DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.03.008
赵晨旭, 綦文涛, 宋歌, 等. 5 种杂粮对馒头血糖生成指数及食用品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(3): 94-101.
ZHAO C X, QI W T, SONG G, et al. Effects of five coarse cereals on glycemic index and edible quality of steamed bread[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(3): 94-101.

5 种杂粮对馒头血糖生成指数及食用品质的影响

赵晨旭[1,2]，綦文涛[2]，宋　歌[2]，洪　宇[2]，方　微[2]，黄铮昱[1]，王　勇[2]✉

（1. 中南林业科技大学 食品科学与工程学院，
稻谷及副产物深加工国家工程研究中心，湖南 长沙 410004；
2. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食品质营养研究所，北京 100037）

摘　要：为分析藜麦、青稞、黑米、黑小麦和燕麦 5 种杂粮对馒头的血糖生成指数（GI）及品质的影响。将 5 种杂粮以 10%、20%、30%、40%和 50%的比例添加到馒头中，通过 GI20 体外模拟消化系统测定馒头 GI 值，分析杂粮添加量对馒头感官评分、色泽和质构等品质相关指标的影响。结果表明与对照相比，随着杂粮添加比例的增加，馒头 GI 值逐渐降低，感官品质下降，感官评分降低，内部结构逐渐粗糙，硬度升高，亮度下降。藜麦、青稞、黑米、黑小麦和燕麦 5 种杂粮在感官评分大于 75 分的条件下，在富强粉中可以添加的最高比例分别为 10%、40%、30%、60%和 30%，相应 GI 值分别为 79.94、67.49、72.45、69.61 和 74.52。40%青稞粉替代小麦粉制作的杂粮馒头，GI 值最低，具有最佳降糖潜力，膳食纤维含量最高，且感官品质较好。本研究为具有血糖调控能力的杂粮馒头开发提供了参考。

关键词：杂粮馒头；青稞；低血糖生成指数；品质评价

中图分类号：TS213.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1007-7561(2025)03-0094-08

网络首发时间：2025-04-11 10:00:34

网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250411.0937.002

Effects of Five Coarse Cereals on Glycemic Index and Edible Quality of Steamed Bread

ZHAO Chen-xu[1,2], QI Wen-tao[2], SONG Ge[2], HONG Yu[2], FANG Wei[2], HUANG Zheng-yu[1], WANG Yong[2]✉

(1. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, National Engineering Research Center for Rice and Byproduct Deep Processing, Changsha, Hunan 410004, China;
2. Institute of Grain Quality and Nutrition Research, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

收稿日期：2024-08-06；**修回日期：**2024-09-29；**录用日期：**2024-10-09

基金项目：全国粮食和物资储备青年拔尖人才项目“谷物功能因子调节糖脂代谢机制研究及应用”（QN2022401）

Supported by: Youth Talent Support Program by the National Food and Strategic Reserves Administration “Mechanism Research and Application of Cereal Functional Factors Regulating Glucose and Lipid Metabolism” (No. QN2022401)

第一作者：赵晨旭，男，2000 年出生，在读硕士生，研究方向为粮油营养与健康，E-mail: 1193821830@qq.com

通信作者：王勇，男，1987 年出生，博士，副研究员，研究方向为粮油营养与健康，E-mail: wangy@ags.ac.cn

Abstract: To analyze the effects of five kinds of coarse cereals, namely quinoa, highland barley, black rice, triticale and oat, on the glycemic index (GI) and quality of steamed bread. The 5 kinds of coarse cereals were incorporated to steamed bread at proportions of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%. The GI values of the steamed bread were measured through a GI20 automatic *in vitro* simulated digestion system. The effects of the coarse cereals on the sensory score, color, texture and other quality related indicators of steamed bread were analyzed. Compared with ordinary steamed bread made from regular wheat flour, with increasing proportions of coarse cereals, the GI value of steamed bread gradually decreased. The sensory quality declined, with lower sensory scores, the internal structure gradually became rough, the hardness increased and the brightness decreased. Under the condition that the sensory score was greater than 75 points, the maximum permissible addition proportions for quinoa, highland barley, black rice, triticale and oat were 10%, 40%, 30%, 60% and 30%, respectively, and the corresponding GI values were 79.94, 67.49, 72.45, 69.61 and 74.52, respectively. The coarse cereal steamed bread made with 40% highland barley flour substitution had the lowest GI value, the best hypoglycemic potential, the highest dietary fiber content, and good sensory quality. This study provides a reference for the development of coarse cereal steamed bread with blood glycemic regulation ability.

