2404)

第一作者: 王丹, 女, 1991年出生, 在读博士生, 研究方向为健康谷物食品加工与品质调控, E-mail: wd15214405606@163.com

通信作者: 谭斌, 男, 1972年出生, 博士, 研究员, 首席科学家, 研究方向为健康谷物(全谷物)食品营养与加工, E-mail: tb@ags.ac.cn

Abstract: The development of the whole grain industry in China is a key measure in implementing the “Food Security Guarantee Law” strategy and the “Healthy China” strategy. It also aligns with practicing the broader concept of food security. Rice is a staple food for Chinese residents, and substituting white rice with brown rice is an effective way to increase whole grains intake. Studies have shown that whole grain brown rice provides health benefits in blood glucose and lipid regulation, as well as weight control. These effects attributed to the effects of dietary fiber, various micronutrients, and bioactive compounds abundant in brown rice. Additionally, these health effects also result from alterations in the digestion and absorption efficiency of dietary nutrients like carbohydrates and proteins, mediated by these bioactive compounds. The digestion process of food is a key link related to the aforementioned effects. Current research methods for characterizing the digestion process of brown rice mainly static and dynamic *in vitro* static simulations, as well as *in vivo* digestion. This article systematically reviews the macro and micronutrient components and bioactive substances of rice. It also explores the effects of different processing accuracy and brown rice processing techniques on rice starch digestion characteristics and their potential mechanisms. The aim is to provide reference for the development and selection of processing technologies for whole grain brown rice.

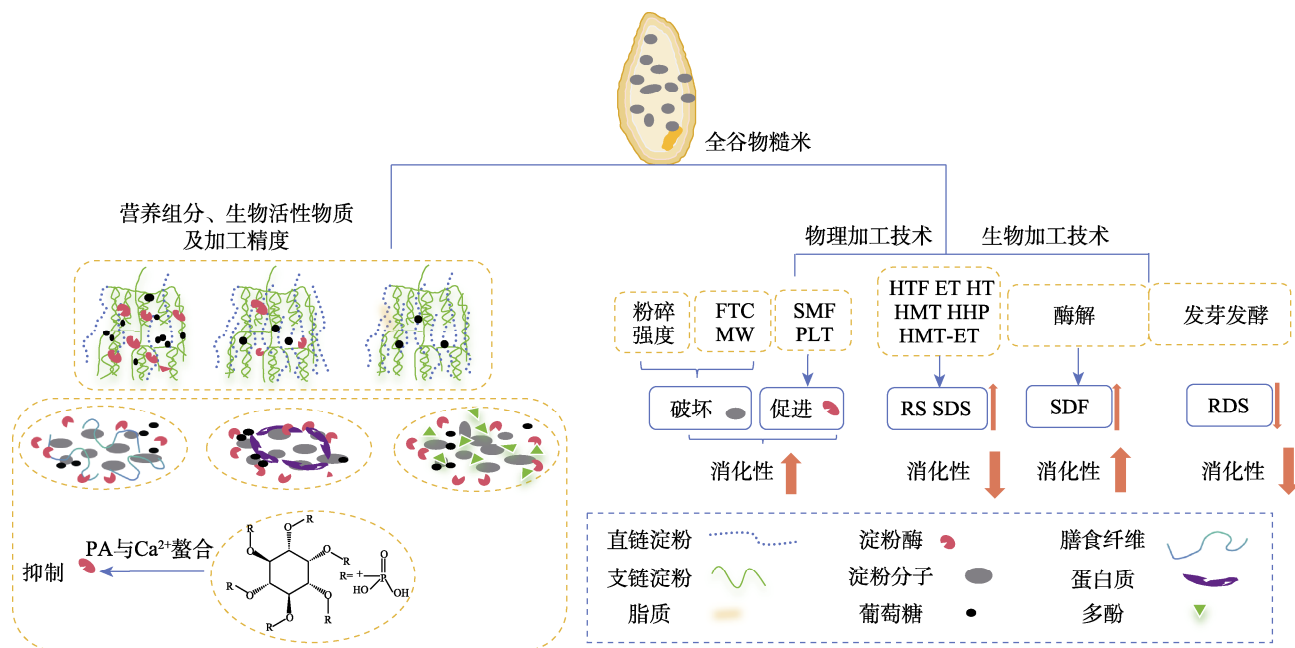
Key words: brown rice; digestive characteristics; variety; nutrients; processing accuracy; processing technology

