DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.020

全谷燕麦方便米饭的制备及品质分析

张静雯[1],马舜章[2],刘成洋[3],李林[3],申瑞玲[3]
(1. 河南职业技术学院 文化旅游学院,河南 郑州 450046;2. 北京工商大学 食品与健康学院,北京 100048;3. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院,河南 郑州 450000)

摘　要:为促进全谷燕麦米的消费,增加米饭营养和改善其营养构成,提供方便食品,该研究以脱皮率为9.82%、富含糊粉层的自制全谷燕麦米和市售大米为原料,探讨全谷燕麦米与大米混合米饭的浸泡条件、燕麦米占比、米水比对品质的影响,并采用质构分析、感官评价的方法确定最佳的燕麦米与大米混合米饭的蒸煮工艺,进一步研究泡打粉添加量、蒸煮温度、冷冻温度对冻干速食混合米饭加工品质的影响,并对制备的方便米饭复水特性与感官品质进行评价分析,研究其风味和营养品质变化。结果表明,当浸泡温度25~40 ℃、浸泡时间20~30 min、燕麦米占比30%(质量分数)、米水比1∶1.5~1∶2.0(g/mL)、蒸煮时间22 min时,此工艺蒸煮制成的混合米饭品质佳,口感好,利于消化吸收。0.5%泡打粉、120 ℃蒸煮、-20 ℃冷冻条件下,复水性能最佳,能最好地改善燕麦和大米的微观结构。与新鲜混合米饭和商品速食米饭相比,冻干速食混合米饭具有丰富的营养与芳香成分。

关键词:全谷燕麦米;冻干速食混合米饭;品质;风味;营养

Preparation and Quality Analysis of Convenient Rice with Whole-Grain Oat

ZHANG Jingwen[1], MA Shunzhang[2], LIU Chengyang[3], LI Lin[3], SHEN Ruiling[3]
(1. Culture and Tourism College, Henan Vocational and Technical College, Zhengzhou 450046, Henan, China; 2. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 3. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: To promote the consumption of whole-grain oat rice, enrich the nutritional content of rice, improve its nutritional composition, and provide convenient food, this study used self-made whole-grain oat rice with 9.82% dehulling rate and rich in aleuron layer and commercial rice as raw materials. The effects of soaking conditions, oat rice proportion, and rice-water ratio on the quality of composite rice were studied. The optimal steaming process for composite rice was determined by texture analysis and sensory evaluation. The effects of baking powder addition, steaming temperature, and freezing temperature on the processing quality of freeze-dried instant mixed rice were further studied. The rehydration characteristics and sensory quality of the prepared convenient rice were evaluated, and the changes of its flavor and nutritional quality were analyzed. The results showed that the composite rice prepared under the conditions of soaking temperature 25-40 ℃, soaking time 20-30 min, oat proportion 30% (mass fraction), rice-water ratio 1∶1.5-1∶2.0 (g/mL), and steaming time 22 min had good quality, good taste and was conducive to digestion and absorption. Under the conditions of 0.5% baking powder addition, 120 ℃ steaming, and freezing at -20 ℃, the rehydration performance was the best, which could optimally change the microstructure of oat rice and rice. Compared with fresh mixed rice and commercial instant rice, the freeze-dried instant mixed rice had richer nutrition and aromatic components.

Key words: whole-grain oats rice; freeze dried instant mixed rice; quality; flavor; nutrition

引文格式:
张静雯,马舜章,刘成洋,等. 全谷燕麦方便米饭的制备及品质分析[J]. 食品研究与开发,2026,47(17):165-173,209.
ZHANG Jingwen, MA Shunzhang, LIU Chengyang, et al. Preparation and Quality Analysis of Convenient Rice with Whole-Grain Oat[J]. Food Research and Development,2026,47(17):165-173,209.

基金项目:国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-07-E-2)
作者简介:张静雯(1976—),女(汉),副教授,硕士研究生,研究方向:食品营养与加工。

近年来，随着人们生活水平提高和生活方式的变化，人们对多样化且营养丰富的方便米饭产品需求不断增加。在方便米饭产品中，以大米为原料的产品是消费的主流。方便米饭加工方法包括无菌加工、高温杀菌、超高压和挤压重组等多种不同的加工技术[1]，产品原料和食用品质更是关注的重点。基于适度加工的理念，有研究以稻花香为原料，制备精米（留皮度 0.21%）、适碾米Ⅰ（留皮度 2.15%）、适碾米Ⅱ（留皮度 6.67%）和糙米，对方便米饭食用品质和理化性质进行研究，结果表明，适碾米Ⅰ、Ⅱ与精米的蒸煮品质和米饭食味值差异不显著，且要优于糙米；适碾米Ⅱ方便米饭气味值较高，即留皮度接近 7% 适碾上限的大米在稻谷利用率和营养健康等方面有较大优势[2]。张晓绘[3]以 4 种粳米和 4 种籼米为研究对象，通过主成分分析法对即食米饭进行品质评价并建立了即食米饭品质评价模型，筛选出适合制备即食米饭的原料米品种；探究了不同品种即食米饭在不同预处理结合杀菌强度条件下和即食米饭贮藏期品质的变化规律，并进行货架期预测，为即食米饭品质改良与工业化生产奠定理论基础。但白米为原料的方便米饭血糖生成指数（glycemic index，GI）值通常较高，高 GI 值饮食会增加患 2 型糖尿病、高血压等疾病的风险[4]，因此，目前在方便或速食米饭的原料方面，也逐渐呈现多样化的趋势，GI 值较低的杂粮杂豆、富含抗性淀粉和膳食纤维的原料成为了关注重点[5-6]。朱佳妮等[7]在大米中添加白芸豆 α-淀粉酶抑制剂、魔芋粉、抗性糊精和单、双甘油脂肪酸酯，采用双螺杆挤压法制备出 GI 值为 32.18 的低 GI 方便米饭。添加杂粮的方便米饭不仅 GI 值低，且可以增加全谷物摄入量，近年来其研究与应用更加广泛[8]，谭月圆[9]将藜麦浸泡 60 min，蒸煮 30 min 后采用 α-淀粉酶酶解，再进行真空冷冻干燥，研发出一种营养方便藜麦饭；也有研究以高粱为原料，在 40 ℃下浸泡 3 h，添加 0.15% 柠檬酸和 1.5% 的 β-环糊精，可制得感官评分为 94.3、复水率为 2.30 的高粱方便米饭[10]。路欣等[11]将不同比例的燕麦全粉、鹰嘴豆粉和苦荞茶粉添加到大米粉和小米粉中，经挤压熟化制备不同原料配比的杂粮大米及小米，结果表明，添加杂粮能明显降低挤压熟化米预估血糖生成指数（expected glycemic index，eGI）值，其中添加 50% 燕麦全粉的杂粮米 eGI 值降低了 26.34%。此外，将裸燕麦米与粳米以 1∶2（质量比）复配，在 35 ℃恒温水浴锅中将米浸泡 30 min，按照米水比 1∶1（g/mL）在压力 0.05 MPa 的条件下蒸煮 8 min，可制得复水率为 2.20、糊化度为 91.2%、感官评分为 27.1 的裸燕麦复配方便米饭[12]。添加燕麦米 25%~35% 的米饭氨基酸评分高，口感好[13]。在不同全谷物和杂粮中，燕麦是公众认可度最高的谷物，其富含 β-葡聚糖和多种酚类等营养组分，且燕麦产品具有降低 2 型糖尿病、高血脂患病风险和改善肠道菌群的健康促进作用[14]。

