

不同外源添加物协同挤压膨化黑米粉的品质比较分析

廖美婷^{1,2}, 林武贞³, 王佳佳², 廖娜², 钟立煌², 戈子龙², 刘光², 周鹏飞², 曾嘉锐², 张雁², 邓媛元^{2*}
(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)(2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)
(3. 陆丰市农业科学研究所, 广东汕尾 516500)

摘要: 为研究不同外源添加物协同挤压膨化对黑米粉品质特性的影响, 以黑米为原料, 分别添加质量分数为 1% 的维生素 C、柠檬酸、葡萄糖、碳酸钙、复合物(上述四种外源物各添加 0.25%) 后挤压膨化成黑米粉, 评价不同外源添加物对黑米粉冲调性、粘度、糊化度、感官品质以及活性成分(膳食纤维、多酚、黄酮、花色苷含量)的影响。结果表明: 相较于黑米直接挤压膨化, 添加复合物后黑米粉水溶性指数提高了 105.53%, 吸水性指数降低了 46.28%, 结块率下降了 53.36%; 粘度显著降低, 流动性增加; 糊化度无显著变化, 感官品质明显提升。葡萄糖或柠檬酸的添加有利于不可溶性膳食纤维和总膳食纤维含量增加, 而复合物添加有利于可溶性膳食纤维含量增加。添加柠檬酸更有利于黑米粉中游离酚、结合酚、结合黄酮、花色苷等活性物质的保留, 且总酚的抗氧化力提高了 105.60%。综上所述, 在黑米粉挤压膨化时加入不同外源添加物可以有效改善黑米粉的冲调性和感官品质, 提高活性成分的保留率。该研究旨在建立一种营养活性物质高保留, 且食味与应用品质兼顾的速食黑米粉加工技术。

关键词: 黑米; 挤压膨化; 膳食纤维; 多酚

文章编号: 1673-9078(2025)05-213-221

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0355

Comparative Analysis of the Quality of Extruded Black Rice Powder Obtained Through Extrusion in Synergy with Addition of Different Exogenous Additives

LIAO Meiting^{1,2}, LIN Wuzhen³, WANG Jiajia², LIAO Na², ZHONG Lihuang², GE Zilong², LIU Guang², ZHOU Pengfei², ZENG Jiarui², ZHANG Yan², DENG Yuanyuan^{2*}

(1. College of Food Science South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

引文格式:

廖美婷, 林武贞, 王佳佳, 等. 不同外源添加物协同挤压膨化黑米粉的品质比较分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(5): 213-221.

LIAO Meiting, LIN Wuzhen, WANG Jiajia, et al. Comparative analysis of the quality of extruded black rice powder obtained through extrusion in synergy with addition of different exogenous additives [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(5): 213-221.

收稿日期: 2024-03-22

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2023B0202060002); 广东省农业科学院中青年学科带头人“金颖之光”培养项目(R2023PY-JG014); 广东特支计划项目(2019BT02N112)

作者简介: 廖美婷(2000-), 女, 在读研究生, 研究方向: 粮油加工, E-mail: 15707745377@163.com

通讯作者: 邓媛元(1982-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 粮油加工与营养健康食品, E-mail: yuanyuan_deng@yeah.net

(2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (3. Lufeng Institute of Agricultural Sciences, Shanwei 516500, China)

Abstract: In order to study the effect of extrusion in synergy with addition of different exogenous additives on the quality characteristics of black rice powder, black rice was used as the raw material, and extruded with 1% (mass fraction) vitamin C, citric acid, glucose, calcium carbonate and complex (each of the four exogenous substances was added at 0.25%), respectively, into black rice powder. The effects of different exogenous additives on the reconstituability, viscosity, gelatinization degree, sensory quality and active ingredients (dietary fiber, polyphenols, flavonoids and anthocyanin contents) of the black rice powder were evaluated. The results showed that compared with direct extrusion of black rice, the water solubility index of black rice powder increased by 105.53%, the water absorption index and the caking rate decreased by 46.28% and 53.36%, respectively, the viscosity decreased significantly, the fluidity increased, with insignificant change in the gelatinization degree and significant improvement of sensory quality. The addition of glucose or citric acid was beneficial to the increase of insoluble dietary fiber and total dietary fiber contents, while the addition of complex was beneficial to the increase of soluble dietary fiber content. The addition of citric acid was more conducive to the retention of active substances in black rice powder such as free and bound polyphenols, bound flavonoids, and anthocyanins, and the antioxidant power of total phenols increased by 105.60%. In summary, the addition of different exogenous additives during the extrusion process of black rice powder could effectively improve the reconstituability and sensory quality of black rice powder, and increased the retention rate of active ingredients. The aim of this study was to establish a processing technology of instant black rice powder that had high contents of retained nutrients and active substances as well as good taste and application quality.