稻谷在世界粮食作物中占据重要地位，我国稻米年产量高达 2.18 亿 t，约有一半以上消费者以稻米为主食来源^[1]。糙米是指稻谷仅经脱壳后的全谷物原料，比我们日常食用的精米少碾磨抛光等加工工序，保留了种皮和胚中的蛋白质、脂肪、粗纤维、维生素和矿物元素等微量营养素及多种生物活性组分^[2]。目前我国的加工与消费习惯以精白米及其制品为主，其主要成分为淀粉和蛋白质，满足了大部分人口的基本能量和营养需求，但精白米及其制品中膳食纤维、B 族维生素等微量营养素及各种生物活性组分的缺失，是导致我国居民营养摄入不均衡等隐形饥饿问题凸显的原因之一，也是我国代谢综合症、肥胖症、II 型糖尿病、冠心病、癌症等慢性疾病高发的重要因素^[3]。同时，精白米的出米率仅约为 64.5%，碾磨及抛光加工过程会导致 7% 稻米种皮与胚的损失，粮食可食用资源浪费严重^[4]。将全谷物糙米部分替代精白米作为主食食用，提供能量、膳食纤维和其他生物活性物质，通过多种方式干预调控米淀粉和蛋白的消化速率和程度来提升国民营养健康水平已成为新的研究方向和热点。全谷物糙米与精白米的消化特性有很大不同，研究发现，其自身因素及处理或加工条件可以影响糙米

的淀粉消化特性，进而对相关代谢参数及水平产生影响。本文将从品种和加工的角度综述影响全谷物糙米消化特性的因素及可能机制（图 1），为合理生产具有健康促进作用的全谷物糙米制品及后续全谷物糙米的研究利用提供参考依据。

1 糙米消化过程研究方法

当前谷物消化特性的研究方法^[5]主要有体内消化和体外消化，体外消化包括静态和动态模拟消化系统。体内消化通常在人体或动物体内进行，不同动物或人体间存在生理差异使体内消化方法变得复杂，同时受到伦理限制，其主要缺点是费时费力、缺乏精度和可重复性差。静态消化通常采用烧杯、试管等容器模拟空腔、胃、肠消化环境，具有快速、简单、成本较低等特点，但是不能模拟消化液的持续分泌和食物连续消化等过程。体外动态消化模仿胃肠道的消化系统、pH 的动态调节和食物排空行为，更接近体内环境，相对简单，易于操作，快速，节省劳动力和成本，可连续取样实行动态检测且没有伦理局限性，但受激素及反馈机制等差异影响不能代替体内相关研究。本文主要阐述在静态模拟消化条件下糙米的营养组分、生物活性物质和加工技术对消化特性的影响。



注：PA (Phytic Acid) 植酸；FTC (Freeze-thaw cycles) 冻融循环；MW (Microwave treatment) 微波处理；SMF (Static magnetic field) 静磁场；PLT (Pulsed light treatment) 脉冲光处理；HTF (High-temperature fluidization) 高温流化；ET (Extrusion treatment) 挤压处理；HT (Hydrothermal treatment) 水热处理；HMT (Heat-moisture treatment) 热湿处理；HHP (High hydrostatic pressure) 高静压；HMT-ET (Heat-moisture treatment-extrusion treatment) 热湿处理协同挤压膨化；RS (Resistant starch) 抗性淀粉；SDS (Slowly digestible starch) 慢消化淀粉；SDF (Soluble dietary fiber) 水溶性膳食纤维；RDS (Rapidly digestible starch) 快消化淀粉。

Note: PA, Phytic acid; FTC, Freeze-thaw cycles; MW, Microwave treatment; SMF, Static magnetic field; PLT, Pulsed light treatment; HTF, High-temperature fluidization; ET, Extrusion treatment; HT, Hydrothermal treatment; HMT, Heat-moisture treatment; HHP, High hydrostatic pressure; HMT-ET, Heat-moisture treatment-extrusion treatment; RS, Resistant starch; SDS, Slowly digestible starch; SDF, Soluble dietary fiber; RDS, Rapidly digestible starch.