总体上，从加工技术的角度来看，高温熟化的过程无疑能够起到杀菌的作用；相对于超高压和挤压加工等技术加热蒸煮作为传统东方食品的加工方法，在营养保留方面同样具有优势。然而，全谷物燕麦粗糙的口感与风味不佳影响了燕麦米的消费[15]，全谷燕麦米适度去皮是保留营养与改善口感的方法，前期研究发现，在水分含量 9%、润麦时长 180 min 时，采用 60#砂轮精米机对燕麦籽粒摩擦脱皮 20 s，此时燕麦脱皮率为 9.82%，显微镜观察到燕麦籽粒糊粉层保留较完整，得到的燕麦米营养组分含量高，且色泽均一，出米率高[16]。因此，本研究将自制燕麦米与大米混合，基于燕麦糊粉层的营养与燕麦特有风味，同时为了更好地保留营养与风味，采用冷冻干燥的方法在不加其他添加剂的基础上研发一种富含全谷燕麦米的方便米饭产品，以期为全谷物燕麦的加工以及促进其消费提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

全谷燕麦米（简称燕麦米）：按照参考文献[16]的方法进行制备；东北大米：市售；葡萄糖淀粉酶（酶活≥260 U/mL）：上海源叶生物科技有限公司；泡打粉：北京向阳食品添加剂有限公司；商品速食米（千石谷牌方便米饭）：山东省日照市莒县金穗工贸有限公司。

TGL-16M 高速离心机：上海卢湘仪离心机有限公司；TA-XT Plus 物性测试仪：英国 Stable Micro Systems 公司；HWS26 恒温水浴锅：上海一恒科学仪器有限公司；GR60DA 高压蒸汽灭菌锅：厦门致微仪器有限公司；BCD-551WKM 可调式电冰箱：合肥美的电冰箱有限公司；700 型 80 ℃超低温电冰箱：青岛海尔股份有限公司；JSM-6490 LV 扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）：日本 JoEL 公司；手动固相微萃取（solid-phase microextraction，SPME）进样器、D 二乙烯苯/碳/聚二甲基硅氧烷（DVB/CAR/PDMS）萃取头（50/30μm）：美国 Supelco 公司；7890GC/5975C 气相色谱-质谱联用（gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）仪：美国 Agilent 公司；顶空瓶萃取装置：郑州轻工业大学食品营养与安全创新实验室自制。

1.2 方法

1.2.1 全谷燕麦米和大米混合米饭制备条件的筛选

1.2.1.1 燕麦米与大米浸泡条件的筛选

取一定量混合米（燕麦米质量分数为 30%，混合米初始水分含量为 12.2%），加两倍水分别于 25、30、35、40、45、50 ℃恒温水浴锅中浸泡，分别测定浸泡 10、20、30、40、50、60、70、80 min 时米粒的水分含量，重复 3 次，

取平均值，按公式(1)计算混合米吸水率(A,%)。

$$A = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

式中：W_1为吸水前的混合米质量，g；W_2为吸水后的混合米质量，g。

1.2.1.2 燕麦米占比筛选

在大米中按质量比(0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、100%)掺入燕麦米，添加两倍水在25 ℃下浸泡20 min后放入蒸锅中蒸22 min，冷却后进行混合米饭质构测定和感官评价。

1.2.1.3 燕麦米与大米混合米饭蒸煮米水比筛选

取一定量混合米(燕麦米占比为30%)，分别按米水比1∶1.0、1∶1.5、1∶2.0、1∶2.5、1∶3.0 (g/mL)于25 ℃下浸泡20 min，然后放入蒸锅中蒸22 min，研究不同的米水比对混合米饭品质的影响。

1.2.2 燕麦米与大米混合米饭质构测试

采用全质构分析(texture profile analysis，TPA)模式对混合米饭进行质构分析。设定参数为P/36 R探头、测前速度0.5 mm/s、测试速度0.5 mm/s、测后速度1.0 mm/s、下压变形60%、触发力值3.0 g。将处理好的米饭样品趁热快速均匀地装入到大小一样的圆柱形小铝盒中，保证燕麦米分布均匀，上表面平坦，内部疏松一致，整个测定过程在1 h内完成。每个样品重复3次测定。

1.2.3 燕麦米与大米混合米饭的感官评价

参考文献[17]并略作修改，参照GB/T 15682—2008《粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》附录B的评分规则，由10名食品专业相关人员组成评定小组(5名女性和5名男性)，从香气、外观、色泽、适口性和滋味5个方面对混合米饭进行评价，每个方面各占20分。

1.2.4 冻干速食混合米饭的复水性能

1.2.4.1 泡打粉添加、烹饪温度和冷冻温度对混合米饭冻干后复水性能的影响

将混合米按照燕麦米占比30%、米水比1∶1.5 (g/mL)的配方进行制备，在不含或含有0.5%泡打粉的溶液室温浸泡40 min后100 ℃或120 ℃蒸煮22 min，降温后沥干，在-20 ℃和-80 ℃冷冻24 h后进行复水性能测试。

1.2.4.2 冻干速食混合米饭复水性能测试

将混合米饭样品按不同工艺条件进行预处理：分别添加0%和0.5%的泡打粉，于100 ℃和120 ℃下蒸煮，随后分别在-20 ℃和-80 ℃下冷冻，再经冷冻干燥。取冷冻干燥后的速食混合米饭样品浸入2倍量的煮沸蒸馏水中，保持恒温，于2、4、6、8 min取出样品，将水沥干至恒重。采用再水化度表示米饭复水性能，再水化度即米饭再水化后样品的质量与冷冻干燥后脱水样品的质量之比。

1.2.5 冻干速食混合米饭扫描电子显微镜观察

将冻干后速食混合米饭中大米和燕麦籽粒沿着中线切断，横截面向固定在贴有双面导电胶的SEM样品台上，通过离子溅射在样品上喷金后，用扫描电子显微镜观察形态结构。扫描电子显微镜工作条件：高压10 kV，束流5×10^{-9} mA，工作距离15 mm。

1.2.6 冻干速食混合米饭挥发性风味物质的检测

采用包覆30/50 μm DVB/CAR/PDMS的SPME纤维对米饭挥发性物质进行提取和浓缩。将10 g冻干米饭和20 mL煮沸蒸馏水加入50 mL顶空小瓶中进行补水；对于新鲜混合米饭，取30 g样品(按含水量相同折算)加入顶空瓶中，样品密封10 min达到平衡后将SPME注射器插入顶空瓶并保留1 h以收集挥发性风味，整个提取过程在100 ℃下进行。采用GC-MS仪，DB-5色谱柱(30 m×0.25 mm，0.25 μm)。SPME纤维在260 ℃的气相色谱-质谱仪进样口热解吸5 min，不分流进样。为分离分析物，在40 ℃程序升温2 min，以2 ℃/min的速度升温至150 ℃，再以2 ℃/min的速度升温至250 ℃，20 min后保持3 min。载气为氦气，以1 mL/min的线速度输送。质量选择检测器工作在70 eV和260 ℃的电子冲击电离模式下，扫描范围为m/z 40~650。采用峰面积归一化法计算不同化合物相对含量。