Key words: black rice; extrusion; dietary fiber; polyphenols

黑米属于有色类全谷物,在我国种植历史悠久,以营养丰富、滋补保健而著称。李时珍《本草纲目》记载,黑米有“滋阴补肾,健脾暖肝、明目活血”之作用。现代营养学研究表明,黑米外层种皮中含有丰富的膳食纤维、蛋白质、脂肪等营养成分,以及多酚、谷维素等功能活性成分,是主要的营养活性富集部位^[1]。但种皮中大量半纤维素、纤维素、木质素和果胶的存在,也导致黑米质地坚硬,蒸煮时不易软化,米饭口感粗糙、食味品质差,直接食用消费接受度低^[2]。

挤压膨化是目前黑米工业化加工的主要方式。黑米通过挤压膨化可以实现淀粉糊化,蛋白质变性、可溶性膳食纤维增加,提高其人体消化率^[3]。同时挤压膨化有利于形成的多孔结构,增加风味物质,改善黑米的感官品质^[4]。张冬媛等^[5]研究表明挤压膨化处理能够降低糙米的总膳食纤维与不溶性膳食纤维的含量,增加可溶性膳食纤维含量,从而改善糙米口感;由于多孔网状结构的形成,使得产品水溶性指数明显提高,冲调性得到改善。但黑米中多酚、黄酮等活性组分属于热敏性物质,挤压膨化过程中的高温、高压剪切力易导致其含量降低,活性损失,且该作用在不同原料体系组成下表现出影响

差异^[6]。而其他多项研究表明,在挤压膨化体系中添加不同外源物,有利于原料中功能组分含量及活性保持。Fan等^[7]发现,在南瓜粉挤压膨化过程中通过添加L-抗坏血酸、柠檬酸和D-异抗坏血酸钠,可以较好的保护南瓜粉的色泽。Durge等^[8]在研究米粉混合胡萝卜素挤压膨化花青素稳定性中发现通过添加质量分数1%柠檬酸含量可以有效的提高花青素保留,并且产品的酸度也在接受范围之内。Obradovic等^[9]发现在玉米挤压过程中添加维生素C能够提高酚类物质含量、增加抗氧化活性,提高色素的保留率。本研究综合前人进展,针对黑米挤压膨化过程中营养活性损失的瓶颈问题,比较不同外源添加物协同挤压膨化对黑米中营养活性物质保留率的影响,并对黑米粉的应用特性和感官品质进行综合评价,旨在建立一种营养活性物质高保留,且食味与应用品质兼顾的速食黑米粉加工技术。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

黑米种植于广东省陆丰市,由广东同旺生态农业科技发展有限公司提供。维生素C、柠檬酸,均

购于河南千志商贸有限公司；碳酸钙，购于河南喜莱客化工产品有限公司；葡萄糖，购于江西阿颖金山药食品集团有限公司。

1.2 仪器与设备

DS30-II 双螺杆膨化机，山东赛信膨化机械有限公司；3-18K 台式高速冷冻离心机，德国赛多利斯公司；AR-G2 流变仪，美国 TA 公司；D-500 高剪切均质分散乳化机，德国 WIGGENS 公司；M200 多功能酶标仪，瑞士 Tecan 科技有限公司；Eyelan-1100 旋转蒸发仪，东京理化器械株式会社；UV-1240 紫外-可见分光光度计，日本岛津分析仪器有限公司；UltraScan VIS 色差仪，美国 HunterLab 公司；Vortex Genie 多用途涡旋混合器，美国 Scientific Industries 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料制备与分组

黑米粉碎后过 60 目筛。膨化工艺条件参照张冬媛等^[5]方法：各组原料调整水分含量为 13%。挤压膨化机 I 区温度 20 °C，II 区温度 120 °C，III 区温度 160 °C，螺杆转动速度：200 r/min；挤出样品粉碎后过 60 目筛，所有样品密封保存以备后续研究使用。试验共设 6 组，对照组为不添加外源物直接挤压膨化的黑米粉（Extrusion Black Rice, EBR）；外源添加物试验组包括添加质量分数为 1% 维生素 C 的黑米挤压膨化组（Vitamin C Added Extrusion Black Rice, VcEBR）；添加质量分数为 1% 柠檬酸的黑米挤压膨化组（Citric Acid Added Extrusion Black Rice, CAEBR）；添加质量分数为 1% 葡萄糖的黑米挤压膨化组（Glucose Added Extrusion Black Rice, GEER）；添加质量分数为 1% 碳酸钙的黑米挤压膨化组（Calcium Carbonate Added Extrusion Black Rice, CaEBR）；以及添加维生素 C、柠檬酸、葡萄糖和碳酸钙各 0.25%（质量分数）的黑米复合挤压膨化组（Mixture Added Extrusion Black Rice, MEER）。部分指标测定过程中设有未挤压膨化黑米粉（Raw Black Rice, RBR）。

1.3.2 冲调性的测定

水溶性指数（Water Solubility Index, WSI）和吸水性指数（Water Absorption Index, WAI）的测定参照曾德玉等^[10]的方法。结块率的测定参照戴晓慧等^[11]的方法。

1.3.3 粘度的测定

参照赵志浩等^[11]的方法略加修改，将样品置于 105 °C 烘箱中干燥 12 h，冷却至室温，称取 20 g 样品，加入 200 mL 预热到 80 °C 的蒸馏水，搅拌，室温放置 10 min 后，分散均匀的米糊采用流变仪测定其粘度。

1.3.4 糊化度的测定

参照肖家喜等^[12]的方法，称取 0.1 g 样品加入 49 mL 蒸馏水、1.0 mL 10 mol/L KOH，搅拌，6 471 r/min 离心 10 min，取上清液 1 mL，加入 0.4 mL 0.5 mol/L 盐酸，并用蒸馏水定容至 10 mL，添加 0.1 mL 碘液混匀后于 600 nm 处测得吸光度值 A_1 ；重复上述步骤，把 KOH 添加量改为 2.5 mL，盐酸添加量改为 1.5 mL，测得吸光度值 A_2 。糊化度（Gelatinization Degree, DG）按下式计算：

$$D = \frac{A_1}{A_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

D ——糊化度（DG）；

A_1 ——测定样品吸光度值；

A_2 ——全糊化样品吸光度值。

1.3.5 色度的测定

参照赵悦等^[13]的方法。取 20 g 样品粉末于石英比色皿中，用标准比色板校准色差计，再测样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值，各样品重复测定 3 次，未添加外源物的挤压膨化黑米粉为对照组，色度用 L_1 、 a_1 、 b_1 表示，色差值（ ΔE ）按下式计算：