图 1 影响全谷物糙米消化特性的因素及作用机理图

Fig.1 Factors influencing the digestive characteristics and mechanisms of whole grain brown rice

2 糙米营养组分及生物活性物质对其消化特性的影响

不同品种糙米的淀粉和蛋白质等宏量营养物质、维生素和矿物元素等微量营养物质、生物活性物质等的含量与组成结构存在差异。糙米中淀粉、蛋白质和其他组分之间相互作用的机制不断被揭示和认识，淀粉的分子组成、淀粉与内源性物质的相互作用等因素均可影响淀粉的消化率。

2.1 淀粉

淀粉主要由直链淀粉和支链淀粉组成，这两种不同聚合物的相对数量和组成是决定淀粉性质的重要指标。通常用快速消化淀粉 (Rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉 (Slowly digestible starch, SDS) 和抗性淀粉 (Resistant starch, RS) 的比例来表示水解速率。随着 RS 相关研究的发展，将其分为 RS1~RS5 型^[6]，其中

高 RS 含量的糙米淀粉消化率较缓慢。

稻米中的淀粉由 70%~80% 的支链淀粉和 20%~30% 的直链淀粉组成。直链淀粉和支链淀粉的比例是决定淀粉类食品烹饪质量的主要因素。YAN 等^[7]以不同品种糙米为原料，研究煮熟糙米的体外淀粉消化率发现直链淀粉含量高的糙米品种消化率更缓慢。隋勇等^[8]通过对湖北省主产和特色的 7 个品种的糙米营养品质及理化特性进行测定，研究表明罗田贡米和巨 2 优 60 的直链淀粉含量均显著高于其它品种，这两种糙米具有更好的延缓淀粉体外消化速率的作用。可能是由于直链淀粉影响了淀粉的溶胀效果，形成稳定的双螺旋和微晶结构，抵抗酶的消化，导致淀粉酶在酶解过程中的可及性较低^[9]。

2.2 蛋白质和脂质

蛋白质是稻米中仅次于淀粉的第二大主要成分，在不同稻米品种中所占比例为 8%~13%。食

物蛋白质的胃肠道消化是一个复杂的过程，主要发生在胃和小肠，将膳食蛋白质分解成小肽和氨基酸后被身体吸收和利用，未消化的蛋白质进入大肠管腔，由结肠微生物发酵^[10]。蛋白质还可对淀粉的消化性产生影响。研究表明，稻米内源蛋白质通过物理屏障功能和增强有序结构来延缓稻米淀粉的消化。蛋白水解物与淀粉分子间形成氢键，增强淀粉的有序结构，提高了淀粉的抗性^[11]。另外膳食脂质在消化过程中，由存在于十二指肠和胃液中的脂肪酶进行酶解，消化产物被肠细胞吸收后入血。稻米内源性脂质减少了淀粉的膨胀，糊化后的淀粉可以与内源性脂质相互作用形成淀粉-脂质复合物，为 RS5 型抗性淀粉^[12]。同时，淀粉与脂质的相互作用使淀粉分子被修饰为螺旋状，从而抵抗消化。

2.3 膳食纤维

膳食纤维主要是植物细胞壁的非淀粉多糖，在人体小肠中无法消化，在大肠中完全或部分发酵。按照其在水中的溶解性，膳食纤维可分为水溶性膳食纤维 (Soluble dietary fiber, SDF) 和水不溶性膳食纤维 (Insoluble dietary fiber, IDF)，均可对糙米及其制品的消化特性产生不同影响。糙米膳食纤维集中存在于米糠层^[13]，其含量为 7.0~11.4 g/100 g。将米糠 IDF 按 3%~12% 的比例添加到即食米粉配方中，可显著延缓淀粉在体外消化过程中的水解，RS 含量可从 12.64% 提高到 19.78%^[14]。膳食纤维会阻碍糙米烹饪过程中的水分运动，从而限制淀粉的膨胀，还可通过膳食纤维的粘度影响淀粉水解，延缓胃排空并且对淀粉颗粒进行包埋，降低消化酶的可及性，从而影响消化率^[15-16]。有研究表明，IDF 比 SDF 更能显著延缓淀粉消化、降低消化速率和可消化淀粉含量，进而影响血糖生成指数 (Glycemic index, GI)^[17]。IDF 主要是通过范德华力或氢键作用与 α -淀粉酶结合，这种相互作用导致其二级结构发生改变，使 α -淀粉酶活性降低^[18]。