1.2.7 冻干速食混合米饭、新鲜混合米饭与商品速食米饭的营养组成分析

淀粉含量采用美国官方分析化学家协会(Association of Official Analytical Chemists，AOAC)2002.02方法测定；蛋白质含量采用GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法测定；β-葡聚糖含量采用AOAC 995.16方法测定；总膳食纤维含量采用AOAC 985.29方法测定。总酚含量和总黄酮含量分别参照文献[18-19]所述方法测定。

1.3 数据处理

所有试验重复3次，使用SPSS 27软件进行数据分析，结果以平均值±标准差表示，试验数据采用Origin 2021进行绘图。

2 结果与分析

2.1 全谷燕麦米和大米混合米饭制备条件的筛选结果

2.1.1 混合米饭浸泡工艺

不同浸泡时间和浸泡温度对混合米吸水率的影响见图1。

由图1可知，不同浸泡温度下，混合米的吸水率和最大吸水量差别较大。浸泡温度越高，混合米吸水越快，达到饱和用时越短，且吸水率越高，但是所需要的能量较多。浸泡温度在25、30、35、40、45、50 ℃下，混合米吸水达到饱和所需时间分别为80、70、65、60、55、50 min左右。不同浸泡温度下的混合米最大吸水率分

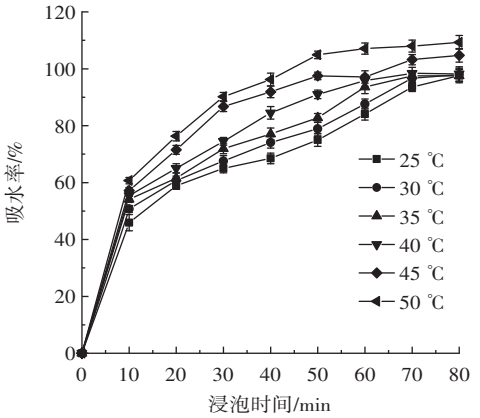


图 1　浸泡条件对混合米吸水率的影响

Fig.1　Influence of soaking conditions on water absorption of composite rice

别是 97.6%、97.9%、97.5%、98.2%、104.7% 和 109.3%。浸泡时间延长不能增加混合米吸水率，反而会使混合米饭变软、易碎，造成营养损失。综合考虑温度升高、时间延长混合米饭营养成分的流失、米粒易碎及能量消耗等问题，确定最佳浸泡温度为 25~40 ℃、浸泡时间为 20~30 min。

2.1.2　混合米饭中燕麦米和大米比例

燕麦米添加对混合米饭质构特性的影响结果如表 1。

由表 1 可知，燕麦米占比对混合米饭质构特性有显著影响。随着燕麦米占比的增加，混合米饭的硬度、弹性、黏度升高，黏着力和恢复力总体下降，咀嚼性呈波动变化，其中燕麦米占比为 30% 时咀嚼性最高。这是由于混合米饭中燕麦占比的增大，使其所含

表 1　不同燕麦米占比对混合米饭质构特性的影响

Table 1　Effects of different proportions of oat rice on texture characteristics of composite rice

燕麦米占比/%	硬度/g	弹性	黏着力/N	咀嚼性/g	恢复力/N	黏度/(mPa·s)
0	1 934.769±144.564^{f}	0.706±0.007^{f}	0.312±0.011^{b}	933.641±77.281^{e}	0.067±0.002^{a}	360.030±70.709^{g}
10	2 798.156±134.321^{e}	0.718±0.011^{ef}	0.331±0.009^{a}	1 140.672±58.605^{cd}	0.068±0.001^{a}	1 650.510±55.630^{f}
20	3 089.612±110.767^{d}	0.724±0.009^{e}	0.299±0.015^{b}	1 102.240±124.880^{cd}	0.053±0.001^{b}	1 849.450±127.104^{e}
30	3 475.050±123.423^{c}	0.758±0.009^{d}	0.276±0.010^{c}	1 374.876±93.495^{a}	0.052±0.002^{bc}	2 195.990±74.496^{d}
40	3 609.159±136.505^{c}	0.806±0.011^{d}	0.240±0.010^{d}	1 022.059±87.208^{de}	0.049±0.001^{cd}	2 396.200±76.491^{c}
50	4 171.975±99.762^{b}	0.875±0.012^{c}	0.225±0.008^{de}	1 216.091±72.265^{bc}	0.047±0.001^{d}	2 734.150±110.068^{b}
60	4 255.481±109.504^{b}	0.934±0.009^{b}	0.207±0.011^{e}	1 131.731±60.710^{cd}	0.035±0.003^{e}	2 866.130±126.414^{b}
100	5 487.152±165.339^{a}	0.997±0.009^{a}	0.177±0.012^{f}	1 321.191±95.505^{ab}	0.026±0.003^{f}	3 900.120±99.357^{a}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

膳食纤维的比例相应增大[20]，Gondal 等[21]报道糙米的硬度与咀嚼性太高会导致总体接受性较差，而糙米的硬度与麸皮层所含的膳食纤维有关。米饭的黏度与淀粉的糊化和回升特性有关[22]，淀粉占大米干重的比例高达 90%，因此燕麦米占比的增大会导致混合米饭淀粉比例降低从而导致黏度降低，但食用品质较高的大米往往有较高的黏度。硬度与黏度是影响米饭接受度和口感的两个重要因素[23]，燕麦米占比 30% 时，适中的硬度与黏度有利于提高混合米饭的食用品质。

对不同燕麦米占比的混合米饭进行感官评价，结果如图 2。

由图 2 可知，燕麦米占比为 10%~50% 时米饭香气均衡，燕麦米占比 60% 的米饭和 100% 的纯燕麦米饭均有较重的燕麦特有香气，掩盖了米饭原有的气味。外观上，燕麦米混合米饭膨胀充分，颗粒较丰满，少数米粒炸裂，总体得分接近。色泽上，燕麦米占比 60% 和纯燕麦米饭的颜色较暗，纯大米饭和燕麦米占比较低的混合米饭颜色光亮、均匀。适口性结果显示，燕麦

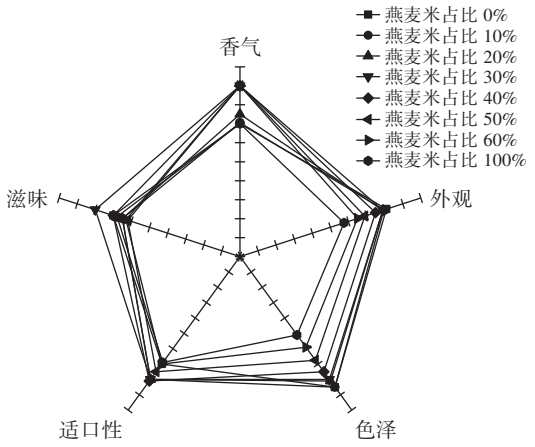


图 2　不同燕麦米占比的混合米饭感官评价

Fig.2　Sensory evaluation of composite rice with different ratios of oat rice

米占比少的米饭软硬适中，稍粘牙，燕麦米占比多的米饭爽滑，弹性较好，有嚼劲，纯燕麦米饭稍硬，并且口感稍有发涩，得分最低。滋味上，纯大米饭滋味醇正，散发出大米特有的清香，燕麦米占比低的混合米饭香气