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_1)^2 + (a^* - a_1)^2 + (b^* - b_1)^2} \quad (2)$$

式中：

ΔE ——色差值；

L^* ——样品颜色的亮度；

L_1 ——未添加外源物挤压膨化黑米粉颜色的亮度；

a^* ——样品颜色的红绿色度；

a_1 ——未添加外源物挤压膨化黑米粉颜色的红绿色度；

b^* ——样品颜色的黄蓝色度；

b_1 ——未添加外源物挤压膨化黑米粉颜色的黄蓝色度。

1.3.6 感官评定

感官评定主要参照 GB/T 13868-2009 建立感官分析实验的一般通则和 GB/T 29605-2013 食品感官质量控制原则进行。从实验室在读研究生中筛选感官评定人员，邀请 10 位感官敏锐、具有较好语言表达能力实验人员，根据给定的标准进行评价，

每个实验人员随机给予样品, 评定所有的样品。每份样品称取 20 g 置于清洁的白色陶瓷盘中, 在光线充足条件下用目测法观察速食黑米粉的组织形态及色泽。另外取 20 g 样品倒入一次性纸杯中, 加入 50 mL 的开水, 充分搅拌均匀, 观察其冲调性, 品尝其滋味, 按照表 1 所给的标准进行打分评价。

表 1 感官评价评分表
Table 1 Sensory evaluation scale

项目	特征	分数
组织形态	颗粒均一, 松散, 无结块	10~8
	颗粒较均一, 松散, 少量结块	7~5
	颗粒明显大小不均, 较多结块	≤4
色泽	色泽均一, 柔和有光泽	10~8
	色泽较均一, 有光泽, 略带褐色	7~5
	色泽明显不均一, 发暗, 无光泽, 呈褐色	≤4
气味	具有米制品特有的香味, 气味纯正浓郁	20~16
	香气较淡, 无异味(焦糊味)	14~10
	香味很淡或有异味	≤8
滋味口感	口感浓郁, 无颗粒感, 无异味	20~16
	口感寡淡, 夹杂少许其他异味	14~10
	口感粗糙, 有其他不良味道	≤8
冲调性	几乎无结块	20~16
	结块 杯底有少许结块	14~10
	结块较多	≤8
流动性	粘度适中, 流动性好	20~16
	流动性一般	14~10
	过度粘稠或过度稀释	≤8

1.3.7 活性成分含量测定

1.3.7.1 膳食纤维含量的测定

膳食纤维含量的测定采用酶重量法, 参照 GB 5009.88-2014。

1.3.7.2 酚类物质的提取与含量测定

游离态酚类物质的提取参照 Paiva 等^[15]的方法进行。称取 0.5 g 样品加入 50 mL 体积分数 85% 已预冷酸化甲醇, 10 000 r/min 均质 5 min, 6 101 r/min 离心 10 min, 上清液 45 °C 真空浓缩后再用酸化甲醇复溶, 并用蒸馏水定容至 10 mL, 存于 -20 °C。结合态酚类物质的提取参照 Finocchiaro 等^[16]的方法, 将上述提取游离酚后的沉淀物加入 40 mL 2 mol/L NaOH 溶液, 充入 N₂ 密封, 室温下震荡 1 h, 6 471 r/min 离心 10 min, 取上清液, 用盐酸调至 pH 值等于 1, 用正己烷 (1:1) 脱脂, 重复两次, 并用乙酸乙酯

(1:1) 萃取五次, 合并乙酸乙酯相, 45 °C 真空浓缩后再用酸化甲醇复溶, 蒸馏水定容至 10 mL, 存于 -20 °C, 酚类含量的测定参照 Dewanto 等^[17]的方法进行, 结果以每 100 g 样品干基中所含没食子酸当量 (mg GAE/100 g) 表示。

1.3.7.3 黄酮含量的测定

参照 Jia 等^[18]的方法, 0.3 mL 提取液加入 1.5 mL 蒸馏水和 0.09 mL 质量分数为 5% 的 NaNO₂ 溶液, 在 25 °C 下反应 6 min 后, 加入 0.18 mL 质量分数为 10% 的 AlCl₃·6H₂O 溶液, 25 °C 下静置 5 min, 加入 0.6 mL 1 mol/L NaOH 和 0.33 mL 蒸馏水, 在 510 nm 下测定吸光度值, 同时以酸化甲醇做空白对照。配置不同浓度的儿茶素标准溶液制作标准曲线, 结果以每 100 g 样品干基中所含的儿茶素当量 (mg CE/100 g DW) 表示。

1.3.7.4 花色苷含量的测定

参照 Kelly 等^[19]的方法, 配制 pH 值为 1 的 0.025 mol/L KCl 缓冲液和 pH 值为 4.5 的 0.2 mol/L NaAc 缓冲液, 取适量游离酚提取液分别用两种缓冲液进行十倍稀释, 在 510 nm 和 700 nm 处测定吸光度值, 具体含量按照下式计算:

$$C = \frac{A \times M_w \times DF \times 1000}{\epsilon \times L} \quad (3)$$

式中:

C——花色苷含量, mg/100 g;

A——吸光度值;

M_w——葡萄糖苷分子量, 449.2;