2.4 多酚

多酚作为一类次生代谢产物，广泛分布于植物中，其结构多样，能够影响生物利用度。大部

分多酚在胃肠道中未被吸收，可能会在大肠中积聚，并被肠道微生物群广泛代谢。研究表明，多酚可以延缓淀粉的体外消化，随着浓度增加，糙米多酚对 α -葡萄糖苷酶与 α -淀粉酶的抑制率也逐渐增大，抑制率达到最高值的多酚浓度为 188 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ，加入糙米多酚之后，对应的 RDS 值均有所降低^[19]。糙米中含有的多酚通过氢键与淀粉链相互作用，延缓淀粉消化。但是结合多酚与游离多酚的抑制消化作用存在一定差异。

2.5 植酸及其他

植酸 (Phytic acid, PA) 又称六磷酸肌醇，有极高的负电荷和强大的螯合能力，PA 含量的变化可能影响淀粉消化并影响血糖水平。PA 与淀粉通过磷酸键结合，也可以与肠道内的 Ca^{2+} (α -淀粉酶活性的辅助因子) 结合，可能会导致人体肠道对淀粉的消化速度减慢，从而降低血糖反应^[20]。另外，类黄酮化合物在蒸煮过程中与稻米淀粉结合^[21]，使稻米淀粉发生化学改性形成 RS4，有助于减缓淀粉的消化。

3 加工精度对糙米消化特性的影响

碾磨度 (Degree of milling, DOM) 或加工精度是稻米碾磨过程中去除糠层的程度。淀粉消化率在不同碾磨度的稻米样品中存在差异。碾磨过程对麸皮层的破坏，提高了精白米的吸水能力和淀粉粒糊化程度，从而加快了淀粉的消化速度。随着 DOM 的增加，蛋白质含量逐渐下降，当 DOM 从 0% 增加到 12% 时，RDS 含量从 68.69% 增加到 73.51%，SDS 和 RS 含量分别从 24.96% 和 6.35% 下降到 22.19% 和 4.30%^[22]。可见 DOM 影响了蛋白质、脂肪和膳食纤维的含量进而影响糙米淀粉的消化率。

4 物理及生物加工技术对糙米消化特性的影响

在食品原料预处理及加工成制品的过程中，一些物理和生物加工技术的应用可能改变糙米各组分的组成结构和理化性质，进而对其消化特性和营养品质产生一定的影响。

4.1 物理加工技术

4.1.1 延缓淀粉消化加工技术

高温流化 (High-temperature fluidization, HTF) 技术利用高流速热空气与稻米充分接触, 使水分与热量快速传递, 加快物料颗粒的干燥速度。这种处理技术温度高、传热速率快, 流化干燥影响谷物淀粉、流变学、热力学等性质。HTF 处理后, 由于 RDS 含量下降, SDS 和 RS 含量上升, 发芽糙米淀粉消化性明显降低^[24]。挤压 (Extrusion treatment, ET) 是高温、高压以及高剪切条件下的连续化加工方式, 相较于其他加工技术具有用时较短、耗能较低、高效杀菌、产品多样等特点。在挤压过程中, RS 不易被破坏, RDS 含量增加, SDS 含量减少^[25]。经挤压成型的糙米粉, 由于其结构致密, 消化酶难以与淀粉接触, 因此, 精米粉的消化速率高于糙米粉。另一方面, 在挤压过程中, 淀粉与脂质、蛋白均可能形成复合物, 降低了淀粉的消化率。