较为复杂，而纯燕麦米饭有较浓烈的燕麦特殊香气，得分不如燕麦米占比低的混合米饭。总体上，纯大米饭以及燕麦米占比较低的混合米饭更易被品评人员所接受，得分较高。最终，结合混合米饭的质构特性，燕麦米占比为 30% 时较为适宜。

2.1.3 混合米饭加工米水比

混合米饭加工的米水比对米饭质构特性和感官评分的影响见表 2 和图 3。

表 2 不同米水比对混合米饭质构特性的影响

Table 2 Effects of different rice to water ratios on texture characteristics of composite rice

米水比/(g/mL)	硬度/g	弹性	黏着力/N	咀嚼性/g	恢复力/N	黏度/(mPa·s)
1∶1.0	10 418.08±142.50[a]	0.845±0.014[b]	0.383±0.032[a]	3 367.39±230.50[a]	0.152±0.016[a]	327.77±66.50[e]
1∶1.5	5 584.89±97.15[b]	0.834±0.021[b]	0.346±0.024[a]	1 600.26±153.51[b]	0.114±0.023[b]	877.01±53.50[d]
1∶2.0	3 876.30±124.45[c]	0.944±0.023[a]	0.268±0.021[b]	1 070.18±118.27[c]	0.068±0.012[c]	1 486.17±76.51[c]
1∶2.5	3 357.79±110.51[d]	0.935±0.019[a]	0.265±0.017[b]	688.81±165.49[d]	0.045±0.009[cd]	1 935.39±69.50[b]
1∶3.0	2 595.21±90.50[e]	0.582±0.032[c]	0.219±0.011[c]	404.30±123.51[d]	0.031±0.011[d]	3 355.23±110.51[a]

注：同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

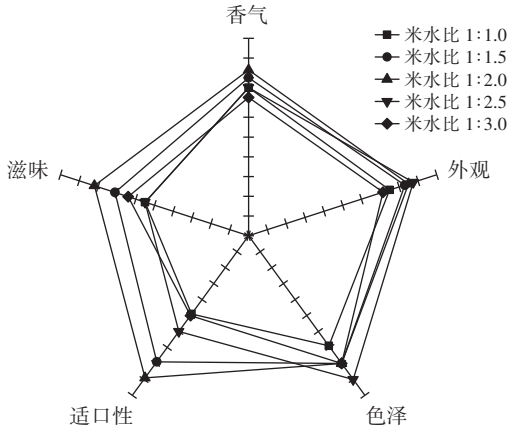


图 3 不同米水比蒸制混合米饭的感官评价

Fig.3 Sensory evaluation of composite rice steamed with different rice to water ratios

由表 2 可知，米饭的硬度、咀嚼性、恢复力随着米水比的增加而明显降低，黏度逐渐升高，而弹性却是先升高后降低。米水比为 1∶1.0 (g/mL)时米饭的硬度最高(10 418.08 g)，大约是米水比 1∶1.5 (g/mL)时的两倍，不利于咀嚼。由图 3 可知，从米饭感官品质影响来看，米水比对外观的影响不大，香气、适口性和滋味均随米水比的增加先增加后减小，其中米水比 1∶1.0 (g/mL)时感官得分最低，米水比为 1∶1.5 (g/mL)时的感官得分最高。综合米水比对质构特性及感官特性的结果，米水比为 1∶1.5 (g/mL)时，蒸制出来的混合米饭品质最高，口感最佳，也更利于消化吸收。因此在米水比为 1∶1.5 (g/mL)条件下可制得感官与质构特性较好的新鲜全谷燕麦米与大米的混合米饭。

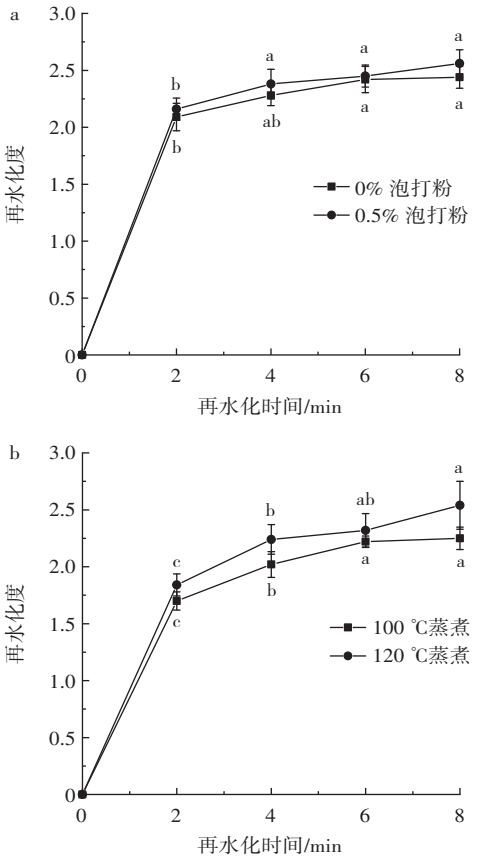
综合以上结果可知，混合米饭浸泡温度为 25~40 ℃，浸泡时间为 20~30 min，混合米营养成分保留较高，燕麦米占比 30%、米水比 1∶1.5 (g/mL)时，混合米饭质地适中，口感最佳，具有燕麦米的特别香气。

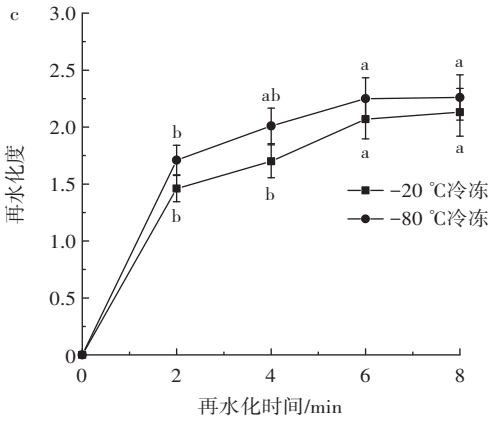
2.2 全谷燕麦米和大米冻干速食混合米饭复水性能和微观结构

2.2.1 冻干速食混合米饭复水性能

泡打粉添加量、蒸煮温度和冷冻温度对冻干速食混合米饭复水性能(再水化度)的影响见图 4。

如图 4 所示，泡打粉对复水性能(再水化度)有促进作用。随着再水化时间的延长，两组(泡打粉添加量 0% 和 0.5%)的再水化度均显著升高，并在 4 min 后趋于平稳。再水化时间为 8 min 时，添加 0.5% 泡打粉浸





a. 泡打粉添加量；b. 蒸煮温度；c. 冷冻温度。相同处理下不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