ε——葡萄糖苷摩尔吸光系数, 26 900;

L——比色皿宽度, 1 cm;

DF——稀释倍数。

1.3.8 抗氧化能力的测定

抗氧化能力测定参照 FRAP 试剂盒说明书操作。

1.4 数据处理与分析

本实验数据结果用均数 ± 标准差 (Mean ± SD), 数据分析运用 SPSS 软件, 多组间比较采用单因素方差分析 (one-way ANOVA), 运用 origin 85 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 冲调性

如表 2 所示, 在挤压膨化过程中添加维生素 C、柠檬酸、葡萄糖、碳酸钙及其复合物都能够改善速

食黑米粉的冲调性，其中复合物添加组的效果最佳。与直接挤压膨化相比，复合物添加后水溶性指数提高了 105.53%，吸水性指数和结块率分别降低了 46.28% 和 53.36%，其原因可能是柠檬酸与碳酸钙在挤压膨化过程中高温流体状态下反应生成了柠檬酸钙和二氧化碳。二氧化碳有利于黑米粉在固化过程中形成更加疏松的孔状结构，改善冲调性；柠檬酸钙是吸收率较高的钙强化剂，且酸味较低，因此添加物在改善黑米粉冲调特性与口感的同时也有利于提高黑米粉钙含量。

表 2 不同外源添加物对挤压膨化黑米粉冲调性的影响

Table 2 Effect of different exogenous additives on the punch properties of extruded black rice powder

不同外源添加物组	水溶性指数/%	吸水性指数/%	结块率/%
EBR	23.87 ± 1.54 ^d	542.47 ± 46.28 ^a	6.99 ± 0.92 ^a
VcEBR	31.70 ± 1.07 ^c	430.97 ± 3.67 ^c	5.06 ± 0.31 ^{bc}
CAEBR	26.27 ± 0.55 ^d	481.93 ± 3.27 ^b	5.26 ± 0.76 ^{bc}
GEBR	34.13 ± 1.62 ^{bc}	451.2 ± 17.67 ^{bc}	4.26 ± 0.50 ^{cd}
CaEBR	35.72 ± 1.30 ^b	437.27 ± 9.46 ^c	5.86 ± 0.61 ^b
MEBR	49.06 ± 4.13 ^a	291.42 ± 12.89 ^d	3.26 ± 0.31 ^d

注：数值为平均值 ± 标准差，同列中不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)，下表同。

2.2 粘度

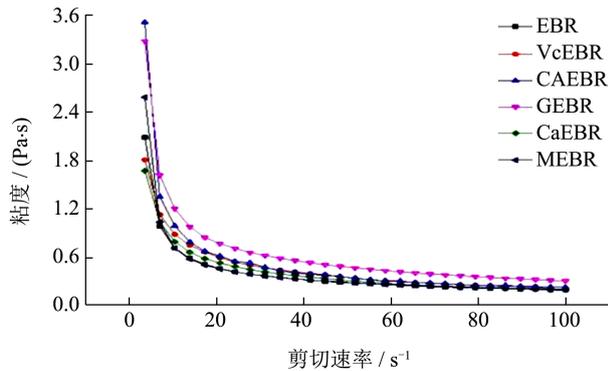


图 1 不同外源物添加后挤压膨化黑米粉的冲调粘度曲线

Fig.1 The punch viscosity curve of extruded black rice powder after adding different exogenous substances

如图 1 所示，添加外源物后挤压膨化黑米粉均具有非牛顿流体的剪切稀释现象^[20]。冲调粘度随着剪切速率的增大而迅速下降，然后逐渐趋于平稳。

与直接挤压膨化黑米粉相比，在较低的剪切速率下，分别添加维生素 C、柠檬酸和碳酸钙后黑米粉粘度提高，但随着剪切速率的增大，三组黑米粉

和直接挤压膨化黑米粉粘度基本一致。添加葡萄糖后黑米粉粘度在检测范围内均高于直接挤压膨化，而添加复合物后黑米粉粘度却低于直接挤压膨化，提示复合物添加有助于改善黑米粉流动性。

2.3 糊化度

已有研究表明，挤压会导致淀粉颗粒中氢键和结晶结构的破坏，从而增加糊化程度^[21]。添加外源物后挤压膨化黑米粉的糊化度如图 2 所示。直接挤压膨化黑米粉糊化度为 97.15%。与直接挤压膨化相比，分别添加柠檬酸和葡萄糖后的黑米粉糊化度显著降低 ($P < 0.05$)，分别为 88.93%、88.85%。其余添加物对黑米粉糊化度没有显著影响。添加柠檬酸会使黑米粉的无定形区发生降解，糊化性能下降^[22]。葡萄糖的加入会提高淀粉糊化温度^[23]，从而导致其糊化度降低。

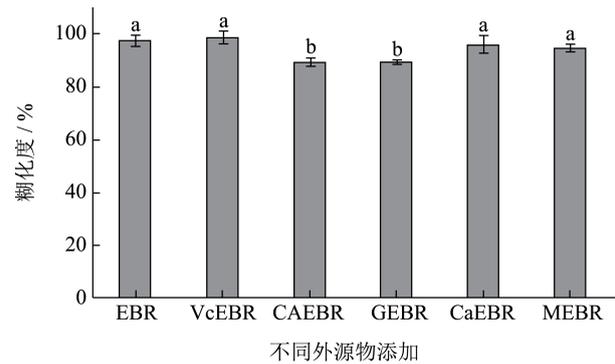


图 2 不同外源添加物对挤压膨化黑米粉糊化度的影响

Fig.2 Effect of different exogenous additives on gelatinization degree of extruded black rice powder