热湿处理 (Heat-moisture treatment, HMT) 是一种在低含水量条件下, 将淀粉颗粒暴露在高温条件, 但低于糊化起始温度下, 在特定时间内进行水热改性的方法, 具有天然、安全环保等特点。利用 HMT 可以提高淀粉链的迁移率, 特别是增加加热温度和时间, 使抗性淀粉含量升高, 从而降低消化酶的易感性。热空气和湿化热空气处理导致糙米质地变硬, 产生 V 型直链淀粉-脂复合物^[26]。热湿处理协同挤压膨化技术的糙米粉, 通过淀粉老化产生的新的螺旋结构和淀粉修饰的脂复合物有效地限制淀粉酶的活性, 达到降低血糖指数的效果^[27]。水热处理 (Hydrothermal treatment, HT) 是一种绿色环保的物理方法, 已被用于各种产品的加工。采用温水热处理缩短浸泡糙米时间, 降低微生物污染的风险, 提高淀粉的糊化粘度和糊化温度, 显著提高了糙米淀粉的 SDS 和 RS 含量, 说明水热处理导致淀粉链的关联和重排更强^[28]。高静压 (High hydrostatic pressure, HHP) 技术的优势在于处理食品时为非热环境, 在室温条件达到 100~1 000 MPa 的压力, 为改善食品的质地、延长货架期提供了可能。高静压技术使抗

性淀粉含量比例增高, 从而降低了糙米淀粉的消化率^[29]。

4.1.2 促进淀粉消化加工技术

颗粒细度会影响皮层在全谷物粉中分布, 使得全谷物食品的表面光滑, 口感细腻。粉碎强度与糙米粉的损伤淀粉含量成正比。与天然淀粉相比, 增大颗粒细度提高了体外消化的速度, 提高了谷物淀粉中 RDS 和 SDS 的含量, 降低了 RS 的含量^[30]。经过冻融循环 (Freeze-thaw cycles, FTC) 的糙米淀粉消化率提高, 主要是因为 FTC 过程中, 冰的膨胀会破坏糙米米糠, 从而使淀粉更容易糊化和被消化^[31]。微波 (Microwave treatment, MW) 加热糙米产生的电磁波通过偶极旋转和电离从内部产生热量, 在水分子之间产生摩擦, 从而将多余的水分从内部移到外部, 而不会损坏糙米表观结构。微波处理的糙米直链淀粉含量有所降低, 可能是微波热效应削弱淀粉链分子间的氢键作用, 从而破坏淀粉颗粒的完整性和有序化结构。磁场通过电荷或电流之间的相互作用产生生物学效应, 具有安全环保、对物料成分破坏小等特点。静磁场 (Static magnetic field, SMF) 可以通过驱动蛋白质内移动电荷或磁性离子的迁移来改变蛋白质的构象, 提高发芽糙米 α -淀粉酶活性^[32]。脉冲光 (Pulsed light treatment, PLT) 处理是一种非热加工技术, 采用广谱的高强度光 (100~1 100 nm), 用于快速灭活食品中的致病性和腐败微生物。一定剂量的脉冲光辐照可以增强糙米内源酶的活性^[33], 促进了淀粉的水解。

4.2 生物加工技术

4.2.1 酶解技术

酶解改变了糙米皮层结构, 产生了新的物理和功能性质^[2]。有研究表明, 超声辅助酶处理可提高糙米粉淀粉消化率^[34]。纤维素酶处理降低了糙米粉中 IDF 的含量, 提高了 SDF 的含量, 酶处理虽然提高了糙米粉的淀粉消化率, 但淀粉相对结晶度较高的酶处理米粉的 GI 值显著低于精加工米粉。

4.2.2 发芽发酵技术

在种子萌发过程中, 淀粉水解为还原糖, 为

胚胎生长提供能量,从而改善糙米衍生产品的营养和功能品质。发芽糙米米粉的RS和SDS含量比精米米粉和糙米米粉高,而RDS含量低19.01%~34.56%,更具抗消化性能^[35]。


糙米经乳酸菌发酵后,糙米中可能有部分RDS向SDS和RS转变。根据消化动力学速率拟合数据,发酵糙米的消化率低于糙米的消化率,能够避免餐后血糖的骤升。郑子懿等^[36]利用酵母和植物乳杆菌以固态混合菌发酵作为糙米的深加工方式,与传统的发芽糙米相比发酵组的还原糖和总淀粉含量显著低于发芽组,表明利用混合菌进行发酵能够消耗更多的糖类物质。