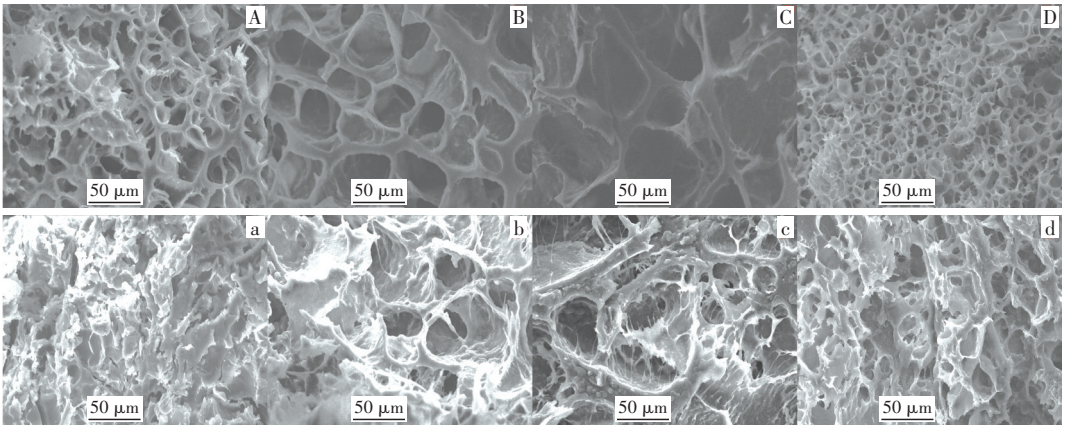
图 4　不同因素对冻干速食混合米饭复水性能的影响

Fig. 4　Effects of different factors on rehydration performance of freeze-dried instant mixed rice

泡米饭的再水化度高于纯水浸泡的米饭（图 4a）。这些结果与前人的研究结果一致，泡打粉可以促进谷物膨胀，从而改善复水性能[24]。蒸煮温度也会影响再水化度，在 120 ℃条件下煮熟的冻干速食混合米饭，再水化度最快，在 4 min 左右达到平衡。在 100 ℃条件下煮熟的速食混合米饭，再水化时间约为 6 min。此外，120 ℃下蒸煮的产物再水化度最终达到了比 100 ℃下蒸煮的产物更高的值（图 4b）。冷冻温度是影响冻干速食米饭复水化的重要因素。将搅拌好的大米分成两份，分别在−20 ℃和−80 ℃冷冻 24 h。由图 4c 可知，在最初的 2 min 内，两者再水化度均较快，但随后再水化度的增加速度减慢，这可能是由于冷冻干燥过程中混合米饭结构孔隙的不同所致[25]。在复水过程结束时，−20 ℃冷冻的冻干速食混合米饭再水化度高于−80 ℃冷冻。

2.2.2　泡打粉添加量、蒸煮温度和冷冻温度对冻干速食混合米饭微观结构的影响

泡打粉添加量、蒸煮温度和冷冻温度对冻干速食混合米饭微观结构的影响见图 5。



A、a. −20 ℃冷冻的大米与燕麦；B、b. 100 ℃蒸煮 0.5% 泡打粉的大米与燕麦；C、c. 120 ℃蒸煮的大米与燕麦；D、d. −80 ℃冷冻的大米与燕麦。

图 5　大米与燕麦不同方式处理的微观结构

Fig.5　Microstructure of rice and oat treated in different ways

由图 5A 可知，大米中的孔洞相互连接，形成复杂的网络结构，其孔隙的形成与内部淀粉的收缩和水分膨胀蒸发的干燥过程有关[26]。相比之下，在经冷冻处理的−20 ℃大米中很少观察到孔隙（图 5a）。然而，在 0.5% 泡打粉中浸泡后，大米中的孔隙明显变大且更加均匀（图 5B），燕麦出现了新的孔隙（图 5b）。结果表明，泡打粉对大米和燕麦孔隙膨大均有促进作用。与 100 ℃下煮熟的大米或燕麦相比，120 ℃下煮熟的大米或燕麦的孔隙更大，网状结构更明显（图 5C 和图 5c），这可能与大米淀粉的膨胀和糊化有关[27]。同时，考虑烹饪的能量和成本，100 ℃作为烹饪温度比较合适。与上述结果一致，SEM 显示−80 ℃冷冻后的大米断面孔隙更小、更集中，而−20 ℃冷冻后的混合大米在脱水过程中孔隙更大，更容易吸收水分。虽然在−80 ℃下处理的燕麦-大米中形成了一些网络结构（图 5D 和图 5d），但由于其在混合物中的比例较小，并没有显著改善冻干速食混合米的网络结构。

2.3　冻干速食混合米饭、新鲜混合米饭与商品速食米饭的挥发性风味物质比较

在煮熟的米饭中发现了数百种挥发性风味物质，主要包括醛、醇、酯、酮、酚、吡咯和吡嗪等，其中，2-乙酰基-1-吡咯啉（2-acetyl-1-pyrroline，2-AP）被认为是香米中的关键气味剂[28]。对上述自制冻干速食米饭、新鲜自制混合米饭与市售米饭进行风味成分研究，结果见表 3。