注：不同的字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)，下图同。

2.4 色度

表 3 不同外源添加物对挤压膨化黑米粉色度的影响

Table 3 Effect of different exogenous additives on the color of extruded black rice powder

不同外源添加物组	L^*	a^*	b^*	ΔE
EBR	45.57 ± 0.28 ^c	6.24 ± 0.12 ^f	0.43 ± 0.13 ^c	—
VcEBR	46.34 ± 0.36 ^d	7.58 ± 0.13 ^c	0.67 ± 0.06 ^d	1.57
CAEBR	44.97 ± 0.16 ^f	10.02 ± 0.06 ^a	0.57 ± 0.04 ^d	3.83
GEBR	47.94 ± 0.13 ^c	7.21 ± 0.04 ^d	2.94 ± 0.06 ^b	3.58
CaEBR	49.30 ± 0.19 ^b	6.83 ± 0.06 ^e	3.67 ± 0.06 ^a	4.97
MEBR	50.57 ± 0.86 ^a	8.91 ± 0.14 ^b	2.35 ± 0.11 ^c	5.98

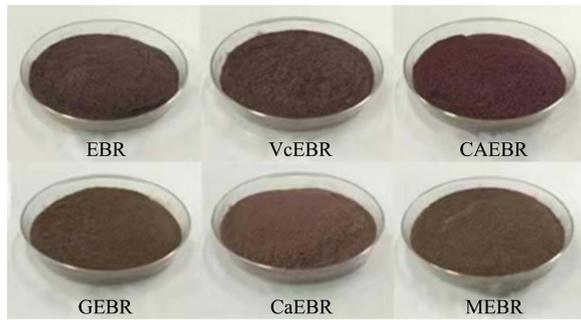


图3 不同外源物添加后挤压膨化黑米粉的粉体外观形貌

Fig.3 The powder morphology of extruded black rice powder after adding different exogenous substances was studied

添加外源物后挤压膨化黑米粉色度及色差结果见表3。与直接挤压膨化相比,添加维生素C后黑米粉色泽与直接挤压膨化最接近,因为维生素C具有较强的抗氧化性,阻止了酶促褐变发生。添加柠檬酸后,酸性条件下有利于黑米粉中花色苷的保留且降低了单宁的氧化褐变,因此 a^* 值最高,粉体偏红。添加碳酸钙后 b^* 值最高,粉体均匀细密呈现微黄色,其原因是挤压过程中碳酸钙可以有效防止淀粉分子发生流变现象,充当气泡核的作用,气泡围绕着碳酸钙,使淀粉分子形成细小颗粒^[24]。添加复合物后,粉体颗粒均匀度有所提高,且亮度 L^* 值最高。上述色度差异与粉体外观形貌图3相符。

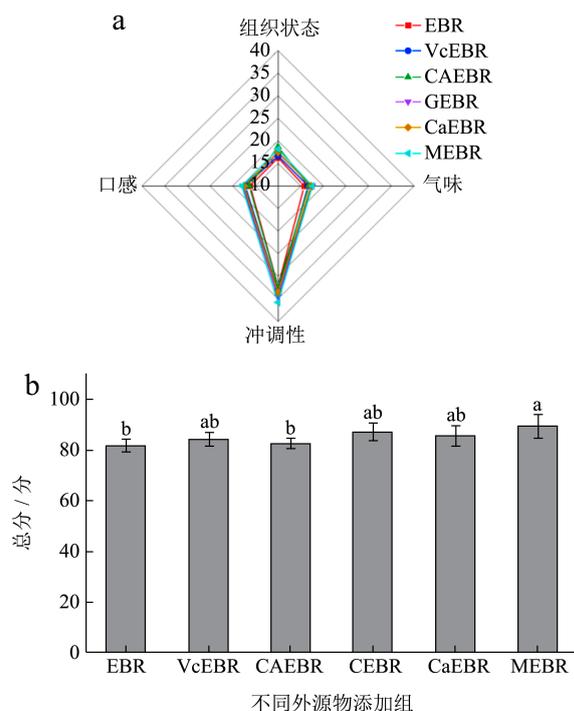


图4 不同外源添加物对挤压膨化黑米粉感官评分的影响

Fig.4 The effect of different exogenous additives on the sensory score of extruded black rice flour

注:(a) 感官评价指标雷达图;(b) 感官评价总分柱状图。

2.5 感官评价

如图4所示,不同外源添加物处理组和直接挤压膨化对照组在粉体色泽、气味、口感及滋味口感上并无显著性差异,且总得分都在80以上。但柠檬酸添加后样品带有酸味,复合添加物综合评价最优。

2.6 活性成分

2.6.1 膳食纤维含量

表4 不同外源添加物对挤压膨化黑米粉膳食纤维组成的影响(g/100g)

样品	可溶性膳食纤维	不可溶性膳食纤维	总膳食纤维
RBR	0.68 ± 0.01 ^c	6.96 ± 0.06 ^d	7.64 ± 0.05 ^c
EBR	1.05 ± 0.01 ^d	8.51 ± 0.06 ^b	9.56 ± 0.05 ^c
VcEBR	0.55 ± 0.01 ^e	7.36 ± 0.05 ^c	7.91 ± 0.04 ^d
CAEBR	0.62 ± 0.00 ^f	9.11 ± 0.14 ^a	9.73 ± 0.14 ^b
GEER	1.18 ± 0.01 ^c	9.14 ± 0.14 ^a	10.32 ± 0.16 ^a
CaEBR	1.25 ± 0.02 ^b	5.16 ± 0.01 ^c	6.41 ± 0.01 ^f
MEBR	1.49 ± 0.03 ^a	4.63 ± 0.07 ^f	6.11 ± 0.10 ^e

