DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260304001
**引用格式**: 潘美帆, 王世豪, 张怀霞, 等. 3 种常见谷物粥的品质特征及其血糖生成指数研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 59–68.
PAN MF, WANG SH, ZHANG HX, *et al*. Study on the quality characteristics and glycemic index of 3 kinds of common cereal porridges [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 59–68. (in Chinese with English abstract).

# 3 种常见谷物粥的品质特征及其血糖生成指数研究

潘美帆, 王世豪, 张怀霞, 逄蓓蕾, 刘孜橦, 徐立荣*, 马爱国

(青岛大学公共卫生学院, 青岛 266071)

**摘 要: 目的** 探究煮制时间对大米粥、小米粥、玉米粥 3 种常见谷物粥风味、质构特征的影响, 并比较不同谷物粥的血糖生成指数(glycemic index, GI)差异。**方法** 使用气相色谱-质谱联用仪和质构仪检测 3 种常见谷物粥在电饭煲煮制条件下的风味特征和质构特性, 进行人群试验检测谷物粥食用后的 GI, 并优化高 GI 粥品。**结果** 风味分析表明, 醛类和酯类是谷物粥重要的挥发性成分, 其中大米粥以壬醛、己醛的清香特征为主, 小米粥富含香草醛与十一醛, 玉米粥则富含庚酸甲酯等酯类的果香特征。质构分析发现 3 类谷物粥的硬度、均随煮制时间延长而下降, 其中玉米粥硬度最高, 大米粥最低。感官评价表明, 大米粥和小米粥在电饭煲煮 30 min 时综合评分最高, 玉米粥在 50 min 时综合评分最高。GI 检测显示, 大米粥为高 GI 食物, 小米粥为中 GI 食物, 玉米粥为低 GI 食物。以大米粥质量为基准,通过添加奶粉对高 GI 大米粥进行优化, 在大米粥中添加 13%奶粉改良的低 GI (41.1)大米奶粥比大米粥的 GI 下降了 47.4%。**结论** 合理控制煮制时间可优化谷物粥食用品质, 在谷物粥中添加奶制品能有效降低其 GI。本研究为居民日常粥类食物的选用以及日常控糖提供了简便的膳食改良方案。

**关键词:** 谷物粥; 风味; 质构; 煮制时间; 血糖生成指数

## Study on the quality characteristics and glycemic index of 3 kinds of common cereal porridges

PAN Mei-Fan, WANG Shi-Hao, ZHANG Huai-Xia, PANG Bei-Lei, LIU Zi-Tong, XU Li-Rong*, MA Ai-Guo

(*School of Public Health*, *Qingdao University*, *Qingdao* 266071, *China*)

**ABSTRACT: Objective** To explore the effects of cooking time on the flavor and texture characteristics of 3 kinds of common cereal porridges, namely rice porridge, millet porridge and maize porridge, and to compare the differences in glycemic index (GI) among different grain porridges. **Methods** The flavor and texture characteristics of the porridges cooked in a rice cooker were determined by gas chromatography-mass spectrometry and texture

**收稿日期:** 2026-03-04
**基金项目:** 山东省自然科学基金项目(ZR2024QC124); 山东省青年科技人才托举工程项目(SDAST2025 QTA083); 国家自然科学基金项目(32202083)
**第一作者:** 潘美帆(2000—), 女, 硕士, 主要研究方向为食品营养与健康。E-mail: mf15906@163.com
***通信作者:** 徐立荣(1991—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与健康。E-mail: lirongxu@qdu.edu.cn

analyzer. A human trial was conducted to measure the GI values of the porridges, and the high-GI porridge was further optimized. **Results** Flavor analysis revealed that aldehydes and esters were the dominant volatile compounds in the cereal porridges. Specifically, rice porridge was characterized by the fresh note of nonanal and hexanal, millet porridge was rich in vanillin and undecanal, while maize porridge exhibited a fruity note mainly from esters such as methyl heptanoate. Texture analysis showed that hardness of all 3 kinds of porridges decreased with prolonged cooking time, with maize porridge showing the highest hardness and rice porridge the lowest. Sensory evaluation indicated that rice and millet porridges cooked for 30 min achieved the highest overall scores, whereas maize porridge reached its optimum at 50 min. GI tests demonstrated that rice porridge was a high-GI food, millet porridge was a medium-GI food, and maize porridge was a low-GI food. Using rice porridge as the base, the formula was optimized by adding milk powder. The resulting low-GI (41.1) rice milk porridge with 13% milk powder showed a 47.4% reduction in GI compared with plain rice porridge. **Conclusion** Reasonable control of cooking time can optimize the eating quality of cereal porridges, and the addition of dairy products can effectively reduce their GI. This study provides a simple dietary improvement strategy for consumers to select daily porridges and manage glycemic control.

**KEY WORDS:** cereal porridge; flavor; texture; cooking time; glycemic index

## 0 引 言

粥类食品在我国传统饮食结构中占据重要地位，是居民日常膳食中最受欢迎的主食类别之一。粥类食物的风味与质构特征直接影响其整体食用体验以及消费者的喜好[1]。粥类食品以碳水化合物为主要营养成分，其摄入量与肥胖症、糖尿病等代谢性疾病发病风险密切相关，而血糖生成指数(glycemic index, GI)作为评估食物碳水化合物餐后血糖应答的关键指标，为探究膳食碳水化合物生理代谢特性及血糖调控关联提供了重要依据[2−3]。高 GI 值食物的摄入与糖尿病、肥胖、心血管疾病等慢性疾病的发病率相关已成为共识[4]。流行病学研究表明，我国成年人糖尿病患病率已达 11.2%，糖尿病前期人群比例更高达 35.2%，科学选择主食对血糖管理具有重要意义[5]。

近年来，国内外学者围绕谷物粥风味开展了系列研究。MI 等[6]研究了中国东北不同品种大米粥中挥发性化合物，EKPA 等[7]鉴定了 22 种传统及新育种玉米粥的挥发性特征，有研究基于气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography- ion mobility spectrometry, GC-IMS)技术分析不同电饭煲煮制小米粥中挥发性成分的差异[8]。然而上述研究主要集中于不同品种对单一粥品品质的影响，大米粥、小米粥和玉米粥是我国居民日常饮食的普遍选择，目前关于日常烹饪中蒸煮时长对这 3 种谷物粥风味特性及质构特征影响的研究相对不足，且大多数为商业速食粥品的灭菌、贮藏等的工艺优化，缺少对于居民日常蒸煮谷物粥的科学指导[9]。低 GI 食物在糖尿病控制中受到广泛关注是糖尿病预防及其患者进行日常膳食管理的较好选择[10−11]。诸多学者聚焦粥品 GI 优化开展研究，通过配方改良得到低 GI 有色米营养米粥[12]、杂粮粥[13]、黑小麦速食粥等产品[14]。目前研究多集中于通过改变配方或者杂粮配比来实现 GI 的降低，而针对家庭日常烹饪谷物粥的科学指导研究较为有限。此外，在现有粥品中添加乳蛋白等常见食材对 GI 的改良效果，尚缺乏系统的人群试验验证。因此，本研究使用日常生活中常用的电饭煲来研究蒸煮时间对 3 种不同谷物粥风味特征、质构特征和感官评价的影响，并通过人群试验来测量 3 种谷物粥的 GI，比较其血糖应答差异。针对高 GI 粥品，通过添加奶粉评价其对 GI 值得降低效果，为居民日常生活中粥类食物的选用和血糖控制提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

五常 2 号大米、山西黄小米、松原玉米碴(3 种谷物原料均为当年新收，储存时间不超过 3 个月)(中粮集团有限公司)；去离子水[屈臣氏(集团)有限公司]；邻二氯苯(纯度≥99%，德国西格玛奥德里奇公司)。