由表 3 可知，在商品速食米饭中检测出 25 种挥发

表 3　3 种米饭挥发性风味物质的组成

Table 3　Compositions of flavor volatiles of three types of rice

序号	保留时间/min	化合物	化学式	相对含量/%		
				冻干速食混合米饭	商品速食米饭	新鲜混合米饭
1	14.445	己醛	$C_6H_{12}O$	25.20±2.05	18.02±0.79	6.11±0.04
2	21.680	庚醛	$C_7H_{14}O$	1.56±0.07	-	-
3	26.066	反-2-庚烯醛	$C_7H_{12}O$	1.46±0.10	-	-
4	26.701	苯甲醛	C_7H_6O	-	2.71±0.03	-
5	28.565	2-戊基呋喃	$C_9H_{14}O$	14.41±0.85	6.97±0.46	25.95±1.03
6	29.698	辛醛	$C_8H_{16}O$	4.19±0.06	2.87±0.24	1.97±0.15
7	30.322	壬醛	$C_9H_{18}O$	-	6.33±0.14	-
8	31.900	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	C_9H_{16}	0.95±0.02	-	-
9	32.464	3-辛烯-2-酮	$C_8H_{14}O$	0.96±0.09	-	-
10	34.126	反-2-辛烯醛	$C_8H_{14}O$	3.92±0.07	2.51±0.25	-
11	36.613	2,2-三亚甲基二-1,3-二噁戊环	$C_9H_{16}O_4$	-	2.08±0.01	-
12	37.705	壬醛	$C_9H_{18}O$	8.92±0.15	13.41±0.52	9.54±0.43
13	41.925	顺-2-壬烯醛	$C_9H_{16}O$	1.51±0.14	3.02±0.21	-
14	42.697	癸醛	$C_{10}H_{20}O$	-	1.21±0.01	-
15	43.973	萘	$C_{10}H_8$	0.33±0.03	-	0.72±0.01
16	44.133	2-庚基呋喃	$C_{11}H_{18}O$	0.55±0.02	-	1.59±0.15
17	44.145	2-甲氧基乙基乙烯基醚	$C_5H_{10}O_2$	-	0.84±0.01	-
18	45.267	癸醛	$C_{10}H_{20}O$	1.07±0.10	1.82±0.13	0.97±0.01
19	46.145	反,反-2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	1.38±0.11	-	-
20	47.831	顺-2-癸烯醛	$C_{10}H_{18}O$	-	6.07±0.60	-
21	49.380	2-环己烯-1-醇	$C_6H_{10}O$	4.94±0.11	2.30±0.13	1.42±0.02
22	51.695	反式-2,4-癸二烯醛	$C_{10}H_{16}O$	0.65±0.01	-	-
24	53.238	4-仲丁基苯酚	$C_{10}H_{14}O$	1.36±0.01	-	-
25	53.374	反式-2,4-癸二烯醛	$C_{10}H_{16}O$	4.19±0.20	-	2.02±0.03
26	54.906	2-己基环戊酮	$C_{11}H_{20}O$	0.72±0.03	-	-
27	55.137	顺式香芹醇	$C_{10}H_{16}O$	0.32±0.01	-	-
28	55.767	2-十一烯醛	$C_{11}H_{20}O$	-	9.06±0.11	-
29	56.372	十二醇	$C_{12}H_{26}O$	4.03±0.03	-	-
30	56.692	2-丁基-辛烯醛	$C_{12}H_{22}O$	2.53±0.12	3.47±0.15	-
31	58.467	十四烷	$C_{14}H_{30}$	-	-	0.90±0.08
32	61.559	香叶基丙酮	$C_{13}H_{22}O$	0.36±0.01	2.40±0.11	1.10±0.09
33	62.782	反-2-戊烯酸乙酯	$C_7H_{12}O_2$	0.54±0.01	-	-
34	63.767	十五烯	$C_{15}H_{30}$	-	-	0.98±0.04
35	64.129	十五烷	$C_{15}H_{32}$	0.36±0.03	1.42±0.03	2.83±0.12
36	66.717	2-乙基萘	$C_{12}H_{12}$	0.42±0.02	-	-
37	66.782	2,4-二氯-b-硝基苯乙烯	$C_8H_5Cl_2NO_2$	0.49±0.05	-	1.35±0.02
38	67.061	2-甲基二六烷	$C_{17}H_{36}$	0.18±0.01	-	0.57±0.05
39	67.732	2,2,4-三甲基-3-羧异丙基-戊酸异丁酯	$C_{10}H_{19}N$	0.27±0.02	1.28±0.09	-
40	68.141	十六烷	$C_{16}H_{34}$	0.98±0.07	5.94±0.35	5.67±0.53
41	68.326	戊乙二醇	$C_{10}H_{22}O_6$	-	1.07±0.07	-
42	68.955	柏木脑	$C_{15}H_{26}O$	0.64±0.01	-	2.62±0.25
43	69.661	5-丙基十三烷	$C_{16}H_{34}$	-	-	3.67±0.27
44	69.679	四十四烷	$C_{44}H_{90}$	0.72±0.02	-	-
45	70.219	2-甲基十六烷	$C_{17}H_{36}$	0.78±0.02	-	1.74±0.01
46	71.305	十七烷	$C_{17}H_{36}$	-	-	11.08±0.51
47	71.329	2-十五烷酮	$C_{15}H_{30}O$	2.27±0.00	1.60±0.12	-
48	71.816	正十五碳醛	$C_{15}H_{30}O$	-	0.52±0.01	-
49	72.468	二十烷	$C_{20}H_{42}$	-	-	0.59±0.01
50	73.252	3-甲基十七烷	$C_{18}H_{38}$	-	-	0.45±0.02
51	74.000	十八烷	$C_{18}H_{38}$	0.30±0.03	-	1.71±0.17
52	74.136	2,6,10-三甲基十四烷	$C_{20}H_{42}$	0.49±0.04	-	2.13±0.09
53	75.056	6,10,14-三甲基-2-十五烷酮	$C_{18}H_{36}O$	0.43±0.02	-	1.17±0.05

续表 3　3 种米饭挥发性风味物质的组成

Continue table 3　Compositions of flavor volatiles of three types of rice

序号	保留时间/min	化合物	化学式	相对含量/%		
				冻干速食混合米饭	商品速食米饭	新鲜混合米饭
54	76.356	二十烷	$C_{20}H_{42}$	-	-	0.73±0.04
55	76.718	香叶基香叶醇	$C_{20}H_{34}O$	0.41±0.00	-	-
57	76.944	棕榈酸甲酯	$C_{17}H_{34}O_2$	0.16±0.02	-	0.49±0.04
58	78.374	棕榈酸乙酯	$C_{18}H_{36}O_2$	-	-	0.66±0.06
59	78.552	顺-9-十八烯醛	$C_{18}H_{34}O$	-	0.68±0.03	-
60	78.991	单油酸甘油酯	$C_{21}H_{40}O_4$	-	-	4.19±0.23
61	80.511	二十一烷	$C_{21}H_{44}$	1.13±0.02	-	0.43±0.01
62	80.541	10-十八烯酸甲酯	$C_{19}H_{36}O_2$	-	2.39±0.00	-

注：-表示未检出。

性风味物质。其中，醛类化合物所占比例最大（71.70%），其次是杂环化合物（9.05%）和烷烃（7.36%）。酮类、醇类和酯类的比例在 3%~4% 之间。其中，己醛含量最高，占商品速食米饭挥发性风味物质总量的 18.02%。新鲜混合米饭中检测出 30 种挥发性风味物质，其中烷烃含量最高（32.5%），杂环化合物次之（27.54%），醛类含量最高（20.61%）。然而，酯类、醇类、酮类和烯烃的含量相对较少，均不超过 6%。其中，2-戊基呋喃占比最高，占新鲜混合米饭挥发性风味物质的 25.95%。与上述米饭相比，冻干速食混合米饭含有 40 种挥发性成分。经统计分析，其主要芳香成分为醛类（56.58%）、杂环类（14.96%）和醇类（10.34%）。烷烃、酮类、酯类和烯烃的比例相对较低，在 0.70%~4.97% 之间。与商品速食米饭相似，己醛含量最高（25.2%），2-戊基呋喃含量次之（14.41%）。商品速食米饭中芳香成分的浓度最低，而冻干速食混合米饭中芳香成分的浓度最高，这可能与燕麦中的芳香成分有关[29]。冻干速食混合米饭的芳香成分含量高于新鲜混合米饭，说明冷冻干燥技术有利于提高燕麦和大米的香气。此外，冻干速食混合米饭和新鲜混合米饭中均存在 21 种挥发性风味物质。而冻干速食混合米饭与商品速食米饭的共同挥发性风味物质只有 13 种。据推测，3 种米饭在芳香成分方面的巨大差异是由于燕麦的添加和生产技术的不同导致。