已有研究表明,挤压膨化对谷物总膳食纤维和可溶性膳食纤维有积极影响^[25]。如表4所示,与未挤压膨化的生米粉相比,挤压膨化黑米粉的可溶性膳食纤维、不溶性膳食纤维和总膳食纤维含量均显著增加($P < 0.05$),分别为挤压膨化前的154.41%、122.27%、125.13%。其原因可能是在挤压过程中产生的脱水化合物,部分与淀粉发生转糖苷反应,形成了可以抗淀粉酶的新支链葡聚糖,从而增加了膳食纤维的含量^[26]。同时,黑米中的 β -葡聚糖、木质素等大分子物质中的部分化学键发生断裂,提高可溶性物质的溶出率^[27],导致可溶性膳食纤维增加。与直接挤压膨化相比,添加葡萄糖后挤压膨化显著提高了三种膳食纤维含量,可能是葡萄糖与蛋白质发生美拉德反应,降低了蛋白质的消化率^[28],阻碍了膳食纤维测定过程中的酶促反应发生,从而使上述三种纤维含量进一步显著增加。添加柠檬酸挤压膨化有利于提高总膳食纤维和不可溶性膳食纤维含量,但降低了可溶性膳食纤维含量,可能是少量可溶性膳食纤维发生了酸降。此外,在酸处理过程中纤维结合蛋白质残基发生变性和解离,故总膳食纤维和不可溶性膳食纤维含量增加^[28]。添加碳酸钙或复合物有利于提高可溶性膳食纤维含量,但降低了总膳食纤维和不可溶性膳食纤维含量,则可能是碱

性处理破坏纤维素和半纤维素之间的共价键，从而导致纤维素的部分分解^[30]，即不可溶性膳食纤维部分分解为可溶性膳食纤维。

2.6.2 多酚含量

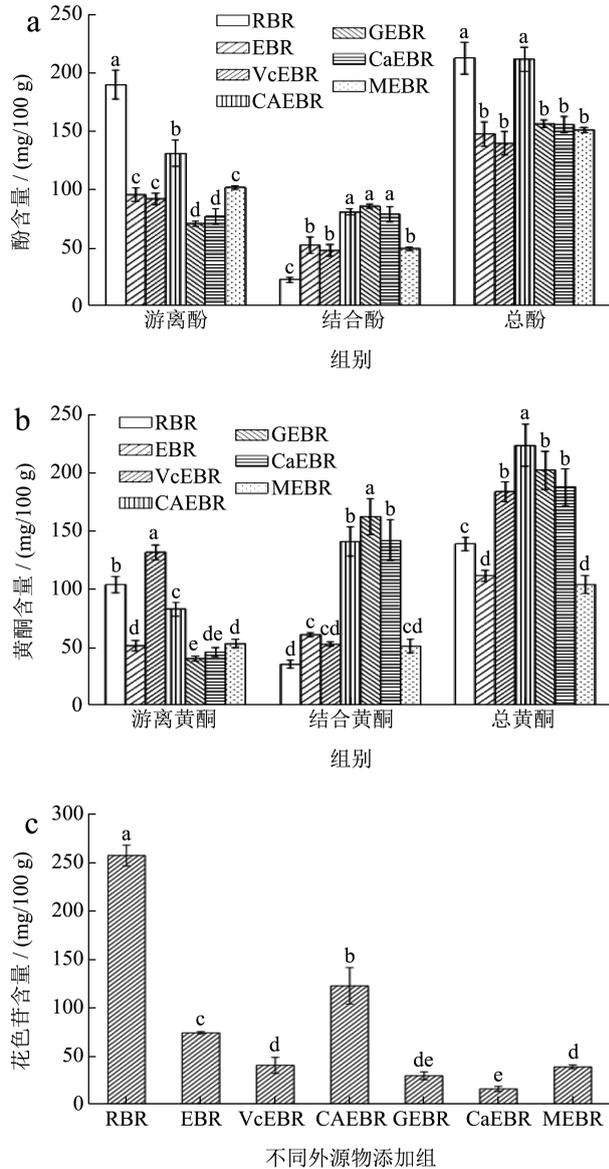


图5 不同外源添加物对挤压膨化黑米粉多酚、黄酮、花色苷含量的影响

Fig.5 Effects of different exogenous additives on the contents of polyphenols, flavonoids and anthocyanins in extruded black rice powder

黑米中含有丰富的游离态和结合态酚类物质，不同外源物添加后挤压膨化黑米粉中游离酚、结合酚和总酚含量如图5a所示。

与未挤压膨化的生米粉相比，直接挤压膨化黑米粉游离酚、总酚含量显著下降，分别为挤压膨化前的50.22%、69.47%，而结合酚含量显著增加，为

挤压膨化前的231.13%。挤出高温导致多酚结构变化或降解，总酚含量降低；而原料中部分游离酚转化为结合酚，则导致结合酚含量一定程度上的增加^[31]。添加柠檬酸能够有效降低黑米粉中多酚氧化酶活性，抑制粉体酶促反应；同时酸性环境有利于酚类物质的保留，减少降解，因此，总酚含量与挤压膨化前无显著差异。而维生素C、葡萄糖、碳酸钙的引入则加剧了挤压膨化对游离态多酚的破坏，但提高了结合态多酚的含量，其原因是葡萄糖的加入在高温状态下发生美拉德反应，其醛、酮等还原性中间产物影响了游离酚存在，降低了其含量^[28]；碳酸钙高温下会生成氧化钙和二氧化碳形式，氧化钙和水会产生氢氧化钙，使熔融物呈碱性，而碱性处理能使结合酚被释放^[32]。