5 结论与展望

全谷物糙米及其制品的工业化生产和消费推广有助于增加日常膳食中全谷物的摄入量,进而对降低血糖水平和慢性疾病的患病风险产生有益影响。然而,目前研究多数局限于单一组分或某种加工技术对糙米消化特性的影响,不足以反映应用于实际生产加工过程糙米及其制品中营养组分之间的相互作用关系。另外,当前关于糙米的消化特性研究多以体外静态模拟系统为主。因此,有待在分子水平和微观层面进一步探索糙米中的宏量和微量营养成分及生物活性物质在体内消化过程中的相互作用关系及调节机制,进一步实验与验证应用于全谷物糙米的不同加工技术间的协同作用。随着技术体系的进步,尽可能模拟真实胃肠道的解剖结构、蠕动和生化环境,以及不同停留时间内糙米及其制品消化过程中动态真实情况,优化动态体外消化模拟系统来模拟体内消化行为,为推动糙米和糙米制品的研发利用提供理论支撑。

参考文献:

- [1] LAL M K, SINGH B, SHARNA S, et al. Glycemic index of starchy crops and factors affecting its digestibility: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 741-755.
- [2] WU N N, LI R, LI Z J, et al. Effect of germination in the form of paddy rice and brown rice on their phytic acid, GABA, γ -oryzanol, phenolics, flavonoids and antioxidant capacity[J]. Food Research International, 2022, 159: 111603.
- [3] LIN Y W, TSAI C L, CHEN C J, et al. Insights into the effects of multiple frequency ultrasound combined with acid treatments on the physicochemical and thermal properties of brown rice postcooking[J]. LWT, 2023, 188: 115423.
- [4] 吴娜娜, 马占倩, 谭斌, 等. 不同加工精度稻米的营养物质含量、米粉特性及米饭品质研究进展[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(6): 40-45.
WU N N, MA Z Q, TAN B, et al. Research progress of nutrient content, flour properties, cooking and sensory quality of rice with different milling degree[J]. Science and Technology of Cereals, Oil and Foods, 2019, 27(6): 40-45.
- [5] REN C Y, ZHANG S, HONG B, et al. Germinated brown rice relieves hyperlipidemia by alleviating gut microbiota dysbiosis[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(3): 945-957.
- [6] JUKANTI A K, PAUTONG P A, LIU Q, et al. Low glycemic index rice—a desired trait in starchy staples [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 106: 132-149.
- [7] TUANO A P P, BARCELLANO E C G, RODRIGUEZ M S. Resistant starch levels and *in vitro* starch digestibility of selected cooked Philippine brown and milled rices varying in apparent amylose content and glycemic index[J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2021, 2: 100010.
- [8] 隋勇, 施建斌, 蔡沙, 等. 不同品种糙米营养品质和理化特性比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 37-43.
SUI Y, SHI J B, CAI S, et al. Comparison of nutritional quality and physicochemical properties of different varieties of brown rice[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 37-43.
- [9] KRISHNAN V, AWANA M, SAMOTA M K, et al. Pullulanase activity: A novel indicator of inherent resistant starch in rice (*Oryza sativa*. L)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152: 1213-1223.
- [10] YAN Z, GUI Y, LIU C, et al. Gastrointestinal digestion of food proteins: Anticancer, antihypertensive, anti-obesity, and immunomodulatory mechanisms of the derived peptides[J]. Food Research International, 2024, 189: 114573.
- [11] LU X, MA R, QIU H, et al. Mechanism of effect of endogenous/exogenous rice protein and its hydrolysates on rice starch digestibility[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193(1): 311-318.
- [12] LING X, ZHANG J, TENG J, et al. Effects of cross-linking of rice protein with ferulic acid on digestion and absorption of ferulic acid[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2023, 74(3): 313-326.
- [13] PARK J, OH S K, DOO M, et al. Effects of consuming heat-treated dodamssal brown rice containing resistant starch on glucose metabolism in humans[J]. Nutrients, 2023, 15(10): 2248.
- [14] LIU T, WANG K, XUR W, et al. *In vitro* starch digestibility, edible quality and microstructure of instant rice noodles enriched

