

# 发酵小米体外胃肠消化特性及抗氧化活性

吴慧琳, 李苗云, 朱瑶迪, 赵改名, 高浩源, 肖康, 任宏荣, 赵莉君

(河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002)

**摘要:** 以小米酸肉中辅料小米为研究对象, 分析辅料小米餐后血糖变化及模拟胃肠消化过程中消化率、粒径变化及抗氧化活性的变化。结果表明: 随餐后时间的延长, 血糖值在 0~30 min 时先增加, 大于 30 min 迅速降低, 餐后 240 min 时血糖值为 22.79 dl/mg 基本稳定, 与 300 min 时血糖值 23.42 dl/mg 无显著差异 ( $p < 0.05$ ), 样品在分别经口腔、胃、小肠消化的过程中, 随消化过程的进行产物粒径逐渐减小, 蛋白质及脂肪消化率逐渐增加, 消化至胃肠阶段时蛋白质消化率为 69.45%、脂肪消化率为 29.88%, 在抗氧化试验中, 随消化的进行多酚及多肽含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 最高为 6.06 mg/100 g, 多肽含量最高为 5.21 mg/mL; 随消化的进行抗氧化能力逐渐增加, 消化液中 -OH 自由基清除率最大值为 81.63%、DPPH 自由基清除率最大值为 78.12%、ABTS 清除率最大值为 7.62%。综合分析, 辅料小米较小米对照样品餐后血糖偏低, 蛋白质、脂肪消化率高, 同时辅料小米多酚、多肽含量及抗氧化活性 (-OH 及 DPPH 自由基清除率、ABTS 清除率) 均比小米对照样品高, 为小米发酵类产品的开发提供基础, 而对小米发酵类产品营养健康方面有待进一步研究。

**关键词:** 酸肉辅料小米; 消化; 多酚; 多肽; 抗氧化性

文章编号: 1673-9078(2020)11-154-162

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.11.0419

## *In Vitro* Gastrointestinal Digestibility and Antioxidant Activity of Fermented Millet

WU Hui-lin, LI Miao-yun, ZHU Yao-di, ZHAO Gai-ming, GAO Hao-yuan, XIAO Kang, REN Hong-rong, ZHAO Li-jun

(School of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**Absrtact:** Taking millet (sour meat's excipient) as the research object, the changes of postprandial glucose as well as the digestibility, particle size and antioxidant activity of millet during the simulated gastrointestinal digestion were analyzed. The results showed that with the prolongation of postprandial time, the blood glucose level first increased within 0~30 min, then decreased rapidly after 30 min. The postprandial blood glucose level after 240 min was basically stable (22.79 dl/mg, which was insignificantly ( $p > 0.05$ ) different from the blood glucose level at 23.42 dl/mg after 300 min. With the progress of digestion of the sample through the oral cavity, stomach and small intestine, the particle size of the product decreased gradually, whilst the digestibility of protein and fat increased gradually (the digestion rate of protein was 69.45% and digestion rate of fat was 29.88% when the digestion reached the gastrointestinal stage). In the antioxidant tests, the contents of polyphenols and polypeptides increased significantly with the progress of digestion ( $p < 0.05$ ), with the highest content of polyphenols as 6.06 mg/100 g, and the highest content of polypeptides as 5.21 mg/mL. The antioxidant capacity increased gradually with the progress of digestion. The maximum scavenging rates of OH radical, DPPH radical and ABTS radical in the digestive juice were 81.63%, 78.12% and 7.62%, respectively. Comprehensive analysis showed that compared with the rice control sample, the excipient millet had a low postprandial blood glucose, higher

引文格式:

吴慧琳,李苗云,朱瑶迪,等.发酵小米体外胃肠消化特性及抗氧化活性[J].现代食品科技,2020,36(11):154-162

WU Hui-lin, LI Miao-yun, ZHU Yao-di, et al. *In vitro* gastrointestinal digestibility and antioxidant activity of fermented millet [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(11): 154-162

收稿日期: 2020-05-07

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2018YFD0401200); 国家自然科学基金项目 (31571856); 省高校创新人才计划 (18HASTIT036); 国家现代农业产业体系建设项目 (CARS-37)

作者简介: 吴慧琳 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全

通讯作者: 李苗云 (1976-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 肉类加工与产品质量安全控制技术

protein and fat digestion rates, while having higher polyphenol and polypeptide contents and antioxidant activities (OH, DPPH and ABTS radical scavenging rates). These results provide a basis for the development of millet fermented products, and further studies are needed on the nutrition and health of millet fermented products.