Key words: coarse cereals steamed bread; highland barley; low glycemic index; quality evaluation

近年来，国内外市场对营养、健康、便捷杂粮食品的需求日益升高。馒头作为中国的传统主食深受欢迎，但传统馒头的血糖生成指数（Glycemic index，GI）值较高，且加工过于精细化，膳食纤维等功能活性物质大量流失，不适合高血糖患者、糖尿病患者等特殊人群的长期食用，因此，在保证品质的同时通过添加一定量的特定杂粮从而降低馒头 GI 值成为解决这一问题的有效途径[1]。目前市场已有多种杂粮馒头，但由于添加的杂粮种类和品种不同，添加方式和添加量各异，因此其效果差异较大，口感各异，尚未有比较常见杂粮在不同添加比例下对馒头 GI 值和品质影响的系统研究。

基于人体或动物的体内检测方法，具有过程复杂、个体差异大、成本高、涉及伦理问题等缺点，难以进行多种类、不同添加量杂粮馒头GI 值的系统分析[2]。本研究采用的 GI20 体外模拟消化系统，减少了人为操作带来的误差，能更加精准反应馒头的体外消化情况及 GI 值。本研究针对患高血糖或糖尿病等人群的营养需求，聚焦中国传统主食馒头的改良，通过对比分析不同比例藜麦、青稞、黑米、黑小麦、燕麦对馒头 GI 值和品质的影响，筛选出最具有降糖潜力的杂粮和适宜的添加比例，为具有血糖调控功能馒头的开发提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

富强粉：北京古船食品有限公司；藜麦：冀藜 3 号，沽源县北麦生态农业有限公司；青稞：藏青 320，西藏擦曲商贸有限公司；黑米：黑优 1 号，恩施市硒方生态农业有限公司；黑小麦：马兰黑小麦 1 号，河北大地种业有限公司；燕麦：坝莜 1 号，张家口强浩农业开发有限公司；酵母：安琪酵母股份有限公司；唾液 α-淀粉酶、胃蛋白酶、胰酶混合液、淀粉葡糖苷酶：Sigma 公司；冰醋酸、碳酸氢钠、氯化钾、氯化钙、氯化镁：麦克林公司。

1.2 仪器与设备

超微粉碎机（UCM-300）：潍坊贝威粉体设备有限公司；恒温恒湿箱：北京东方孚德公司；CR-400 型色彩色差计：日本美能达（Minolta）公司；电动锯齿切片机：美国 Applica Consumer Products 公司；TA-XT2i 物性仪：英国 SMS 公司；电磁炉：广州美的公司；GI20 体外模拟消化系统：澳大利亚 NutraScan 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 馒头的制作

参照国标 GB/T35991—2018《粮油检验 小麦

粉馒头加工品质评价》进行馒头的制作。

用天平称量制好的馒头质量，用体积仪测量馒头体积，按下式计算比容 λ，单位为毫升/克（mL/g）：

$$\lambda=\frac{V}{M} \quad \text{式（1）}$$

式中，V–馒头体积，单位为毫升（mL）；M–馒头质量，单位为克（g）。

1.3.2 馒头的感官评价

参照国标 GB/T35991—2018 设计适合于杂粮馒头品质评价的评分表，见表 1 所示。其中感官评分越高，消费者对馒头的消费意愿越高，当感官评分小于 75 分时，被认为不被消费者接受。

1.3.3 馒头色泽品质的测定

采用日本美能达 CR-400 色彩色差计测定，采用 $L^*a^*b^*$色空间法，其中 L^*表示样品颜色的亮度；a^*、b^*是色方向，其中+a^*为红色方向、–a^*为绿色方向、+b^*为黄色方向、–b^*为蓝色方向。馒头在室温下冷却 90 min 后，测定馒头表面 L^*、a^*、b^*值，重复 3 次。

表 1 杂粮馒头感官评分表

Table 1 Sensory evaluation of coarse cereal steamed bread

评价指标（分）	得分标准
比容（20）	比容≥2.0 得满分，每下降 0.1，扣 1 分
弹性（10）	手指按压回弹性好：8~10 分；手指按压回弹弱：6~7 分；手指按压不回弹或按压困难：4~5 分
表面状态（10）	光泽性好 8~10 分；稍暗 6~7 分；灰暗 4~5 分
内部结构（20）	气孔细腻均匀：18~20 分；气孔细腻基本均匀，有个别气泡：13~17 分，边缘与表皮有分离现象，扣 1 分；气孔基本均匀，但有下列情况之一的：10~12 分，过于细密，有稍多气泡，气孔均匀但结构稍显粗糙；气孔不均匀或结构很粗糙：5~9 分
韧性（10）	咬劲强：8~10 分；咬劲一般：6~7 分；咬劲差，切时掉渣或咀嚼干硬：4~5 分
粘性（10）	爽口不粘牙 8~10 分；稍粘：6~7 分；咀嚼不爽口，很粘 4~5 分
食味（20）	香味浓郁正常，可接受：16~20 分；能闻到杂粮香味但滋味平淡：13~15 分；除杂粮香味外能感到轻微不愉悦味道：10~12 分；无杂粮香味，且味道难以接受：1~9 分