2.6.3 黄酮含量

不同外源物添加后挤压膨化黑米粉中游离黄酮、结合黄酮和总黄酮含量如图5b所示。

与未挤压膨化生米粉相比，直接挤压膨化黑米粉游离黄酮、总黄酮含量显著下降，分别为挤压膨化前的49.18%、81.41%，结合黄酮含量显著增加，为挤压膨化前的171.96%，推测可能是黄酮类化合物在高温下被破坏，或其分子结构交替导致其反应性和可萃取性降低^[33]。维生素C和柠檬酸的添加都可以提高黄酮类化合物的稳定性^[34]。添加碳酸钙会使黑米粉呈碱性，而游离黄酮在碱性条件下易分解，故其含量降低^[35]。

2.6.4 花色苷含量

不同外源物添加后挤压膨化黑米粉中花色苷含量如图5c所示。

相较于未挤压膨化生米粉，直接挤压膨化的热效应导致花色苷降低76.19%。添加柠檬酸挤压膨化可以显著提高其保留率至50.40%，Durge等^[8]在研究米粉混合胡萝卜素挤压膨化花青素稳定性中发现通过添加1%柠檬酸含量可以有效的提高花青素保留，并且产品的酸度也在接受范围之内。其余各种外源物添加后花色苷含量都显著降低。Obradovic等^[9]发现在玉米挤压过程中添加维生素C能够提高酚类物质含量、增加抗氧化活性，提高色素的保留率；但Briggs等^[36]在玉米和蓝莓挤压过程中添加维生素C后发现其在花青素保留和防治褐变方面并没有显著贡献。造成两者结果不同的原因可能是维生素C的氧化或蓝莓花青素与维生素C缩合形成过氧化氢，加剧氧化发生。

2.6.5 FRAP抗氧化能力

挤压膨化黑米粉 FRAP 抗氧化能力如图 6 所示。

黑米直接挤压膨化会造成总抗氧化力和游离态抗氧化力显著降低，结合态抗氧化力显著提高；外源物的添加都有利于提高黑米结合态抗氧化力，而柠檬酸或复合添加物还能提高黑米中游离态和总抗氧化力，维生素 C 和葡萄糖引入则降低了黑米中游离态抗氧化力。

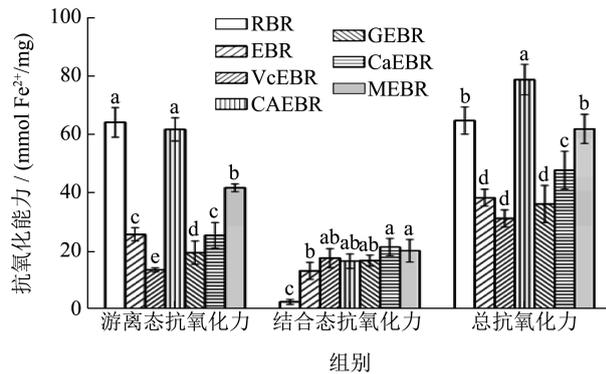


图 6 不同外源添加物对挤压膨化黑米粉 FRAP 的影响

Fig.6 Effect of different exogenous additives on FRAP of extruded black rice powder

3 结论

不同外源添加物（1% 维生素 C、1% 柠檬酸、1% 葡萄糖、1% 碳酸钙、上述四种外源物各 0.25% 复合）对黑米挤压膨化品质均有显著影响。复合物添加后水溶性指数提高了 105.53%，吸水性指数降低 46.28%，结块率下降 53.36%，并且可以降低冲调粘度，增加流动性，提升感官品质。葡萄糖或柠檬酸的添加有利于不可溶性膳食纤维和总膳食纤维含量增加，而复合物添加有利于可溶性膳食纤维含量增加。此外，柠檬酸添加有利于黑米挤压膨化过程中膳食纤维、多酚、黄酮、花色苷等活性物质的保留和抗氧化能力提升。

参考文献

[1] ZHANG M W, ZHANG R F, ZHANG F X, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(13): 7580-7587.

[2] MA Z H, WANG Y B, CHENG H T, et al. Biochemical composition distribution in different grain layers is associated with the edible quality of rice cultivars [J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125896.

[3] 陈焱芳,张名位,张雁,等.发芽及挤压膨化对糙米挥发性

风味物质的影响[J].中国农业科学,2021,54(1):190-202.