### 1.2 仪器与设备

三角牌 CFXB50-A 变参数电饭煲(广州轻出集团股份有限公司)；Clarus690-SQ8T 气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)(美国珀金埃尔默仪器有限公司)；DB-WAX MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国安捷伦科技公司)；ACCU-CHEK Instant 罗氏逸智血糖仪(配罗氏一次性末梢采血针、罗氏血糖试纸)(上海罗氏血糖健康医护公司)；奥豪斯 PR4202ZH/E 型电子天平(精度 0.01 g，上海奥豪斯仪器有限公司)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 谷物粥备制

将 100 g 谷物放入电饭煲(常压蒸煮)中，加入 2000 g 水以 900 W 功率进行加热蒸煮。通过预试验确定大米粥蒸

煮时间为 20、30、40、50 min, 小米粥和玉米粥蒸煮时间为 30、40、50、60 min。

1.3.2　谷物粥色谱条件

取粥类样品(8.00±0.02) g, 加入 20 μL 邻二氯苯(5.155 μg/mL)于20 mL的顶空瓶中。60 ℃水浴加热萃取30 min。

(1) GC 条件

色谱柱: DB-WAX MS (30 m×0.25 mm, 0.25 μm)。升温程序: 40 ℃保持 3 min, 以 6 ℃/min 升至 100 ℃后, 再以 6 ℃/min 升至 230 ℃保持 10 min。进样口温度 250 ℃, 分流比 10:1, 载气为高纯度氦气(99.99%), 流速 1 mL/min.

(2) MS 条件

电子轰击离子源; 质量扫描范围 $m/z$ 30~500; 离子源温度 220 ℃, 传输线温度 280 ℃。通过将其保留指数(retention index, RI)和 MS 数据与真实标准的数据进行比较来测定挥发性化合物。

使用峰面积归一化法定量, 每个样品重复 3 次。

1.3.3　谷物粥与大米奶粥感官评价与质构检测

感官人员严格按照 GB/T 16291.1—2012《感官分析选拔、培训与管理评价员一般导则》进行。选取 20 名经过感官培训的专业人员从外观、质构、香气和味道 4 个方面对谷物粥进行评价。大米奶粥从产品外观、香气、口感、甜度 4 个方面进行评价, 4 个描绘词的强度以 0~9 的等级进行评分(从 0 为弱, 强度逐渐递增, 到 9 为强)。感官评估方法参照 KEBAKILE 等[15], 并少量修改, 即评价员人数增至 20 人且均为经过系统培训的专业人员, 针对谷物粥增设甜度评价。质构检测利用质构仪对谷物粥开展质构特性分析, 具体方法参照文献[10]。

1.3.4　GI 的测定

根据 WS/T 652—2019《食物血糖生成指数测定方法》检测, 人数根据设计要求确定纳入受试者 18 人(男性女性各 9 名), 所有受试者的年龄为 22~25 周岁, 身体质量指数(body mass index, BMI)为 18.6~23.8 kg/m$^2$。每位受试者需至少进行 3 次试食测试, 其中参考食物(葡萄糖, GI 定为 100)测试 2 次, 待测食物 1 次。测试当日, 间隔 5 min 测试 2 次空腹血糖。空腹血糖值测定完成后可以开始进食, 需在 5~10 min 内进食完全部食物, 使机体产生相应的血糖应答, 检测并记录餐后 15、30、45、60、90、120 min 时血糖。研究已通过青岛大学医学部伦理委员会批准(伦理号: QDU-HEC-2023159), 于青岛大学营养与健康研究院完成。所有受试者均于实验前详细介绍实验目的、过程、方法和实验过程, 并签署知情同意书。

餐后时间点血糖变化如公式(1)所示, GI 计算如公式(2)所示。

$$\Delta C_t = C_t - C_0 \tag{1}$$

$$\mathrm{GI} = \frac{S_1}{S_2} \times 100 \tag{2}$$

式中: $C_t$ 为餐后某时间点血糖值, mmol/L; $C_0$ 为前 2 次空腹血糖值, mmol/L; GI 为血糖生成指数; $S_1$ 为食用受试物后 2 h 内血糖应答曲线下增值面积, mmol • min/L; $S_2$ 为等量食用葡萄糖后 2 h 内血糖应答曲线下增值面积, mmol • min/L。

### 1.4　数据处理

所有实验至少重复 3 次, 所得结果以平均值表示。使用 SPSS 23.0 进行多重比较。使用在线网站 MetaboAnalyst 进行主成分分析。热图及聚类分析使用 TBtools (1.120 版本)完成, 剩余的图表使用 Origin(2021 版本)绘制。检验水准 $\alpha$=0.05, $P$<0.05 认为有统计学差异。

## 2　结果与分析

### 2.1　煮制时间对谷物粥风味影响

GC-MS 检测出大米粥有 36 种挥发性化合物, 其中醛类 10 种, 酯类 7 种, 酮 3 种, 芳香类化合物 4 种, 醇类 8 种, 酸类 4 种。小米粥共检测出 24 种挥发性化合物, 其中醛类 9 种, 酯类 3 种, 酮 4 种, 芳香类 3 种, 醇 3 种, 酸类 2 种。玉米粥共检测出 23 种挥发性化合物, 其中醛类 7 种, 酯类 4 种, 酮 1 种, 芳香类 5 种, 醇类 3 种, 酸类 3 种。由图 1 可知, 不同类型的谷物粥单独聚类, 说明 3 类谷物粥在挥发性风味成分上存在显著差异。同一种谷物粥在不同煮制时间下的样品点位置相近且部分重叠, 如小米粥在 30、40、50、60 min 的样品点分布较为集中, 表明煮制时间对同类谷物粥的风味影响相对较小, 谷物种类本身是决定其风味特征的主要因素。这是由于不同谷物(大米、小米、玉米)在脂肪酸、氨基酸、糖类等组成成分上存在差异, 这些成分在加热过程中发生美拉德反应、脂质氧化等变化, 从而导致其风味不同[16]。而同一谷物在不同煮制时间下, 其主体风味物质仍保持相对稳定[4]。综上可知, 谷物种类是影响粥品风味特征的主要因素, 煮制时间虽会引起部分挥发性成分含量的变化, 但不足以改变其整体风味类型。

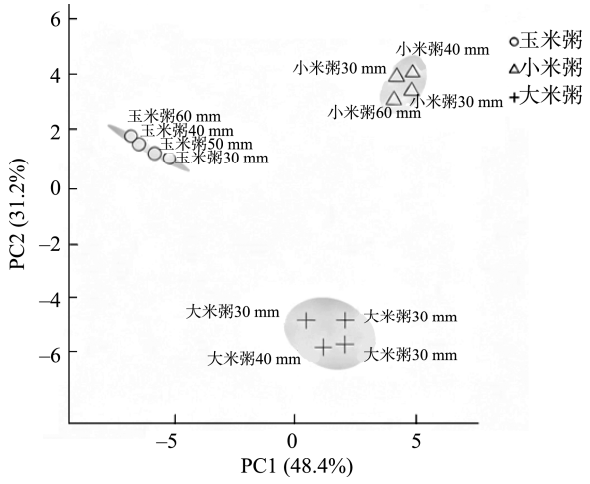



图 1　谷物粥挥发性化合物主成分分析

Fig.1　Principal component analysis of volatile compounds in cereal porridges

如图 2 所示, 3 种谷物粥的挥发性化合物呈现明显的类群聚集特征。醛类物质(如壬醛、己醛)在大米粥与小米粥中普遍富集, 是构成其清香气味的关键成分[17−18]。酯类与酸类物质(如庚酸甲酯、辛酸甲酯)则在玉米粥中含量较高, 赋予其果香与脂香特征[4]。同一种谷物在不同煮制时间下的化合物分布相似, 进一步说明谷物种类是决定其挥发性物质组成的主要因素。这主要源于不同谷物的脂质、氨基酸等前体物质差异, 导致不同谷物粥具有不同的风味特征。