2.4　冻干速食混合米饭、新鲜混合米饭与商品速食米饭的营养组成分析

为了比较冻干速食混合米饭、新鲜混合米饭与商品速食米饭在营养组成方面的差异，表 4 列出了三者的主要营养成分含量。

表 4　4 种米饭的营养成分

Table 4　Nutritional compositions of four types of rice

米饭种类	蛋白质含量/%	β-葡聚糖含量/%	膳食纤维含量/%	总酚含量/(mg/g)	总黄酮含量/(mg/g)
燕麦米饭	15.30±0.20[a]	4.47±0.07[a]	15.24±0.08[a]	0.97±0.02[a]	5.17±0.25[a]
冻干速食混合米饭	10.07±0.13[b]	1.43±0.05[b]	10.48±0.15[c]	0.37±0.03[b]	1.01±0.07[c]
新鲜混合米饭	9.95±0.15[b]	1.39±0.04[b]	11.20±0.23[b]	0.39±0.04[b]	1.40±0.08[b]
商品速食米饭	8.40±0.09[c]	-	7.48±0.11[d]	0.22±0.02[d]	0.81±0.06[c]

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）；-表示未检出。

营养价值是评价米饭品质的关键因素之一，由表 4 可知，商品速食米饭中几种营养成分的含量远远低于本试验的冻干速食混合米饭，特别是 β-葡聚糖在冻干速食混合米饭中含量为 1.43%，而在商品速食米饭中几乎不存在。而燕麦富含蛋白质、维生素和矿物质，含有高价值的蛋白质和脂质，以及均衡的必需氨基酸，如赖氨酸和 β-葡聚糖[30]。新鲜混合米饭和冻干速食混合米饭的蛋白质和 β-葡聚糖含量变化不大。然而，冻干速食混合米饭中总膳食纤维的含量（10.48%）略低于新鲜混合米饭（11.20%）。冻干速食混合米饭中总酚和总黄酮的含量分别为 0.37 mg/g 和 1.01 mg/g，略低于新鲜混合米饭。结果表明，冻干过程对抗氧化剂和膳食纤维造成了损失，但对蛋白质和 β-葡聚糖含量影响不明显。因此，尽管冻干速食混合米饭在膳食纤维和抗氧化成分上略有降低，但其蛋白质和 β-葡聚糖保留良好，且营养价值显著优于商品速食米饭，同时兼具便携、方便的特点，更符合现代消费者的需求。

3　结论

本研究讨论了冻干速食混合米饭的加工工艺，并确定了最佳加工工艺为浸泡温度 25~40 ℃、浸泡时间 20~30 min、燕麦米占比 30%、米水比 1∶1.5（g/mL）、蒸

煮时间 22 min，此工艺蒸制的米饭含有燕麦的香味且口感好，具有较高的营养价值，并证明了添加 0.5% 泡打粉、120 ℃蒸煮、-20 ℃冷冻的加工工艺可以通过改变燕麦和大米的微观结构来改善复水性能。冻干速食混合米饭的芳香成分丰富度高于新鲜混合米饭和商品速食米饭，其营养价值也远高于商品速食米饭，与新鲜混合米饭相比则差异不大。但由于方便米饭中含有较多的淀粉、蛋白质、脂质等成分，在贮藏过程中淀粉、蛋白质、脂质等成分的变化会影响方便米饭的性能、风味及营养特性，未来需要展开更多关于方便米饭贮藏特性的研究。另外，方便米饭中的燕麦米含有 β-葡聚糖以及多种酚类，这些成分可能会影响血糖生成指数，未来也需要开展对于方便米饭消化特性的研究。本文研发出营养价值更丰富、风味更佳的方便米饭，市场前景广阔，为燕麦及方便米饭的研究提供参考。

参考文献：

[1] 田晓红, 姜平, 谭斌, 等 . 方便米饭加工技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 54-60.
TIAN Xiaohong, JIANG Ping, TAN Bin, et al. Research progress on the processing technology of instant rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 54-60.

[2] 路乐乐, 沈琴, 郎双静, 等 . 加工精度对稻花香品质及方便米饭理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 220-227.
LU Lele, SHEN Qin, LANG Shuangjing, et al. Effect of degree of milling on the quality of Daohuaxiang rice and physicochemical properties of instant rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 220-227.

[3] 张晓绘 . 即食米饭的加工和贮藏特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
ZHANG Xiaohui. Study on the processing and storage characteristics of instant rice[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.

[4] LIVESEY G, TAYLOR R, LIVESEY H F, et al. Dietary glycemic index and load and the risk of type 2 diabetes: A systematic review and updated meta-analyses of prospective cohort studies[J]. Nutrients, 2019, 11(6): 1436.

[5] 罗霜霜, 张星灿, 杨健, 等 . 高抗性淀粉大米对方便米饭品质及 GI 值的影响研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 99-106.
LUO Shuangshuang, ZHANG Xingcan, YANG Jian, et al. Research on the effects of high-resistant starch rice to the quality and GI of instant rice products[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(5): 99-106.

[6] 李齐菲 . 富纤维方便米饭对健康成人与 2 型糖尿病患者糖脂代谢及血糖波动性影响的研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2021.
LI Qifei. The study of fiber-rich instant rice′s effect on glycolipid metabolism and glucose fluctuation of healthy adults and type 2 diabetes patients[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2021.

[7] 朱佳妮, 钟毓, 朱林, 等 . 低升糖方便米饭配方优化及其 GI 值测定[J]. 食品与发酵科技, 2024, 60(3): 21-28, 41.
ZHU Jiani, ZHONG Yu, ZHU Lin, et al. Formula optimization of low glycemic index instant rice and determination of GI value[J]. Sichuan Food and Fermentation, 2024, 60(3): 21-28, 41.

[8] KASHINO I, EGUCHI M, MIKI T, et al. Prospective association between whole grain consumption and hypertension: The furukawa nutrition and health study[J]. Nutrients, 2020, 12(4): 902.

[9] 谭月园 . 方便藜麦饭加工工艺及品质研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
TAN Yueyuan. Study on the processing technology and quality evaluation of convenient quinoa rice[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.

[10] 邹秀容, 朱建华, 刘晓环 . 高粱方便米饭浸泡工艺的优化[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 19-23.
ZOU Xiurong, ZHU Jianhua, LIU Xiaohuan. Optimization of presoaking process for sorghum instant rice[J]. The Food Industry, 2018, 39(1): 19-23.

[11] 路欣, 孟婷婷, 周柏玲, 等 . 挤压熟化杂粮米的营养成分及体外消化特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(22): 40-46.
LU Xin, MENG Tingting, ZHOU Bailing, et al. Nutrient composition and *in vitro* digestion characteristics of multigrain rice and millet processed by extrusion cooking[J]. Food Research and Development, 2024, 45(22): 40-46.

[12] 刘韫瑜, 张美莉, 冯志宽 . 湿热处理对裸燕麦复配米方便米饭品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(1): 35-39.
LIU Yunyu, ZHANG Meili, FENG Zhikuan. Effect of heat-moisture treatment on quality of naked oats/short grain rice matching instant rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(1): 35-39.

[13] 许阳, 胡新中, 张恒, 等 . 燕麦米-大米混配米饭的营养及食用品质评价[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(11): 14-18.
XU Yang, HU Xinzhong, ZHANG Heng, et al. Nutrition and eating quality evaluation of mixed rice of oat-rice and rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(11): 14-18.

[14] ZHU Y Y, DONG L E, HUANG L, et al. Effects of oat β-glucan, oat resistant starch, and the whole oat flour on insulin resistance, inflammation, and gut microbiota in high-fat-diet-induced type 2 diabetic rats[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 69: 103939.