- [4] 孟如君,刘静,沈汪洋,等.挤压膨化技术在杂粮加工业的应用研究[J].食品研究与开发,2021,42(7):189-193.
- [5] 张冬媛,邓媛元,张名位,等.发芽-挤压-淀粉酶协同处理对速食糙米粉品质特性的影响[J].中国农业科学,2015, 48(4):759-768.
- [6] 毋鑫,黄碧君,晏芳芳,等.黑米储藏与加工方式对其加工品质及膳食多酚影响的研究进展[J].食品科学,2022, 43(3):362-370.
- [7] FAN W D, ZHAO J, LI Q H. Effect of different food additives on the color protection of instant pumpkin flour [J]. Food Chemistry Advances, 2023, 3: 100413.
- [8] DURGE A V, SARKAR S, SINGHAL R S. Stability of anthocyanins as pre-extrusion colouring of rice extrudates [J]. Food Research International, 2013, 50(2): 641-646.
- [9] OBRADOVIC V, BABI J, UBARI D, et al. Influence of dried Hokkaido pumpkin and ascorbic acid addition on chemical properties and color of corn extrudates [J]. Food Chemistry, 2015, 183: 136-143.
- [10] 曾德玉,李京,陈俊宏,等.不同处理方式下膨化玉米粉的冲调性能分析[J].现代食品科技,2022,38(4):182-190.
- [11] 戴晓慧,张名位,马永轩,等.蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺改善速食米粉冲调分散性和预消化性[J].现代食品科技,2020,36(10):200-209,156.
- [12] 赵志浩,刘磊,张名位,等.预酶解-挤压膨化对全谷物糙米粉品质特性的影响[J].食品科学,2019,40(1):108-116.
- [13] 肖家喜,段映羽,张瑞芬,等.酶解耦合挤压膨化处理改善山药粉冲调性和预消化性的工艺优化[J].现代食品科技,2023,39(4):163-171.
- [14] 赵悦,李加双,谭瑶瑶,等.不同加工程度大米制备的米粉特性及营养品质比较[J].现代食品科技,2019,35(4):87-95.
- [15] PAIVA F F, VANIER N L, BERRIOS J D, et al. Physicochemical and nutritional properties of pigmented rice subjected to different degrees of milling [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2014, 35(1): 10-17.
- [16] FINOCCHIARO F, FERRARI B, GIANINETTI A, et al. Characterization of antioxidant compounds of red and white rice and changes in total antioxidant capacity during processing [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2007, 51(8): 1006-1019.
- [17] DEWANTO V, WU X Z, ADOM K K, et al. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(10): 3010-3014.
- [18] JIA Z S, TANG M C, WU J M. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals [J]. Food Chemistry, 1999, 64(4): 555-559.
- [19] KELLY L W, LIU R H. Apple peels as a value-added food ingredient [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,

- 2003, 51(6): 1676-1683.
- [20] KRAITHONG S, LEE S, RAWDKUEN S. Physicochemical and functional properties of Thai organic rice flour [J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 79: 259-266.
- [21] SUN X, YU C, FU M, et al. Extruded whole buckwheat noodles: effects of processing variables on the degree of starch gelatinization, changes of nutritional components, cooking characteristics and *in vitro* starch digestibility [J]. *Food Funct*, 2019, 10(10): 6362-6373.
- [22] DUTTA H, PAUL S K, KALITA D, et al. Effect of acid concentration and treatment time on acid-alcohol modified jackfruit seed starch properties [J]. *Food Chemistry*, 2011, 128(2): 284-291.
- [23] PERRY P A, DONALD A M. The effect of sugars on the gelatinisation of starch [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2002, 49(2): 155-165.
- [24] 吴卫国,杨伟丽,唐书泽,等. 主要几种配料对挤压膨化早餐谷物挤压特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2005, 20(4): 54-59, 64.
- [25] RASHID M T, LIU K L, HEN S. Nutritional composition and volatile compounds stability in dry-heat and extruded stabilised rice bran during storage [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2023, 58(6): 3379-3391.
- [26] 郭新月,张美莉. 挤压膨化对燕麦麸皮物理特性的影响[J]. *食品科技*, 2021, 46(8): 134-140.
- [27] 靳灿灿,温纪平,朱慧雪. 小麦糊粉层粉的挤压稳定化处理条件优化[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(1): 15-21.
- [28] CUI W S, ZHAO X H. Composition and activity changes of the soluble water and ethanol extracts from white mulberry (*Morus alba* L.) fruits in response to thermal treatment [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(2): 838-848.
- [29] WANG L, TIAN Y P, CHEN Y X, et al. Effects of acid treatment on the physicochemical and functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber [J]. *Cereal Chemistry*, 2021, 99(2): 343-354.
- [30] MENG X M, LIU F, XIAO Y, et al. Alterations in physicochemical and functional properties of buckwheat straw insoluble dietary fiber by alkaline hydrogen peroxide treatment [J]. *Food Chemistry*, 2019, 3: 100029.
- [31] MEZA S L R, MASSARETTO IL, SINNECKER P, et al. Impact of thermoplastic extrusion process on chemical, nutritional, technological and sensory properties of gluten-free breakfast cereals from pigmented rice [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 56(7): 3218-3226.
- [32] ACOSTA-ESTRADA B A, GUTIERREZ-URIBE J A, SERNA-SALDIVAR S O, et al. Bound phenolics in foods, a review [J]. *Food Chemistry*, 2014, 152: 46-55.
- [33] KUMAR K, JINDAL N, SHARMA S, et al. Physico-chemical and antioxidant properties of extrudates developed from honey and barley [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2013, 48(8): 1750-1761.
- [34] JOUBERT E, VILJOEN M, DE B D, et al. Use of green rooibos (*Aspalathus linearis*) extract and water-soluble nanomicelles of green rooibos extract encapsulated with ascorbic acid for enhanced aspalathin content in ready-to-drink iced teas [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2010, 58(20): 10965-10971.
- [35] XIE J, LIN Y S, SHI X J, et al. Mechanochemical-assisted extraction of flavonoids from bamboo (*Phyllostachys edulis*) leaves [J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 43: 276-282.
- [36] BRIGGS J, CHAOVANALIKIT A, DOUGHERTY M P, et al. Ascorbic acid fortification reduces anthocyanins in extruded Blueberry-Corn cereals [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 68(6): 2136-2140.