如表 1 所示, 醛类化合物具有较低的气味阈值, 其变化对谷物粥风味起重要作用[17]。与生米相比, 部分醛类物质蒸煮后在短时间内增加。香草醛具有甜香及香草特征香气, 是脂质氧化或木质素降解的产物[19], 3 种谷物粥都在蒸煮的短时间内达到最高浓度, 大米粥在 20 min 时达到 1.094 μg/kg, 小米粥和玉米粥在 30 min 时分别达到 0.800 μg/kg 和 0.205 μg/kg, 随后随着时间的延长而下降。十一醛具有清新的柑橘味[20], 十一醛仅在大米粥和小米粥中检测到。大米粥在 20 min 达到最高浓度, 小米粥在 30 min 时达到最高浓度, 随着蒸煮时间而降低。壬醛具有脂肪氧化和青草味, 由不饱和脂肪酸, 油酸和亚油酸氧化降解产生的关键风味物质[21], 其浓度峰值出现在大米粥 20 min (1.525 μg/kg), 小米粥和玉米粥 30 min (0.507 μg/kg, 0.387 μg/kg), 随着蒸煮时间的延长而降低。己醛具有清香气味, 气味阈值为 1.1 ng/L , 是亚油酸 13 位氢过氧化物经 $\beta$-裂解生成的挥发性醛类化合[19]。癸醛带有甜橙皮样香气在米粥中会与脂类物质协同产生风味, 是亮氨酸等支链氨基酸降解和亚油酸和亚麻酸的 $\omega$-2 氧化降解产物[22]。己醛在煮制后的大米粥浓度最高出现在 20 min, 而小米粥则出现在 40 min 时, 玉米粥出现在 30 min 时。上述 5 种挥发物在先前研究中被认为是谷物粥的主要风味成分[23]。还检测出反-2-壬烯醛、十二醛等醛类化合物。其有较低的气味阈值, 这 3 种挥发性物质也可以被视为谷物粥风味的重要风味物质。反-2-壬烯醛具有轻微黄瓜样的香气, 仅在大米粥和小米粥中检测到, 大米粥最高值出现在 20 min, 小米粥最高值出现在 30 min 时。十二醛具有柑橘香气, 能够为米粥增加清香感, 在大米粥和小米粥中被检测出。结果发现, 大米粥以壬醛、己醛的清香特征为主, 小米粥富含香草醛与十一醛, 玉米粥则富含庚酸甲酯等酯类的果香特征。

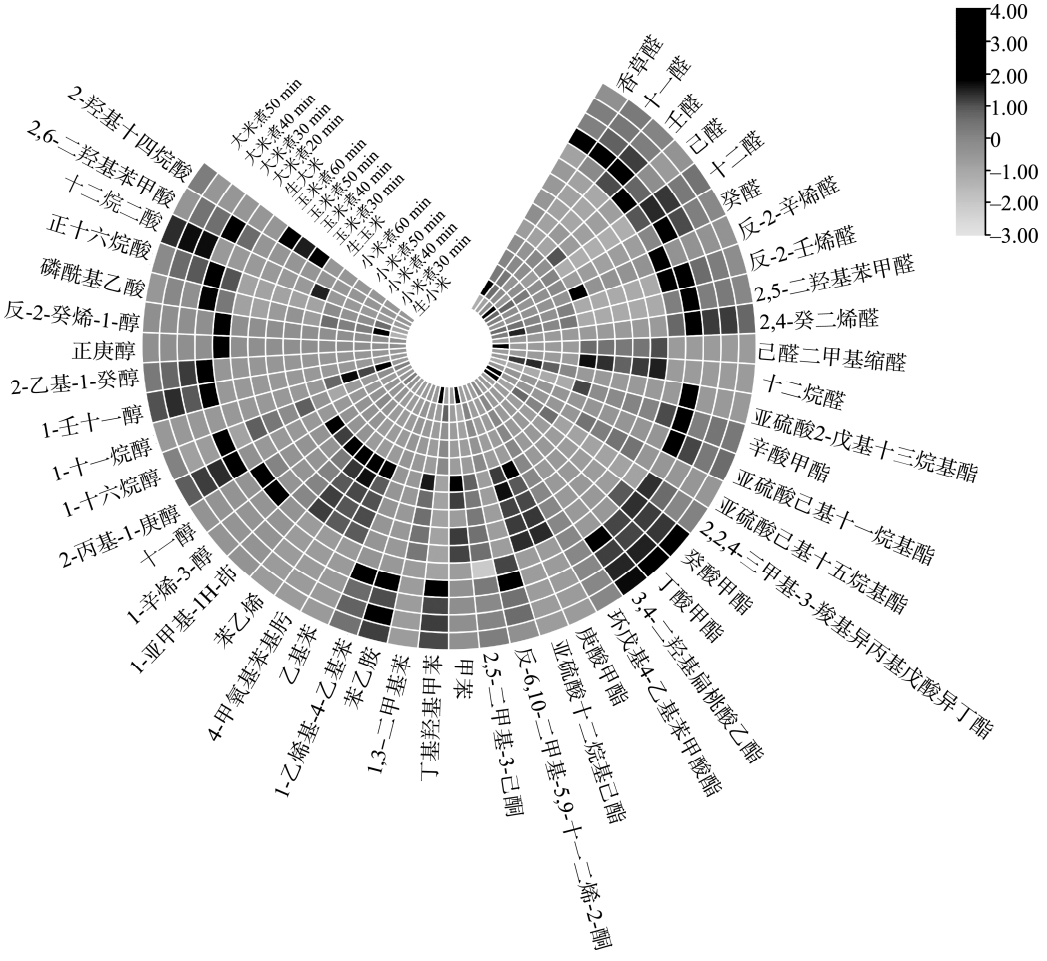



图 2 谷物粥主要挥发性化合物热图聚类分析

Fig.2 Heatmap clustering analysis of major volatile compounds in cereal porridges