[15] 杨书林, 伞惟琳, 任晨刚, 等 . 全谷物风味、口感及货架期提升关键技术研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2022(4): 3-6.
YANG Shulin, SAN Weilin, REN Chengang, et al. Research progress on key technologies for improving flavor, taste and shelf life of whole grains[J]. Cereal & Feed Industry, 2022(4): 3-6.

[16] 申瑞玲, 杨溢, 董吉林 . 燕麦脱皮加工工艺研究[J]. 轻工学报, 2017, 32(2): 13-19.
SHEN Ruiling, YANG Yi, DONG Jilin. Study on the dehulling processing technology of oat[J]. Journal of Light Industry, 2017, 32(2): 13-19.

[17] 李磊, 肖建文, 张俊霞, 等 . 不同温度条件下优质大米新鲜度、外观品质与食用品质变化的研究[J]. 粮油仓储科技通讯, 2023, 39(5): 43-46.
LI Lei, XIAO Jianwen, ZHANG Junxia, et al. Study on the changes of freshness, appearance quality and edible quality of high-quality rice at different temperatures[J]. Liangyou Cangchu Keji Tongxun, 2023, 39(5): 43-46.

[18] MEHMOOD A, ZHAO L, ISHAQ M, et al. Optimization of total phenolic contents, antioxidant, and *in-vitro* xanthine oxidase inhibitory activity of sunflower head[J]. CyTA-Journal of Food, 2018, 16(1): 957-964.

[19] COBALEDA-VELASCO M, ALMARAZ-ABARCA N, ALANIS-BAÑUELOS R E, et al. Rapid determination of phenolics, flavonoids, and antioxidant properties of *Physalis ixocarpa* brot. ex hornem. and *Physalis angulata* L. by infrared spectroscopy and partial least squares[J]. Analytical Letters, 2018, 51(4): 523-536.

（下转第 209 页）

2023(3): 24-30.

[52] 杨约萍, 俞佳琦, 臧立铮, 等 . 肉桂精油对嗜冷假单胞菌(*Pseudomonas psychrophila*)的抑菌及群体感应介导的致腐表型抑制作用[J/OL]. 食品工业科技, 2026, 1-15(2026-03-27) [2026-04-18]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306. 2025110235.
YANG Yueping, YU Jiaqi, ZANG Lizheng, et al. Antibacterial effect of cinnamon essential oil on *Pseudomonas psychrophila* and the quorum sensing mediated inhibition of its pathogenic phenotype[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 1-15(2026-03-27) [2026-04-18]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306. 2025110235.

[53] WANG Y, LI R, LU R, et al. Preparation of chitosan/corn starch/cinnamaldehyde films for strawberry preservation[J]. Foods, 2019, 8(9): 423.

[54] 夏南, 张颂, 黄荣, 等 . 桃胶多糖/壳聚糖/肉桂醛复合膜对圣女果保鲜效果的影响[J/OL]. 保鲜与加工, 2026, 1-15 (2026-04-15)[2026-04-18]. https://link.cnki.net/urlid/12.1330.S.20260415. 1027.002.
XIA Nan, ZHANG Song, HUANG Rong, et al. Effects of peach gum polysaccharide/chitosan/cinnamaldehyde composite films on the preservation of cherry tomatoes[J/OL]. Storage and Process, 2026, 1-15(2026-04-15) [2026-04-18]. https://link.cnki.net/urlid/12.1330.S.20260415.1027.002.

[55] ZHOU T X, WANG H L, HAN Q, et al. Fabrication and characterization of an alginate-based film incorporated with cinnamaldehyde for fruit preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 274: 133398.

[56] YE H Q, ZHOU X B, MAO S, et al. Sustained-release composite films incorporated with cinnamon essential oil: Characterization, release kinetics and application for cherry tomato preservation[J]. Journal of Food Engineering, 2025, 388: 112356.

[57] HOU F Y, CHEN X X, YI F X, et al. Antibacterial and antibiofilm properties of cinnamon essential oil on *Pseudomonas tolaasii* and application of potato starch/CEO active pads in preservation of mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. Food Control, 2024, 165: 110705.

[58] 余春平, 许春芳 . 肉桂酸钾在萝卜干中的应用研究[J]. 农产品加工, 2023(22): 13-15, 20.
YU Chunping, XU Chunfang. Study on application of potassium cinnamate in dried radish[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2023(22): 13-15, 20.

[59] 黄端颖, 郑建仙 . 负载肉桂酸@介孔二氧化硅双层复合膜的制备及其在蓝莓保鲜中的应用[J/OL]. 食品科学, 2026, 1-14 (2026-02-03) [2026-04-18]. https://link. cnki. net/urlid/11.2206. ts. 20260203.1326.020.
HUANG Duanying, ZHENG Jianxian. Preparation of double-layered films loaded with cinnamic acid@mesoporous silica and its application in blueberry preservation[J/OL]. Food Science, 2026, 1-14 (2026-02-03) [2026-04-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.2206.ts.20260203.1326.020.

加工编辑:张岩蔚
收稿日期:2026-04-27

(上接第 173 页)

[20] WATTANAVANITCHAKORN S, WANSUKSRI R, CHAICHOOMPU E, et al. Dietary fibre impacts the texture of cooked whole grain rice[J]. Foods, 2023, 12(4): 899.

[21] GONDAL T A, KEAST R S J, SHELLIE R A, et al. Consumer acceptance of brown and white rice varieties[J]. Foods, 2021, 10(8): 1950.

[22] ZHANG Y, LI F, HUANG K, et al. Structural changes of starch under different milling degrees affect the cooking and textural properties of rice[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100627.

[23] TAO K Y, YU W W, PRAKASH S, et al. High-amylose rice: Starch molecular structural features controlling cooked rice texture and preference[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 219: 251-260.

[24] LASUNON P, PHONKERD N, PARIWAT S, et al. Effect of soaking conditions and fuzzy analytical method for producing the quick-cooking black jasmine rice[J]. Molecules, 2022, 27(11): 3615.

[25] FU T T, NIU L Y, WU L Y, et al. The improved rehydration property, flavor characteristics and nutritional quality of freeze-dried instant rice supplemented with tea powder products[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 141: 110932.

[26] ZHANG J Y, ZHAO F F, LI C M, et al. Acceleration mechanism of the rehydration process of dried rice noodles by the porous structure[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137050.

[27] HA M, JEONG H Y, LIM S T, et al. The cooking method features controlling eating quality of cooked rice: An explanation from the view of starch structure in leachate and morphological characteristics[J]. Food Research International, 2022, 162: 111980.

[28] VERMA D K, SRIVASTAV P P. Extraction, identification and quantification methods of rice aroma compounds with emphasis on 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) and its relationship with rice quality: A comprehensive review[J]. Food Reviews International, 2022, 38(2): 111-162.

[29] MCGORRIN R J. Key aroma compounds in oats and oat cereals[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(50): 13778-13789.

[30] KIM I S, HWANG C W, YANG W S, et al. Multiple antioxidative and bioactive molecules of oats (*Avena sativa* L.) in human health[J]. Antioxidants, 2021, 10(9): 1454.

加工编辑:张岩蔚
收稿日期:2025-06-27