1.3.4 馒头质构特性的测定

馒头在室温下冷却 2 h 后，用电动锯齿切片机将馒头切成 20 mm 厚的馒头片，对其进行压后复原性（压力松弛）测试。测试模式：compression，测前速度：5.00 mm/s，测试速度：1.7 mm/s，测后速度：5.00 mm/s，压缩比：50%，停留时间：4 s，触发力：5 g。每个样品重复 4 次，得到的特征参数为：硬度和衰减比率。

1.3.5 馒头水分的测定

参照国标 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行馒头中水分的测定。

1.3.6 馒头灰分的测定

参照国标 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》进行馒头中灰分的测定。

1.3.7 馒头粗脂肪的测定

参照国标 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》进行馒头中粗脂肪的测定。

1.3.8 馒头粗蛋白的测定

参照国标 GB/T 31578—2015《粮油检验 粮食及制品中粗蛋白测定 杜马斯燃烧法》进行馒头中粗蛋白的测定。

1.3.9 馒头 GI 值的测定

使用带有 GI 检测功能的体外模拟消化系统（NutriScan GI20）对样品（重复样品）进行体外消化，以确定产生的葡萄糖量。在 37 ℃条件下，将含 50 mg 碳水化合物的样品转移到 NutriScan GI20 的样品杯中，在样品杯中添加一个转子。分别在第 0、5、35 min 依次向每个样品杯中加入 3 种酶溶液，即 2 mL α-淀粉酶溶液、5 mL 胃蛋白酶溶液和 5 mL 胰蛋白酶和淀粉葡萄糖苷酶溶液。样品在 NutriScan GI20 体外模拟消化系统中进行消化，并利用内置的葡萄糖分析仪记录葡萄糖释放情况。消化结束后，按以下公式计算样品的 GI 值。

$$GI=\frac{C*V}{M}*100 \quad \text{式（2）}$$

式中，*C*-样品杯中葡萄糖浓度，单位为毫克每分升（mg/dL），*V*-样品杯中剩余溶液体积，单位为毫升（mL），*M*-样品中可利用葡萄糖的量，单位为毫克（mg）。

可利用碳水化合物含量通过差减法计算[3]，即可利用碳水化合物含量=100–水分含量–蛋白质含量–脂肪含量–灰分含量 *L*–膳食纤维含量。可利用葡萄糖的量=可利用碳水化合物含量/0.9。

对难以被消费者接受，即感官评分低于 75 分的杂粮馒头，不进行 GI 值的检测。

1.3.10　馒头中膳食纤维含量的测定

参照国标 GB 5009.88—2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》进行馒头中膳食纤维含量的测定。

1.3.11　馒头中总酚含量的测定

总酚含量采用福林酚法测定[4]。没食子酸标准曲线为：$y = 20.35x+0.088\ 9$，$R^2=0.998\ 8$。式中 *y* 为吸光度，*x* 为没食子酸浓度（mg/mL）。称取 1 g 样品于 50 mL 离心管中，加入 25 mL 60%乙醇混匀，于 50 ℃超声提取 1 h，再以 8 000 r/min 离心 10 min。取 200 μL 样品提取液，加入 200 μL 福林酚摇匀后静置 3 min，然后加入质量分数为 15% 的 Na_2CO_3 溶液 200 μL，在 25 ℃避光条件下静置反应 30 min，然后于 10 000 r/min 下离心 10 min。取上清液，测定波长 760 nm 处的吸光度，再依据标准曲线计算总酚含量（mg GAE/g）。

1.4　数据处理

实验中每个指标测定 3 次，用 Excel 2021 软件进行数据处理，用 SPSS16.0 软件进行显著性方差分析，实验结果以平均值±标准偏差表示，以 $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。

2　结果与分析

2.1　藜麦对馒头 GI 值和食用品质的影响

由表 2 可知，随着藜麦添加量的提高，馒头的感官评分下降，比容减小，硬度提高，亮度下降。由图 1 可知，藜麦粉的添加对馒头外观影响较低，馒头内部气孔较为均匀，随着添加量的增加，馒头 L^*值逐渐降低，亮度下降，b^*逐渐增大，颜色偏黄，这可能是由于藜麦粉中多酚和灰分的含量较高[5]。藜麦在 20%添加量时馒头感官评分已低于 75 分，难以被消费者接受。对感官评分超过 75 分的藜麦馒头进行 GI 值检测。结果表明，添加 10%藜麦的馒头 GI 值为 79.94。