**表 1　不同蒸煮时间下谷物粥主要的挥发性化合物含量(μg/kg)**

**Table 1　Major volatile compounds in cereal porridges at different cooking time (μg/kg)**

| | 中文名称 | 保留指数 | 谷物粥 | 生米 | 蒸煮时间 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 20 min | 30 min | 40 min | 50 min | 60 min |
| 醛类 | 香草醛 | 1420.68 | 大米粥 | 0.069±0.054 | 1.094±0.304$^{a}$ | 0.301±0.040$^{Bb}$ | 0.317±0.025$^{Ab}$ | 0.191±0.045$^{Ab}$ | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | 0.800±0.032$^{Aa}$ | 0.350±0.023$^{Ab}$ | 0.272±0.095$^{Ac}$ | 0.225±0.012$^{Ac}$ |
| | | | 玉米粥 | 0.096±0.001 | - | 0.205±0.044$^{Ca}$ | 0.143±0.002$^{Bb}$ | 0.134±0.001$^{Bc}$ | 0.123±0.018$^{Bc}$ |
| | 十一醛 | 1402.33 | 大米粥 | 0.02±0.006 | 0.104±0.061$^{a}$ | 0.045±0.017$^{Ab}$ | 0.033±0.008$^{Ab}$ | 0.030±0.006$^{Ab}$ | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | 0.038±0.000$^{Aa}$ | 0.033±0.005$^{a}$ | 0.021±0.001$^{Bb}$ | 0.011±0.011$^{c}$ |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | 壬醛 | 1099.11 | 大米粥 | 0.885±0.067 | 1.525±0.224$^{a}$ | 0.930±0.603$^{Aab}$ | 0.603±0.311$^{Aab}$ | 0.567±0.137$^{Abc}$ | - |
| | | | 小米粥 | 0.504±0.004 | - | 0.507±0.045$^{Bab}$ | 0.423±0.059$^{Bb}$ | 0.496±0.147$^{Aab}$ | 0.534±0.126$^{Aa}$ |
| | | | 玉米粥 | 0.301±0.027 | - | 0.387±0.030$^{Ca}$ | 0.295±0.025$^{Cb}$ | 0.294±0.004$^{Bb}$ | 0.275±0.017$^{Bb}$ |
| | 己醛 | 787.00 | 大米粥 | 3.901±0.531 | 1.254±0.509$^{b}$ | 0.335±0.257$^{Ab}$ | 0.088±0.052$^{Bb}$ | 0.227±0.202$^{Ab}$ | - |
| | | | 小米粥 | 3.440±0.835 | - | 0.122±0.004$^{Ac}$ | 0.342±0.061$^{Aa}$ | 0.067±0.025$^{Ad}$ | 0.293±0.265$^{Ab}$ |
| | | | 玉米粥 | 1.622±0.050 | - | 0.062±0.035$^{Aa}$ | 0.024±0.002$^{Cb}$ | 0.012±0.003$^{Bc}$ | 0.019±0.004$^{Bbc}$ |
| | 十二醛 | 1590.86 | 大米粥 | 0.041±0.005 | 0.050±0.001$^{a}$ | 0.047±0.020$^{Aa}$ | 0.029±0.008$^{Ab}$ | 0.031±0.004$^{Ab}$ | - |
| | | | 小米粥 | 0.037±0.011 | - | 0.036±0.0007$^{Ba}$ | 0.028±0.002$^{Ab}$ | 0.018±0.002$^{Bc}$ | 0.024±0.005$^{b}$ |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | 癸醛 | 1199.82 | 大米粥 | 0.175±0.062 | 0.845±0.487$^{a}$ | 0.367±0.226$^{Aab}$ | 0.198±0.098$^{Ab}$ | 0.169±0.001$^{Ab}$ | - |
| | | | 小米粥 | 0.196±0.064 | - | 0.14±0.024$^{Aa}$ | 0.101±0.012$^{Ab}$ | 0.122±0.021$^{Bab}$ | 0.162±0.019$^{Aa}$ |
| | | | 玉米粥 | 0.056±0.008 | - | 0.060±0.008$^{Ba}$ | 0.047±0.002$^{Bb}$ | 0.056±0.004$^{Ca}$ | 0.057±0.001$^{Ba}$ |
| | 反-2-壬烯醛 | 1153.66 | 大米粥 | 0.099±0.039 | 0.100±0.017$^{a}$ | 0.057±0.017$^{Aab}$ | 0.043±0.012$^{Ab}$ | 0.029±0.009$^{Ab}$ | - |
| | | | 小米粥 | 0.058±0.005 | - | 0.052±0.002$^{Aa}$ | 0.037±0.001$^{Ab}$ | 0.024±0.002$^{Ac}$ | 0.040±0.014$^{b}$ |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | 己醛二甲基缩醛 | 1088.00 | 大米粥 | ND | - | ND | ND | ND | - |
| | | | 小米粥 | 0.142±0.049 | - | ND | ND | ND | ND |
| | | | 玉米粥 | 0.050±0.001 | - | 0.043±0.012$^{b}$ | 0.038±0.009$^{b}$ | 0.041±0.012$^{b}$ | 0.066±0.002$^{a}$ |
| 酯类 | 亚硫酸 2-戊基十三烷基酯 | 1742.00 | 大米粥 | ND | 0.043±0.001 | ND | ND | ND | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | 0.027±0.003$^{a}$ | 0.029±0.001$^{a}$ | 0.020±0.002$^{ab}$ | 0.008±0.008$^{b}$ |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | 辛酸甲酯 | 1122.00 | 大米粥 | 0.042±0.003 | 0.067±0.003$^{a}$ | 0.024±0.003$^{Ac}$ | 0.029±0.001$^{Ab}$ | 0.028±0.003$^{Abc}$ | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | | | 玉米粥 | 0.043±0.002 | - | 0.018±0.007$^{Bb}$ | 0.019±0.002$^{Bb}$ | 0.022±0.001$^{Ba}$ | 0.024±0.005$^{a}$ |
| | 亚硫酸己基十五烷基酯 | 1657.00 | 大米粥 | ND | - | ND | ND | ND | - |
| | | | 小米粥 | 0.062±0.023 | - | ND | ND | ND | ND |
| | | | 玉米粥 | ND | - | 0.015±0.004$^{a}$ | 0.011±0.002$^{a}$ | 0.015±0.003$^{a}$ | 0.015±0.002$^{a}$ |
| | 2,2,4-三甲基-3-羧基异丙基戊酸异丁酯 | 1763.00 | 大米粥 | ND | 0.050±0.001$^{a}$ | 0.033±0.002$^{b}$ | 0.019±0.001$^{Bc}$ | 0.021±0.009$^{Ac}$ | - |
| | | | 小米粥 | 0.073±0.002 | - | ND | 0.034±0.007$^{Aa}$ | 0.02±0.005$^{Ab}$ | 0.032±0.012$^{a}$ |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | 庚酸甲酯 | 1020.00 | 大米粥 | ND | - | ND | ND | ND | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | | | 玉米粥 | 0.529±0.014 | - | 0.302±0.010$^{d}$ | 0.337±0.018$^{c}$ | 0.382±0.019$^{b}$ | 0.412±0.002$^{a}$ |
| | 亚硫酸十二烷基己酯 | 1548.00 | 大米粥 | ND | - | ND | ND | ND | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | | | 玉米粥 | 0.022±0.001 | - | 0.027±0.009$^{a}$ | 0.021±0.002$^{a}$ | 0.022±0.005$^{a}$ | 0.024±0.003$^{a}$ |

表 1(续)