- with rice bran insoluble dietary fiber[J]. LWT, 2021, 142: 111008.
- [15] TIAN X Y, LIU J F, CHENG Z, et al. Structure, thermal stability, physicochemical and functional characteristics of insoluble dietary fiber obtained from rice bran with steam explosion treatment: Effect of different steam pressure and particle size of rice bran[J]. Food Research International, 2024, 187: 114310.
- [16] ZHENG J, HUANG S, ZHAO R, et al. Effect of four viscous soluble dietary fibers on the physicochemical, structural properties, and *in vitro* digestibility of rice starch: A comparison study[J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130181.
- [17] OH I K, BAE I Y, LEE H G. *In vitro* starch digestion and cake quality: impact of the ratio of soluble and insoluble dietary fiber[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 63: 98-103.
- [18] HE T, ZHANG X, ZHAO L, et al. Insoluble dietary fiber from wheat bran retards starch digestion by reducing the activity of alpha-amylase [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136624.
- [19] WU N N, LI H H, TAN B, et al. Free and bound phenolic profiles of the bran from different rice varieties and their antioxidant activity and inhibitory effects on α -amylase and α -glucosidase[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 82: 206-212.
- [20] KUMAR A, SAHU C, PANDA P A, et al. Phytic acid content may affect starch digestibility and glycemic index value of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture 2020, 100(4): 1598-1607.
- [21] TAKAHAMA U, HIROTA S, YANASE E. Slow starch digestion in the rice cooked with adzuki bean: Contribution of procyanidins and the oxidation products[J]. Food Research International, 2019, 119: 187-195.
- [22] LI F, GUAN X, LI C. Effects of degree of milling on the starch digestibility of cooked rice during (*in vitro*) small intestine digestion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 188: 774-782.
- [23] FU T, CAO H, ZHANG Y, et al. Effect of milling on *in vitro* digestion-induced release and bioaccessibility of active compounds in rice[J]. Food Chemistry, 2024, 437(2): 137936.
- [24] 苏勋. 高温流化改良发芽糙米蒸煮食用品质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
SU X. Study on improving cooking and eating qualities of germinated brown rice by high-temperature air fluidization[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [25] ALTAF U, HUSSAIN S Z, NASEER B, et al. Nutritional and bioactive components of rice-chickpea based snacks as affected by severe and mild extrusion cooking[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(15): 7126-7135.
- [26] THUENGTUNG S, KETNAWA S, DING Y, et al. Effect of mild heat-moisture treatment for harvested raw paddy rice on physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of cooked rice[J]. Food Hydrocolloids for Health, 2023, 3: 100133.
- [27] ZHANG G, XUAN Y, LYU F, et al. Microstructural, physicochemical properties and starch digestibility of brown rice flour treated with extrusion and heat moisture[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124594.
- [28] WEI Q, GUO Y, LIU X, et al. Improving the eating quality of brown rice by defatting combined with hydrothermal treatment[J]. Food Research International, 2022, 162(1): 112020.
- [29] XIA Q, WANG L P, XU C C, et al. Effects of germination and high hydrostatic pressure processing on mineral elements, amino acids and antioxidants *in vitro* bioaccessibility, as well as starch digestibility in brown rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Food Chemistry, 2017, 1: 533-542.
- [30] GENG D H, ZHANG X, ZHU C, et al. Structural, physicochemical and digestive properties of rice starch modified by preheating and pullulanase treatments[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 313: 120866.
- [31] WANG H, WANG Q, ZHU J, et al. Comparison of high-pressure, freeze-thaw cycles and germination-parboiling treatments on lipids digestibility and rancidity of brown rice[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 15667.
- [32] LUO X, TAO Y, HAN Y, et al. Effect of static magnetic field treatment on γ -aminobutyric acid content and sensory characteristics of germinated brown rice cake[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134709.
- [33] ZHANG G, HUA D, XU J, et al. Pulsed light treatment enhances starch hydrolysis and improves starch physicochemical properties of germinated brown rice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(3): 1599-1608.
- [34] GENG D H, LIN Z, LIU L, et al. Effects of ultrasound-assisted cellulase enzymatic treatment on the textural properties and *in vitro* starch digestibility of brown rice noodles[J]. LWT, 2021, 146: 111543.
- [35] WUNTHUNYARAT W, SEO H S, WANG Y J. Effects of germination conditions on enzyme activities and starch hydrolysis of long-grain brown rice in relation to flour properties and bread qualities[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(2): 349-357.
- [36] 郑子懿, 李成武, 李琳, 等. 比较发芽和固态发酵对糙米营养及感官品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4467-4473.
ZHENG Z Y, LI C W, LI L, et al. Comparison of effects of germination and solid-state fermentation on nutritional and sensory quality of brown rice[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(11): 4467-4473. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://llyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。