表 2　藜麦对馒头 GI 值和食用品质的影响

Table 2　Effects of quinoa on GI value and edible quality of steamed bread

藜麦添加量/%	感官评分	GI 值	比容/（mL/g）	质构		色泽		
				硬度/N	衰减比率/%	L^*	a^*	b^*
0	90±0.00^{d}	81.76±0.97^{a}	2.29±0.03^{e}	32.22±0.53^{a}	27.99±0.39^{a}	89.54±0.41^{f}	–1.03±0.13^{a}	12.48±0.82^{a}
10	80±3.46^{c}	79.94±0.65^{a}	1.96±0.02^{d}	49.06±1.18^{b}	34.36±0.54^{bc}	83.18±0.73^{e}	–0.71±0.14^{b}	18.15±0.30^{b}
20	74±3.51^{b}	—	1.91±0.02^{d}	57.49±3.14^{c}	34.02±2.18^{bc}	80.93±1.06^{d}	–0.38±0.15^{c}	19.71±1.02^{c}
30	71±2.00^{b}	—	1.75±0.04^{c}	70.51±5.91^{d}	35.46±0.91^{c}	76.74±0.63^{c}	0.23±0.09^{d}	23.19±0.79^{e}
40	62±2.00^{a}	—	1.62±0.06^{b}	77.52±5.92^{e}	33.02±1.14^{b}	75.18±0.94^{b}	1.51±0.12^{e}	21.41±1.21^{d}
50	58±1.00^{a}	—	1.51±0.04^{a}	90.71±5.01^{f}	33.57±0.94^{b}	72.35±1.11^{a}	1.87±0.30^{f}	22.15±0.60^{de}

注：同列不同小写字母代表差异性显著（$P<0.05$），后同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$), the same as below.

图 1　不同添加量藜麦对馒头外观和内部组织的影响

Fig.1　Influence of different quinoa additions on the appearance and internal structure of steamed bread

2.2　青稞对馒头 GI 值和食用品质的影响

由表 3 可知，随着青稞粉添加量的提高，馒头感官评分逐渐下降，比容降低，硬度提高，亮度下降。青稞馒头比容的降低和硬度的提高，可能由于青稞粉的加入稀释了馒头中面筋蛋白的含量，膳食纤维对起发过程中气孔壁的破坏，导致

气孔内部储气能力降低、体积减小。由图 2 可知，青稞粉的加入，使馒头在表面结构及色泽上出现较大差异，L^*值逐渐降低，a^*和 b^*值逐渐升高，可能是由于青稞粉中富含膳食纤维及其籽粒含有有色物质所导致[6]，同时馒头出现较大气孔且分布不均。在青稞粉添加量达 50%时，馒头比容显著下降，色泽暗沉，硬度显著提高，感官评分低于 75 分，已不易被消费者接受。对感官评分超过 75 分的青稞馒头进行 GI 值检测，随着青稞添加量的提高，馒头 GI 值逐渐降低。40%青稞馒头的 GI 值为 67.49，与普通馒头相比，下降了 17.45%。

表 3　青稞对馒头 GI 值和食用品质的影响

Table 3　Effects of highland barley on GI value and edible quality of steamed bread

青稞添加量/%	感官评分	GI 值	比容/（mL/g）	质构		色泽		
				硬度/N	衰减比率/%	L^*	a^*	b^*
0	90±0.00^{d}	81.76±0.97^{e}	2.29±0.03^{d}	32.22±0.53^{a}	27.99±0.39^{ab}	89.54±0.41^{f}	–1.03±0.13^{a}	12.48±0.82^{a}
10	83±2.52^{c}	79.27±0.42^{d}	2.13±0.04^{c}	32.35±0.42^{ab}	28.66±1.23^{bc}	83.55±0.94^{e}	–0.13±0.26^{b}	14.39±1.20^{b}
20	81±1.00^{c}	75.11±0.47^{c}	2.12±0.02^{c}	33.57±0.30^{ab}	27.00±1.23^{a}	79.22±0.20^{d}	0.69±0.24^{c}	16.99±0.18^{c}
30	79±0.58^{bc}	71.23±0.09^{b}	2.09±0.06^{c}	34.09±0.06^{b}	28.75±0.61^{bc}	76.86±0.49^{c}	1.62±0.26^{d}	18.81±0.48^{d}
40	75±3.51^{b}	67.49±1.05^{a}	1.87±0.02^{b}	36.49±1.40^{c}	27.79±0.47^{ab}	74.19±0.69^{b}	2.45±0.24^{e}	20.22±0.53^{e}
50	68±4.36^{a}	—	1.69±0.06^{a}	39.38±0.85^{d}	29.79±1.52^{c}	71.26±0.22^{a}	3.30±0.25^{f}	22.09±0.54^{f}