| | 中文名称 | 保留指数 | 谷物粥 | 生米 | 蒸煮时间 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 20 min | 30 min | 40 min | 50 min | 60 min |
| 酮类 | 6,10-二甲基-5,9-十一二烯-2-酮 | 1622.00 | 大米粥 | 0.176±0.033 | 0.372±0.377$^{a}$ | 0.116±0.037$^{Ab}$ | 0.124±0.015$^{Ab}$ | 0.038±0.002$^{Ac}$ | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | 0.074±0.003$^{Ba}$ | 0.054±0.008$^{Bc}$ | 0.030±0.001$^{Bd}$ | 0.060±0.011$^{b}$ |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | 2,5-二甲基-3-己酮 | 933.00 | 大米粥 | ND | 1.099±0.185$^{a}$ | 0.885±0.043$^{Bb}$ | 0.941±0.115$^{Bab}$ | 1.034±0.035$^{Aa}$ | - |
| | | | 小米粥 | 2.880±0.045 | - | 0.343±0.143$^{Cc}$ | 0.480±0.004$^{Cb}$ | 0.551±0.025$^{Ba}$ | 0.553±0.003$^{Aa}$ |
| | | | 玉米粥 | 1.482±0.032 | - | 1.134±0.012$^{Ab}$ | 1.128±0.038$^{Ab}$ | 1.262±0.068$^{Ca}$ | 1.283±0.010$^{Ba}$ |
| 醇类 | 2-丙基-1-庚醇 | 1053.00 | 大米粥 | 0.020±0.006 | 0.290±0.092$^{a}$ | 0.177±0.002$^{b}$ | 0.161±0.004$^{c}$ | 0.126±0.002$^{d}$ | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | 1-十六烷醇 | 1841.00 | 大米粥 | 0.020±0.005 | 0.076±0.012$^{a}$ | 0.022±0.004$^{Bb}$ | 0.021±0.004$^{Bb}$ | 0.034±0.004$^{Aa}$ | - |
| | | | 小米粥 | 0.035±0.003 | - | 0.029±0.002$^{Ba}$ | 0.023±0.010$^{Ba}$ | 0.023±0.007$^{Aa}$ | 0.018±0.006$^{Bab}$ |
| | | | 玉米粥 | 0.026±0.004 | - | 0.045±0.014$^{Aa}$ | 0.030±0.002$^{Ab}$ | 0.038±0.008$^{Aa}$ | 0.045±0.003$^{Aa}$ |
| | 1-十一烷醇 | 1666.00 | 大米粥 | ND | - | ND | ND | ND | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | 0.043±0.008$^{a}$ | 0.024±0.006$^{c}$ | 0.033±0.015$^{b}$ | 0.018±0.004$^{d}$ |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | 1-壬十一醇 | 1268.00 | 大米粥 | ND | 0.040±0.001$^{b}$ | 0.019±0.001$^{ab}$ | 0.025±0.007$^{a}$ | 0.020±0.002$^{a}$ | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |
| | 1-辛烯-3-醇 | 978.00 | 大米粥 | 0.981±0.111 | ND | ND | ND | ND | - |
| | | | 小米粥 | 0.134±0.019 | - | ND | 0.066±0.025$^{a}$ | 0.008±0.008$^{b}$ | ND |
| | | | 玉米粥 | 0.357±0.039 | - | ND | ND | ND | ND |
| 酸类 | 磷酰基乙酸 | 1230.00 | 大米粥 | 0.199±0.007 | 0.396±0.226$^{a}$ | 0.115±0.028$^{Bb}$ | 0.150±0.064$^{Ab}$ | 0.087±0.037$^{Ab}$ | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | 0.482±0.018$^{Aa}$ | 0.182±0.029$^{Ac}$ | 0.170±0.067$^{Ac}$ | 0.228±0.077$^{Ab}$ |
| | | | 玉米粥 | 0.067±0.022 | - | 0.108±0.029$^{Ba}$ | 0.076±0.001$^{Bb}$ | 0.051±0.017$^{Bc}$ | 0.055±0.012$^{Bc}$ |
| | 正十六烷酸 | 1940.00 | 大米粥 | 0.158±0.049 | 0.317±0.050$^{a}$ | 0.154±0.029$^{Ab}$ | 0.126±0.006$^{Ab}$ | 0.064±0.019$^{Ac}$ | - |
| | | | 小米粥 | ND | - | 0.123±0.024$^{Aa}$ | 0.055±0.014$^{Bb}$ | 0.040±0.009$^{Bbc}$ | 0.058±0.031$^{b}$ |
| | | | 玉米粥 | ND | - | ND | ND | ND | ND |

注: -表示该时间点未检测; ND 表示为未检测到该化合物; 上标大写字母表示不同谷物粥之间存在显著差异($P$<0.05), 上标小写字母表示相同粥品不同时间存在显著差异($P$<0.05), 下表同。

酯类气味阈值较低, 由脂肪酸与醇类脱水缩合形成, 具有果香甜香的风味特征。由于其气味阈值较低, 因此对谷物的整体风味有较大贡献[24]。庚酸甲酯主要具有花浆果香甜味, 辛酸甲酯主要具有甜橙味[25]。庚酸甲酯仅在玉米粥中检测到, 辛酸甲酯等酯类物质在大米粥和玉米粥中检测出, 酯类化合物整体变化较为稳定, 煮制时间对其影响较小。醇类挥发性物质通常具有较柔和的香气, 1-辛烯-3-醇具有蘑菇和香草的气味[26], 是谷物粥的主要风味物质, 主要在 3 种谷物粥的生米中检测到。3 种谷物粥中鉴别出的风味物质大多数为蒸煮之后产生的, 主要来自谷物中脂肪的氧化和分解[18]。研究表明, 随着时间的推移, 大米粥小米粥的味道从清香向酯香味转变, 而玉米粥中主要挥发性物质随着蒸煮时间总体含量的变化趋势较为稳定, 且酯类化合物含量相对较高。

## 2.2 谷物粥质构与感官评价分析

如表 2 所示, 在 7 个质构指标中, 蒸煮时间对谷物粥的质构有显著影响。不同的蒸煮时间对谷物粥的硬度和弹性有显著影响。硬度是样品在压缩过程中达到预定形变量时所需的最大力值, 数值越高, 表明样品越硬, 口感越紧实, 数值越低则越柔软[27]。研究发现, 消费者通常更偏好硬度较低的食物, 这类食物更便于咀嚼和吞咽, 且硬度和弹性都会随着加热时间的延长而逐渐降低[28]。3 种谷物粥中玉米粥的硬度最高, 其次是小米粥, 大米粥硬度最低, 且具有显著差异($P$<0.05)。3 种谷物粥的硬度不同与 3 种谷物的结构有关, 小米玉米淀粉结晶结构较为致密有序不易被破坏, 大米的淀粉结晶结构最为疏松散乱容易被破坏[29]。

如表 3 所示, 3 种谷物粥的硬度均随煮制时间延长呈下降趋势, 其中大米粥的硬度峰值出现在 20 min, 而

**表 2　3 种谷物粥质构分析表**

**Table 2　Texture analysis table of 3 kinds of grain porridge**

| 指标 | 谷物粥 | 蒸煮时间 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 min | 30 min | 40 min | 50 min | 60 min |
| 硬度/N | 大米粥 | $9.38\pm0.54^{a}$ | $5.81\pm0.46^{Cb}$ | $4.16\pm0.07^{Cc}$ | $1.53\pm0.34^{Cd}$ | - |
| | 小米粥 | - | $10.90\pm1.25^{Ba}$ | $5.66\pm0.27^{Bb}$ | $2.79\pm0.88^{Bc}$ | $1.11\pm0.23^{Bd}$ |
| | 玉米粥 | - | $22.41\pm4.62^{Aa}$ | $19.40\pm2.25^{Aa}$ | $14.59\pm2.06^{Ab}$ | $13.62\pm1.05^{Ab}$ |
| 附着力/(N.mm) | 大米粥 | $1.88\pm0.07^{a}$ | $1.80\pm0.07^{ABa}$ | $1.75\pm0.03^{ABb}$ | $1.02\pm0.57^{Bc}$ | - |
| | 小米粥 | - | $2.21\pm0.25^{Aa}$ | $1.07\pm0.80^{Bb}$ | $1.34\pm0.60^{Bab}$ | $0.35\pm0.01^{Bc}$ |
| | 玉米粥 | - | $2.46\pm0.67^{Aa}$ | $3.30\pm1.70^{Aa}$ | $3.24\pm1.03^{Aa}$ | $3.02\pm0.86^{Aa}$ |
| 内聚性 | 大米粥 | $0.37\pm0.08^{b}$ | $0.37\pm0.03^{Ab}$ | $0.37\pm0.02^{Bb}$ | $0.62\pm0.08^{Aa}$ | - |
| | 小米粥 | - | $0.39\pm0.01^{Ad}$ | $0.49\pm0.05^{Ac}$ | $0.62\pm0.12^{Ab}$ | $0.76\pm0.05^{Ba}$ |
| | 玉米粥 | - | $0.09\pm0.01^{Bbc}$ | $0.07\pm0.01^{Cc}$ | $0.13\pm0.02^{Bab}$ | $0.17\pm0.06^{Aa}$ |
| 弹性/mm | 大米粥 | $14.22\pm0.21^{b}$ | $14.32\pm0.18^{Ab}$ | $14.46\pm0.19^{Ab}$ | $14.88\pm0.14^{Aa}$ | - |
| | 小米粥 | - | $13.40\pm0.28^{Bb}$ | $13.45\pm0.35^{Bb}$ | $14.15\pm0.18^{Ba}$ | $13.85\pm0.26^{Aa}$ |
| | 玉米粥 | - | $4.94\pm1.25^{Cb}$ | $6.47\pm1.82^{Ca}$ | $8.33\pm0.88^{Ca}$ | $8.00\pm1.18^{Ba}$ |
| 黏性/N | 大米粥 | $3.69\pm0.11^{a}$ | $2.28\pm0.13^{Bb}$ | $2.08\pm0.03^{Bc}$ | $0.98\pm0.02^{Bd}$ | - |
| | 小米粥 | - | $4.28\pm0.32^{Aa}$ | $2.77\pm0.21^{Ab}$ | $1.63\pm0.38^{Ac}$ | $0.84\pm0.14^{Bd}$ |
| | 玉米粥 | - | $1.92\pm0.26^{Cab}$ | $1.40\pm0.19^{Cb}$ | $1.90\pm0.30^{Aab}$ | $2.26\pm0.69^{Aa}$ |
| 咀嚼性/mJ | 大米粥 | $48.42\pm7.63^{a}$ | $30.44\pm3.17^{Bb}$ | $22.09\pm0.82^{Bc}$ | $13.68\pm1.32^{Bd}$ | - |
| | 小米粥 | - | $57.30\pm3.47^{Aa}$ | $37.34\pm3.66^{Ab}$ | $23.08\pm5.31^{Ac}$ | $11.70\pm2.16^{Bd}$ |
| | 玉米粥 | - | $9.66\pm3.36^{Bb}$ | $9.24\pm3.48^{Cb}$ | $15.73\pm1.57^{Ba}$ | $17.48\pm2.51^{Aa}$ |
| 恢复性 | 大米粥 | $0.03\pm0.00^{b}$ | $0.03\pm0.004^{Ab}$ | $0.03\pm0.00^{Ab}$ | $0.10\pm0.07^{Aa}$ | - |
| | 小米粥 | - | $0.02\pm0.008^{Bb}$ | $0.09\pm0.06^{Aab}$ | $0.12\pm0.14^{Aab}$ | $0.35\pm0.06^{Aa}$ |
| | 玉米粥 | - | $0.02\pm0.00^{ABa}$ | $0.02\pm0.00^{Ba}$ | $0.02\pm0.01^{ABa}$ | - |

**表 3　3 种谷物粥的感官评价表**

**Table 3　Sensory evaluation table of 3 kinds of cereal porridges**

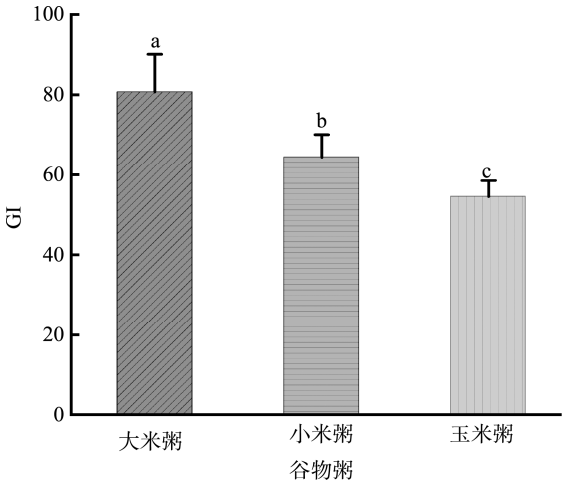
| 指标 | 谷物粥 | 蒸煮时间 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 min | 30 min | 40 min | 50 min | 60 min |
| 颜色 | 大米粥 | $5.35\pm0.64^{Bb}$ | $7.60\pm0.72^{Ba}$ | $7.95\pm0.65^{Ba}$ | $8.05\pm0.90^{Ba}$ | - |
| | 小米粥 | - | $8.20\pm0.59^{Aa}$ | $7.85\pm0.89^{ABa}$ | $7.45\pm0.84^{Aa}$ | $5.10\pm0.68^{Bb}$ |
| | 玉米粥 | - | $5.15\pm0.77^{Bc}$ | $7.30\pm0.76^{Ab}$ | $7.60\pm0.72^{Bab}$ | $7.85\pm0.83^{Aa}$ |
| 硬度 | 大米粥 | $8.20\pm0.50^{Aa}$ | $5.90\pm0.43^{Ab}$ | $5.25\pm0.68^{Ac}$ | $2.65\pm0.71^{Ad}$ | - |
| | 小米粥 | - | $8.50\pm0.49^{Aa}$ | $6.82\pm1.14^{Ab}$ | $5.95\pm0.79^{Ab}$ | $2.25\pm0.97^{Bc}$ |
| | 玉米粥 | - | $7.15\pm0.77^{Ba}$ | $6.09\pm0.76^{Ba}$ | $4.85\pm0.89^{Bb}$ | $4.05\pm1.00^{Ac}$ |
| 谷物香气 | 大米粥 | $8.35\pm0.47^{Aa}$ | $7.75\pm0.61^{Ab}$ | $4.45\pm0.49^{Ac}$ | $3.15\pm0.35^{Cd}$ | - |
| | 小米粥 | - | $8.60\pm0.48^{Aa}$ | $6.85\pm0.77^{Ab}$ | $6.30\pm0.76^{Ab}$ | $5.70\pm0.82^{Bc}$ |
| | 玉米粥 | - | $8.15\pm0.83^{Aa}$ | $7.05\pm0.84^{Bb}$ | $6.90\pm0.75^{Bb}$ | $6.85\pm0.64^{Bb}$ |
| 甜度 | 大米粥 | $7.30\pm0.76^{Ac}$ | $7.10\pm1.23^{Abc}$ | $7.80\pm0.66^{Bb}$ | $8.60\pm0.78^{Aa}$ | - |
| | 小米粥 | - | $7.30\pm0.76^{Ab}$ | $7.10\pm1.23^{Ab}$ | $7.80\pm0.66^{Ab}$ | $8.60\pm0.78^{Aa}$ |
| | 玉米粥 | - | $6.05\pm0.79^{Bc}$ | $7.50\pm0.79^{Ab}$ | $8.05\pm0.72^{Aa}$ | $8.50\pm0.79^{Aa}$ |
| 综合评分 | 大米粥 | $5.60\pm0.48^{Ad}$ | $8.55\pm0.72^{Aa}$ | $6.90\pm0.68^{Bc}$ | $7.60\pm0.57^{Ab}$ | - |
| | 小米粥 | - | $8.50\pm0.58^{Aa}$ | $7.80\pm0.85^{Ab}$ | $7.05\pm0.84^{Ab}$ | $4.45\pm1.00^{Bc}$ |
| | 玉米粥 | - | $6.63\pm0.40^{Bb}$ | $7.80\pm0.96^{Aab}$ | $8.35\pm0.64^{Aa}$ | $7.25\pm0.92^{Cb}$ |