图 2　不同添加量青稞对馒头外观和内部组织的影响

Fig.2　Influence of different highland barley additions on the appearance and internal structure of steamed bread

2.3　黑米对馒头 GI 值和食用品质的影响

由表 4 可知，随着黑米添加量的升高，馒头感官评分逐渐下降，比容降低，馒头醒发程度变差，硬度显著提高。黑米馒头的 L^*值显著低于小麦粉馒头，馒头亮度降低（图 3）。黑米粉添加量达到 40%时，馒头品质较差，感官评分低于 75 分。对于感官评分超过 75 分的黑米馒头进行 GI 值检测。如表 4 所示，随着黑米添加量的提高，馒头 GI 值逐渐下降，30%黑米馒头的 GI 值为 72.45，与普通馒头相比，下降了 11.39%。

2.4　黑小麦对馒头 GI 值和食用品质的影响

由表 5 可知，随着黑小麦添加量的升高，馒头感官评分同样逐渐下降，比容逐渐降低，硬度逐渐增加。随着黑小麦添加量的升高，L^*值逐渐下降，a^*和 b^*值逐渐提高，亮度下降，表皮出现皱缩（图 4）。对感官评分超过 75 分的黑小麦馒头进行 GI 值检测，随着黑小麦添加量的升高，馒头 GI 值逐渐降低，60%黑小麦馒头的 GI 值为 69.61，与普通馒头相比，降低了 14.86%。

表 4　黑米对馒头 GI 值和食用品质的影响

Table 4　Effects of black rice on GI value and edible quality of steamed bread

黑米添加量/%	感官评分	GI 值	比容/（mL/g）	质构		色泽		
				硬度/N）	衰减比率/%	L^*	a^*	b^*
0	90±0.00^{d}	81.76±0.97^{c}	2.29±0.03^{e}	32.22±0.53^{a}	27.99±0.39^{a}	89.54±0.41^{f}	–1.03±0.13^{a}	12.48±0.82^{f}
10	82±3.21^{c}	75.41±0.53^{b}	1.75±0.03^{d}	56.51±1.34^{b}	36.10±1.56^{b}	53.34±1.71^{e}	10.98±0.39^{b}	6.09±0.18^{e}
20	79±2.00^{c}	72.96±0.65^{a}	1.61±0.02^{c}	62.54±2.94^{c}	39.08±1.63^{c}	40.70±1.24^{d}	14.31±0.13^{d}	5.39±0.14^{d}
30	76±3.79^{c}	72.45±0.19^{a}	1.61±0.03^{c}	65.29±3.86^{c}	38.70±0.69^{c}	33.32±1.24^{c}	14.26±0.43^{d}	4.46±0.53^{c}
40	72±3.06^{b}	—	1.57±0.01^{b}	70.68±3.65^{d}	37.39±0.87^{bc}	29.02±0.18^{b}	11.62±0.27^{bc}	2.69±0.22^{b}
50	60±5.13^{a}	—	1.36±0.02^{a}	71.11±3.80^{d}	37.87±1.17^{bc}	26.57±0.25^{a}	11.54±0.72^{bc}	1.62±0.33^{a}

表 5 黑小麦对馒头 GI 值和食用品质的影响

Table 5 Effects of triticale on GI value and edible quality of steamed bread

黑小麦添加量/%	感官评分	GI 值	比容/（mL/g）	质构		色泽		
				硬度/N	衰减比率/%	L^*	a^*	b^*
0	90±0.00^{e}	81.76±0.97^{d}	2.29±0.03^{d}	32.22±0.53^{a}	27.99±0.39^{a}	89.54±0.41^{h}	–1.03±0.13^{a}	12.48±0.82^{a}
10	84±1.00^{d}	73.50±0.48^{c}	2.09±0.01^{c}	38.34±0.12^{b}	30.88±0.24^{c}	79.52±0.74^{g}	2.67±0.63^{b}	14.32±0.54^{b}
20	83±2.00^{cd}	72.21±0.30^{c}	2.08±0.12^{bc}	39.54±0.15^{b}	28.29±0.64^{a}	72.14±0.61^{f}	4.96±0.73^{c}	16.88±0.35^{c}
30	81±1.00^{bcd}	71.96±0.17^{bc}	2.07±0.01^{bc}	42.06±1.70^{c}	28.18±0.66^{a}	69.45±0.46^{e}	6.11±0.68^{c}	17.50±0.66^{c}
40	81±1.73^{bcd}	70.76±0.61^{ab}	2.05±0.03^{bc}	46.10±0.32^{d}	27.79±0.30^{a}	64.34±1.27^{d}	8.84±1.31^{d}	17.91±0.89^{c}
50	80±1.73^{bc}	70.12±0.57^{a}	1.99±0.04^{b}	47.92±0.09^{e}	29.54±0.90^{b}	61.21±0.62^{c}	9.32±1.38^{de}	19.75±0.94^{d}
60	79±2.08^{b}	69.61±0.77^{a}	1.99±0.03^{b}	53.27±0.88^{f}	29.88±0.68^{bc}	58.06±0.37^{b}	10.72±1.38^{ef}	19.39±0.45^{d}
70	74±3.61^{a}	—	1.81±0.07^{a}	63.69±0.23^{g}	30.09±1.27^{bc}	54.26±0.27^{a}	11.57±1.29^{f}	19.88±0.74^{d}