小米与玉米粥则在 30 min 出现。所以感官评价大米粥从煮 20 min 开始, 小米粥和玉米粥从煮 30 min 开始。随着时间的延长, 大米粥和玉米粥的颜色评分增加, 而小米粥在煮 30 min 后评分下降。粥品香气的评价显示, 大米粥各时间点香气强度得分差异显著($P$<0.05), 且随着时间的延长降低, 小米粥和玉米粥也呈现随时间的延长香气下降

的趋势, 这可能由于挥发性醛类、醇类物质在持续加热中会逐渐逸散[19]。3 种粥品的的甜度评分最高都出现在煮制时间最长的时间点, 表明淀粉的持续糊化与降解促进了可溶性糖的释放, 从而增强了甜味[30]。综合评分大米粥和小米粥均在煮 30 min 时最高, 分别达到 8.55 和 8.50, 玉米粥综合评分在 50 min 时最高为 8.35。结果表明, 3 类谷物粥的硬度、均随煮制时间延长而下降, 其中玉米粥硬度最高, 大米粥最低。感官评价表明, 大米粥和小米粥在电饭煲煮 30 min 时综合评分最高, 玉米粥在 50 min 时综合评分最高。

### 2.3 谷物粥对人体 GI 影响

根据 WS/T 652—2019《食物血糖生成指数测定方法》, 含碳水化合物的食物按 GI 分为 3 类: 低 GI 食物 GI≤55, 中 GI 食物 55<GI≤70, GI>70 的为高 GI 食物[31]。如图 3 所示: 大米粥 GI 为 80.71, 属于高 GI 食物, 小米粥 GI 是 64.44, 为中 GI 食物, 玉米粥 GI 是 54.50 为低 GI 食物。本研究测定的大米粥、小米粥和玉米粥的 GI 部分高于《中国食物成分表》(2016 版)的结果, 主要原因可能是由于 GI 与膳食纤维含量呈显著负相关: 膳食纤维含量越高, GI 越低[32]。完整的谷物结构能够延缓淀粉酶的作用, 从而减缓血糖波动[33]。谷物的精加工程度越高, GI 通常越高。不同的蒸煮时间还会改变粥类的质构、稠度以及淀粉颗粒的大小和排列状态[18], 进而影响最终测定的 GI, 这也是本研究与先前研究结果存在差异的原因之一。




注: 图中小写字母表示差异显著($P$<0.05)。

图 3 3 种谷物粥的 GI

Fig.3 GI of 3 kinds of cereal porridges

如表 4 所示, 随着奶粉添加量的增加, 大米奶粥的感官评分呈现先升高后降低的趋势。当添加量为 13%时, 感官评分达到峰值(90.2±3.1), 显著高于其他奶粉添加量($P$<0.05)。奶粉添加量 7%、10%时, 风味与口感不足, 评分较低。而奶粉添加量过高(16%、19%)则导致奶味过重、口感黏腻, 掩盖谷物本味, 评分明显下降。

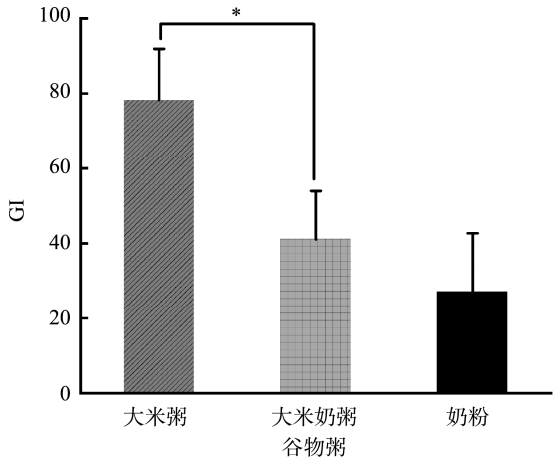
表 4 大米奶粥感官评价表

Table 4 Sensory evaluation table of rice milk porridge

| 奶粉添加量/% | 感官评分 |
|---|---|
| 7 | 71.5±3.5$^{c}$ |
| 10 | 82.5±2.5$^{b}$ |
| 13 | 90.2±3.1$^{a}$ |
| 16 | 70.6±2.8$^{c}$ |
| 19 | 52.3±4.6$^{d}$ |

注: 上标小写字母表示不同奶粉添加量的感官评分存在显著差异($P$<0.05)。

如图 4 所示: 向谷物粥中添加 13%奶粉, 大米奶粥与大米粥 GI 有明显差异。大米奶粥的 GI 为 41.1, 与大米粥相比, 奶粥 GI 下降了 37.1(下降 47.4%), 显示谷物粥中加入奶制品可有效降低粥品的 GI。奶粉含有丰富的优质蛋白质和脂肪, 蛋白质可以通过包埋淀粉的方式, 阻碍淀粉酶与淀粉的接触, 延缓人体对淀粉的消化吸收, 高蛋白质含量的食物还可以刺激胰岛素分泌, 进而降低食物的 GI[34–35]。另一项随机对照试验表明, II型糖尿病患者在餐前摄入含有 25 g 乳清蛋白的食品后进食可有效延缓胃排空, 促进胰岛素分泌, 从而降低餐后血糖[36]。综上所述, 添加奶制品可以优化高 GI 大米粥, 使其成为低 GI 食物。




注: *表示大米奶粥的 GI 与大米粥 GI 相比有显著性差异($P$<0.05)。

图 4 大米粥优化后的 GI

Fig.4 GI of rice porridge after optimization

## 3 结 论

醛类和酯类是 3 种谷物粥主要挥发性成分, 3 种谷物粥(大米粥、小米粥和玉米粥)的关键风味物质存在差异, 大米粥的关键风味物质为香草醛、壬醛、己醛等, 小米粥为香草醛、壬醛、十一醛等, 玉米粥为香草醛、壬醛、庚酸

甲酯等。多数醛类风味物质在短时间煮制后达到浓度峰值, 随后随煮制时间延长逐渐降低, 酯类物质含量则相对稳定。质构方面, 3 种谷物粥的硬度均随煮制时间延长呈下降趋势, 结合感官评价, 大米粥、小米粥煮制 30 min 时综合评分最高, 玉米粥煮制 50 min 时综合评分最优。GI 检测结果显示, 大米粥为高 GI 食物, 小米粥为中 GI 食物, 玉米粥为低 GI 食物, 该结果为不同血糖状况人群的粥品选择提供了直接科学依据。以大米粥质量为基准添加 13%奶粉后转化为低 GI 粥品。本研究的创新性在于明确了家庭常用电饭煲煮制 3 种谷物粥的风味及质构特征, 通过添加奶粉优化大米粥 GI 使居民既可享受谷物粥的风味, 也可增加奶及奶制品的摄入, 增加一定量优质蛋白质、钙等营养素摄入, 为居民控制血糖提供了实用参考。研究仍存在不足: 受试者仅为 22~25 周岁健康人群, 未涵盖老年人、糖尿病患者等特殊群体; 未探究鲜牛奶、酸奶等其他奶制品的改良效果, 也未深入分析风味物质与质构特性的内在关联。未来可拓展受试者范围, 深入研究不同奶制品及添加比例的影响, 为谷物粥的食用与工业化生产提供更全面的科学支撑。

## 参考文献


[1] HEINIÖ RL, NOORT MWJ, KATINA K, *et al*. Sensory characteristics of wholegrain and bran-rich cereal foods-A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016(47): 25–38.

[2] KIRKPATRICK CF, BOLICK JP, KRIS-ETHERTON PM, *et al*. Review of current evidence and clinical recommendations on the effects of low-carbohydrate and very-low-carbohydrate (including ketogenic) diets for the management of body weight and other cardiometabolic risk factors: A scientific statement from the national lipid association nutrition and lifestyle task force [J]. Journal of Clinical Lipidology, 2019, 13(5): 689–711

[3] 徐瑶, 刘晓风, 杨月欣, 等. 碳水化合物质量指标以及血糖生成指数影响因素的进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 502–509
XU Y, LIU XF, YANG YX, *et al*. Progress on carbohydrate quality indicators and influencing factors of glycemic index [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 502–509.

[4] LUDWIG DS. The glycemic index-physiological mechanisms relating to obesity, diabetes, and cardiovascular disease [J]. Jama-Journal of the American Medical Association, 2002, 287(18): 2414–2423.

[5] LI Y, TENG D, SHI X, *et al*. Prevalence of diabetes recorded in mainland China using 2018 diagnostic criteria from the American diabetes association: National cross sectional study [J]. British Medical Journal, 2020, 369: 997.

[6] MI Y, WANG Z, GUAN L, *et al*. Analysis of volatile compounds in rice porridge of different japonica rice varieties in Northeast China [J]. Journal of Cereal Science, 2023(113): 103749.

[7] EKPA O, FOGLIANO V, LINNEMANN A. Identification of the volatile profiles of 22 traditional and newly bred maize varieties and their porridges by PTR-QiTOF-MS and HS-SPME GC-MS [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(4): 1618–1628.

[8] 张佳丽, 李朋亮, 张爱霞, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同电饭煲煮制小米粥中挥发性成分的差异[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 145–152, 160.
ZHANG JL, LI PL, ZHANG AIX, *et al.* Analysis of volatile components in millet porridge cooked by different electric cookers based on GC-IMS [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(4): 145–152, 160.

[9] TANANUWONG K, LERTSIRI S. Changes in volatile aroma compounds of organic fragrant rice during storage under different conditions [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(10): 1590–1596.

[10] BONEKAMP NE, VAN-DAMME I, GELEIJNSE JM, *et al.* Effect of dietary patterns on cardiovascular risk factors in people with type 2 diabetes: A systematic review and network meta-analysis [J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2023, 195: 110207.

[11] YUSOF BNM, TALIB RA, KAMARUDDIN NA, *et al*. A low-GI diet is associated with a short-term improvement of glycaemic control in Asian patients with type 2 diabetes [J]. Diabetes Obesity & Metabolism, 2009, 11(4): 387–396.

[12] 刘婷, 孙小东, 罗雯雯, 等. 有色米营养米粥配方优化及血糖生成指数评价[J]. 农产品加工, 2022(16): 50–53, 56.
LIU T, SUN XD, LUO WW, *et al*. Formula optimization and glycemic index evaluation of colored rice nutritious porridge [J]. Agricultural Products Processing, 2022(16): 50–53, 56.

[13] 姜梦伟. 低血糖生成指数杂粮粥的研制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
JIANG MW. Development of low glycemic index multigrain porridge [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.

[14] 冒钰荣. 低 GI 黑小麦速食粥的研制及储藏稳定性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
MAO YR. Development and storage stability of low GI black wheat instant porridge [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.

[15] KEBAKILE MM, ROONEY LW, DE-KOCK HL, *et al*. Effects of sorghum type and milling process on the sensory characteristics of sorghum porridge [J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(3): 307–313.

[16] LIU XY, WANG SH, PAN MF, *et al*. Effect of cooking methods on volatile compounds and texture properties in millet porridge [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101652.

[17] 刘敬科, 赵巍, 刘畅, 等. 粳小米粥和糯小米粥中挥发性风味成分差别的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(3): 272–276
LIU JK, ZHAO W, LIU C, *et al*. Difference of volatile flavor components in non-waxy and waxy millet porridge [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(3): 272–276.

[18] HU X, LU L, GUO Z, *et al*. Volatile compounds, affecting factors and evaluation methods for rice aroma: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020(97): 136–146.

[19] YANG DS, SHEWFELT RL, LEE KS, *et al*. Comparison of odor-active compounds from six distinctly different rice flavor types [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(8): 2780–2787.

[20] 陈敏氡, 王彬, 刘建汀, 等. 南瓜 5 个品种果肉的挥发性成分分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(6): 633–643.
CHEN MD, WANG B, LIU JT, *et al*. Analysis of volatile components in pulp of five pumpkin cultivars [J]. Journal of Tropical and Subtropical

Botany, 2020, 28(6): 633–643.

[21] 商靖雯, 石瑛. 10 个马铃薯品种蒸煮风味物质差异及相关基因分析[J]. 西北农林科技大学学报, 2025(10): 1–13.
SHANG JW, SHI Y. Differences in cooking flavor compounds and related gene analysis of 10 potato varieties [J]. Journal of Northwest A&F University, 2025(10): 1–13.

[22] HOFMANN T, SCHIEBERLE P. Formation of aroma-active strecker-aldehydes by a direct oxidative degradation of Amadori compounds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 48(9): 4301–4305.

[23] 李雨茹, 周志磊, 姬中伟, 等. 发芽时间对结晶小麦芽风味和主要成分的影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(20): 17–25.
LI YR, ZHOU ZL, JI ZW, *et al*. Effect of germination time on flavor and main components of crystal malt [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(20): 17–25.

[24] XU E, LONG J, WU Z, *et al*. Characterization of volatile flavor compounds in Chinese rice wine fermented from enzymatic extruded rice [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(7): 1476–1489.

[25] CHEN Q, SONG J, BI J, *et al*. Characterization of volatile profile from ten different varieties of Chinese jujubes by HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose [J]. Food Research International, 2018(105): 605–615.

[26] ZHANG F, LU B, HE X, *et al*. Flavor variations in precious tricholoma matsutake under different drying processes as detected with HS-SPME-GC-MS [J]. Foods, 2024, 13(13): 2123.

[27] SCHREUDERS FKG, SCHLANGEN M, KYRIAKOPOULOU K, *et al*. Texture methods for evaluating meat and meat analogue structures: A review [J]. Food Control, 2021(127): 108103.

[28] CHEN L, OPARA UL. Texture measurement approaches in fresh and processed foods-A review [J]. Food Research International, 2013, 51(2): 823–835.

[29] ZHU F, LI H. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical properties of quinoa flour [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019(114): 108367.

[30] REN F, YANG X, WANG L, *et al*. Effects of different processing methods and internal components on physicochemical properties and glycemic index of adzuki bean powder [J]. Foods, 2021, 10(8): 1685.

[31] CHIU CJ, TAYLOR A. Dietary hyperglycemia, glycemic index and metabolic retinal diseases [J]. Progress in Retinal and Eye Research, 2011, 30(1): 18–53.

[32] LIVESEY G, TAYLOR R, HULSHOF T, *et al*. Glycemic response and health-a systematic review and meta-analysis: Relations between dietary glycemic properties and health outcomes [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2008, 87(1): 258–268.

[33] GOLETZKE J, ATKINSON FS, EK KL, *et al*. Glycaemic and insulin index of four common German breads [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2016, 70(7): 808–811.

[34] MOGHADDAM E, VOGT JA, WOLEVER TMS. The effects of fat and protein on glycemic responses in nondiabetic humans vary with waist circumference, fasting plasma insulin, and dietary fiber intake [J]. Journal of Nutrition, 2006, 136(12): 3084.

[35] YE J, HU X, LUO S, *et al*. Effect of endogenous proteins and lipids on starch digestibility in rice flour [J]. Food Research International, 2018(106): 404–409.

[36] MA J, JESUDASON DR, STEVENS JE, *et al*. Sustained effects of a protein ‘preload’ on glycaemia and gastric emptying over 4 weeks in patients with type 2 diabetes: A randomized clinical trial [J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2015, 108(2): 31–34.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)