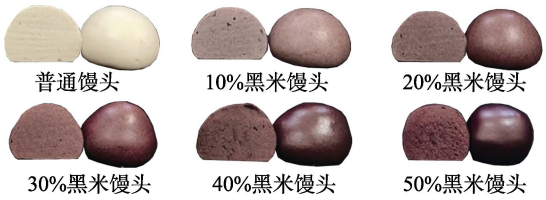

图 3 不同添加量黑米对馒头外观和内部组织的影响

Fig.3 Influence of different black rice additions on the appearance and internal structure of steamed bread

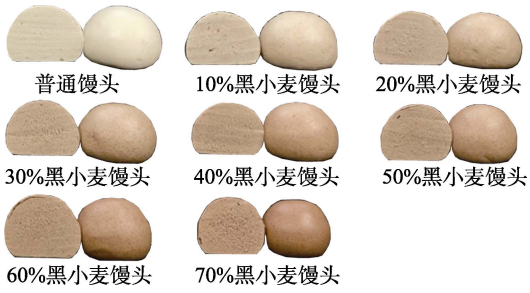

图 4 不同添加量黑小麦对馒头外观和内部组织的影响

Fig.4 Influence of different triticale additions on the appearance and internal structure of steamed bread

2.5 燕麦对馒头 GI 值和食用品质的影响

由表 6 可知，随着燕麦添加量的提高，馒头食用品质逐渐下降，感官评分下降，比容降低，硬度提高，亮度下降。燕麦添加量提高后馒头 a^* 和 b^*值增大，馒头表皮与内部结构出现分离（图 5）。当燕麦添加量达到 40%时，感官评分低于 75 分。对感官评分大于 75 分的燕麦馒头进行 GI 值检测。如表 6 所示，随着燕麦添加量提高，馒头 GI 值逐渐降低，在 30%添加量时，馒头 GI 值降低至 74.52。

2.6 杂粮馒头中膳食纤维含量

在 5 种杂粮最适添加量的条件下，不同杂粮馒头的膳食纤维含量如表 7 所示。与普通馒头相比，杂粮的添加均显著提高了馒头中膳食纤维的含量。其中 40%青稞馒头膳食纤维含量最高（6.89%），显著高于其他杂粮馒头。

2.7 杂粮馒头中总酚含量

不同杂粮馒头中总酚含量如表 8 所示，与普通馒头相比，杂粮添加均提高了馒头中总酚的含量，其中 30%黑米馒头中总酚含量最高，为 0.93 mg GAE/g，其次为 40%青稞馒头。

表 6 燕麦对馒头 GI 值和食用品质的影响

Table 6 Effects of oat on GI value and edible quality of steamed bread

燕麦添加量/%	感官评分	GI 值	比容/（mL/g）	质构		色泽		
				硬度/N	衰减比率/%	L^*	a^*	b^*
0	90.00±0.00^{e}	81.76±0.97^{c}	2.29±0.03^{d}	32.22±0.53^{a}	27.99±0.39^{a}	89.54±0.41^{f}	–1.03±0.13^{a}	12.48±0.82^{a}
10	84.00±1.00^{d}	78.08±0.96^{b}	2.13±0.06^{c}	30.50±0.41^{a}	32.63±1.35^{b}	82.44±0.43^{e}	0.40±0.29^{b}	14.09±0.94^{ab}
20	81.33±2.31^{cd}	77.88±1.01^{b}	2.09±0.07^{bc}	40.41±0.57^{b}	33.72±0.60^{bc}	80.01±0.86^{d}	1.45±0.10^{c}	15.56±0.52^{bc}
30	78.00±3.00^{bc}	74.52±1.88^{a}	2.06±0.04^{abc}	42.81±1.09^{c}	34.60±0.90^{c}	75.46±0.56^{c}	2.50±0.13^{d}	16.69±1.49^{cd}
40	74.33±2.31^{b}	—	2.05±0.05^{ab}	48.79±1.05^{d}	33.99±0.39^{bc}	72.27±0.34^{b}	3.57±0.11^{e}	18.03±1.71^{de}
50	69.00±1.73^{a}	—	2.01±0.04^{a}	54.91±1.12^{e}	33.89±1.93^{bc}	69.29±1.17^{a}	4.57±0.08^{f}	19.31±2.62^{e}

图 5　不同添加量燕麦对馒头外观和内部组织的影响

Fig.5　Influence of different oat additions on the appearance and internal structure of steamed bread

表 7　杂粮馒头中膳食纤维含量

Table 7　The dietary fiber content in coarse cereal steamed bread

馒头种类	膳食纤维含量/%
普通馒头	2.53±0.60^{a}
10%藜麦馒头	3.54±0.47^{b}
40%青稞馒头	6.89±0.05^{d}
30%黑米馒头	3.46±0.04^{b}
60%黑小麦馒头	5.55±0.10^{c}
30%燕麦馒头	4.26±0.24^{b}

表 8　杂粮馒头中总酚含量

Table 8　The total polyphenol content in coarse cereal steamed bread

馒头种类	总酚含量/（mg GAE/g）
普通馒头	0.17±0.01^{a}
10%藜麦馒头	0.24±0.03^{b}
40%青稞馒头	0.44±0.02^{d}
30%黑米馒头	0.93±0.01^{e}
60%黑小麦馒头	0.35±0.02^{c}
30%燕麦馒头	0.23±0.01^{b}

3　讨论

3.1　不同添加量杂粮对馒头食用品质的影响

本研究参照国标 GB/T 3391—2018 设计了适合杂粮馒头感官评价的评分表（表 1），其中感官评分越高，消费者对馒头的消费意愿越高。选择以 75 分的感官评分作为杂粮馒头品质与 GI 值的平衡参考值，用于兼顾馒头品质和其血糖调控能力。杂粮加入后馒头比容均降低、硬度提高。藜麦粉的加入不仅稀释了面团中小麦面筋蛋白的含量，且藜麦蛋白无法与小麦面筋蛋白形成稳定的网状结构，因此，藜麦粉与小麦粉的复配使面筋蛋白质量变差。此外，藜麦含有的多酚类物质和膳食纤维与面筋蛋白相互作用，与面筋蛋白竞争水分，进一步阻止面团面筋网络的形成[7]。由于青稞中富含的膳食纤维对面筋的疏解作用，使面团持气能力下降，导致馒头比容下降、硬度提高[8]。黑米中的蛋白质影响了馒头面筋蛋白的生成，同时黑米种皮中含有丰富的花色苷，导致黑米馒头的亮度显著下降，色泽暗沉[9]。燕麦中 β-葡聚糖吸水能力较强，面团吸水率升高，导致馒头的比容减小[10]。随着黑小麦添加量的提高，馒头感官评分逐渐下降，比容逐渐降低，硬度提高，但由于黑小麦面筋含量较高，对馒头面筋结构破坏相对较小，在添加量较高时，仍能保持较高的食用品质。

3.2　不同添加量杂粮对馒头 GI 值及功能活性成分的影响

本研究中藜麦、青稞、黑米、黑小麦和燕麦在感官评分大于 75 分时，可以添加的最高比例分别为 10%、40%、30%、60%和 30%，相应 GI 值分别为 79.94、67.49、72.45、69.61 和 74.52。青稞馒头的 GI 值最低，表明青稞最具有开发低 GI 馒头的潜力。目前有以动物和人为测定对象的 GI 值检测方法，具有费用高、周期长、过程复杂等缺点，而体外模拟消化测定方法具有操作简便、成本较低、周期短等优点。本研究通过采用 GI20 体外模拟消化系统进行 GI 值的测定，发现所有杂粮添加均不同程度降低了馒头的 GI 值。青稞富含 β-葡聚糖，增加了消化时馒头粘度，抑制了淀粉的水解[11]。燕麦与青稞类似，因含有丰富的 β-葡聚糖，对葡萄糖具有较好的吸附作用，延缓葡萄糖的扩散，降低机体对葡萄糖的吸收率，从而有效降低餐后血糖。黑小麦籽粒中膳食纤维含量高达 14.6%，蛋白质含量也高于普通小麦，高膳食纤维和高蛋白含量可以有效降低黑小麦的淀粉消化程度和消化速率，延缓餐后血糖水平的上升，降低黑小麦粉的 GI 值[12]。但也发现，5 种杂粮在满足感官评分条件下的 GI 值均未达到 55，即低 GI 食品要求。因此，需要进一步优化馒头配方，如添加膳食纤维和多酚等功能因子，旨在降低杂粮馒头 GI 值的同时提升其功能特性，以满足高血糖甚至糖尿病人群食用的需求。

杂粮在降低馒头 GI 值的同时，也提高了馒头的营养价值及功能因子的含量。青稞作为膳食纤

维的良好来源，对于提高馒头中膳食纤维含量效果最为显著，优于其他 4 种杂粮。粮添加均提高了馒头中多酚类物质的含量，其中黑米馒头中总酚含量最高，可能由于黑米表皮花色苷含量较高[13]。青稞作为川藏地区最具优势的特色原料作物，因其高蛋白、高纤维、低糖、低脂肪的特点，相继开发出多种青稞烘焙、发酵食品，而青稞馒头生产工艺简单，健康价值高，市场化前景广阔。

4 结论

青稞、燕麦和黑小麦的添加对馒头的感官品质影响较小，40%青稞粉添加量制作的杂粮馒头 GI 值最低，具有最佳降糖潜力，膳食纤维含量最高，且感官品质较好。藜麦添加导致馒头感官评分最低且降低 GI 值的效果不显著，黑米添加大幅提高了馒头的硬度。本研究为开发具有血糖调控功能的低 GI 杂粮馒头提供了数据支撑。

参考文献：

[1] 张三杉, 余梦玲, 雷激, 等. 低血糖生成指数杂粮馒头的研制[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 214-220.
ZHANG S S, YU M L, LEI J, et al. Preparation of low glycemic index multigrain steamed bun[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 214-220.

[2] 丛海花, 张紫薇, 宋雪琳, 等. 粮谷类低血糖生成指数食品研究进展[J].中国粮油学报, 2023, 38(9): 228-235.
CONG H H, ZHANG Z W, SONG X L, et al. Research progress of low glycemic index in cereals[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(9): 228-235.

[3] 张爱霞, 张佳丽, 赵巍, 等. 复配杂粮馒头营养分析及稳定人体血糖效果研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(5): 23-28+87.
ZHANG A X, ZHANG J L, ZHAO W, et al. Analysis of nutrition and blood glucose stability in Chinese people of steamed bread with compound flours[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(5): 23-28+87.

[4] SINGLETON V L, ROSSI J A. Colorimetry of total phenolics in grapes and wine with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1965, 16: 144-158.

[5] CANNAS M, PULINA S, CONTE P, et al. Effect of substitution of rice flour with quinoa flour on the chemical-physical, nutritional, volatile and sensory parameters of gluten-free ladyfinger biscuits[J]. Foods, 2020, 9(6): 808.

[6] 于利伟. 青稞-小麦复配粉的品质特性分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
YU L W. Quality characteristics of the supplementation flour comprising of hulless barley and wheat flour[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2022.

[7] 刘建垒, 张东, 王文娟, 等. 4 种颜色藜麦的营养价值比较[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 134-142.
LIU J L, ZHANG D, WANG W J, et al. Comparison of nutritional value of four kinds of quinoa[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 134-142.

[8] 阮雁春, 刘宁海, 王引兰. 青稞小麦混合粉面团特性及青稞馒头加工工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(3): 92-96.
RUAN Y C, LIU Y H, WANG Y L. Dough characteristics of highland barley composite flour and optimization of highland barley steamed bread processing[J]. Food Research and Development, 2021, 42(3): 92-96.

[9] 戚浩彧, 陈洁, 汪礼洋, 等. 黑米馒头特性的研究[J]. 河南工业大学学报, 2016, 37(2): 50-54.
QI H Y, CHEN J, WANG L Y, et al. The nutritional characteristics of black rice steam bread[J]. Journal of Henan University of Technology, 2016, 37(2): 50-54.

[10] 高晶晶, 李贞. 燕麦粉添加量对馒头营养特性及活性化合物的影响[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(9): 86-91.
GAO J J, LI Z. Effect of oat flour on nutritional characteristics and active compounds in steamed bread[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(9): 86-91.

[11] 张烁. β-葡聚糖酶对青稞面包品质和淀粉消化性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023.
ZHANG S. Effect of β-glucanase on the quality and starch digestion of highland barley bread[D]. Benjing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Thesis, 2023.

[12] DE MOURA F F, LEWIS K D, FALK M C. Applying the FDA definition of whole grains to the evidence for cardiovascular disease health claims[J]. The Journal of Nutrition, 2009, 139, 2220S-2226S.

[13] 李丰洲, 吴娜娜, 宋洪东, 等. 不同热加工方式对黑米多酚含量和结构影响研究进展[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(7): 198-205.
LI F Z, WU N N, SONG H D, et al. Research progress on nutritional components and functional characteristics of sprouted highland barley[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(7): 198-205.

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