**Key words:** millet as sour meat's excipient; digestion; polyphenols; polypeptides; antioxidant

小米酸肉是我国少数民族地区的特色发酵肉制品,以猪肉为主料,小米、食盐为辅料,在厌氧条件下发酵而成。发酵过程中蛋白质、脂肪等大分子在微生物作用下降解成小分子肽类、脂肪酸等成分<sup>[1]</sup>。

小米是一种营养价值很高的药食两用杂粮<sup>[2]</sup>。发酵是食品加工常用的方法之一,占食物供应的20%~40%<sup>[3]</sup>,也是最简单经济提高食物营养价值、感官特性和功能品质的方法,具有降低抗营养因子水平,引起产品理化性质的改变的作用<sup>[4]</sup>。发酵可显著提高小米蛋白消化率,提高营养价值,改善口感及风味<sup>[5]</sup>。例如,珍珠粟面团的自然发酵降低了多酚和植酸的含量,增加蛋白质的消化率<sup>[6]</sup>。烘焙制品的面团经发酵后可降低血糖反应,提高膳食纤维复合物和植物性化学成分的生物利用度,增加矿物质吸收<sup>[7]</sup>。寇芳等<sup>[8]</sup>研究发现自然发酵的小米具有抗老化、营养价值高,易消化吸收的特点,谷物发酵过程中菌株主要为乳酸菌和酵母。发酵过程中释放肽及氨基酸、游离酚类具有调节葡萄糖代谢的作用,使餐后血糖降低的功效。生物活性肽被定义为对身体功能具有积极影响的特定蛋白片段,主要是通过蛋白酶、微生物或植物蛋白质水解释放的营养物质,具有清除自由基,抗氧化,免疫调节,降低胆固醇等作用<sup>[9,10]</sup>,随发酵时间的延长不断增加<sup>[11]</sup>。刘剑利等<sup>[12]</sup>采用碱性蛋白酶水解小米蛋白,酶解后小米多肽对超氧阴离子自由基( $O_2^{\cdot-}$ )、DPPH自由基和羟自由基(-OH)清除率较高,表明酶解小米肽具有较好的抗氧化活性。HIMANI等<sup>[13]</sup>应用猪胰蛋白酶水解小米碱溶蛋白制备的抗氧化肽具有较好的DPPH自由基、-OH自由基、2,2'-联氮-双3-乙基苯并噻唑啉6-磺酸(ABTS)自由基清除能力等生理活性。研究表明,不同蛋白酶对蛋白质的酶解具有特异性,蛋白质在多种复合酶作用下生物活性明显高于对应的单酶水解物<sup>[14-16]</sup>,目前对小米的酶解大多采用单酶法,对复合酶制作小米肽的研究及发酵小米活性成分有待进一步研究。

生物利用度是指消化后的化合物或营养物质通过胃肠道上皮细胞膜被吸收利用的量。食物中的酚类与生物大分子结合变得不可溶,使其在消化道内不能被吸收,例如酚类-蛋白质复合物会降低蛋白溶解性,抑制蛋白酶活性。酚类物质具有抗氧化、清除自由基、抗癌等多种生理功能<sup>[17,18]</sup>。田志琴<sup>[19]</sup>研究表明小米多

酚对DPPH自由基、ABTS自由基均有较好的清除能力。利用酶法来辅助提取多酚具有较好的效果<sup>[20,21]</sup>。魏春红<sup>[22]</sup>等利用木瓜蛋白酶与 $\alpha$ -淀粉酶复合提取小米多酚,酶解组较未添加酶组多酚含量增加0.88 mg/g, DPPH自由基清除率增加6.91%。Amadou Issoufou等<sup>[23]</sup>研究发现,发酵对小米营养成分具有较好的改善作用,发酵小米具有天然的抗氧化、抗菌作用,发酵小米经蛋白酶解后水解物与未经蛋白酶解后相比,具有较高的DPPH自由基清除率。机体摄入食物后,生物活性成分会在胃肠道消化过程中发生降解或转化,使一部分营养物质不能够被机体完全吸收<sup>[24]</sup>。因此,采用体外模拟胃肠消化方法研究食物中功能性成分的吸收会更接近人体的营养物质利用情况,更能反映食物在人体内消化情况。

目前对发酵小米的研究主要集中在菌株的分离鉴定<sup>[8,25]</sup>、发酵小米产品的研发<sup>[26-28]</sup>及发酵对小米淀粉结构特性的影响<sup>[2,29]</sup>,对自然发酵小米模拟体外消化过程中消化特性、消化过程中消化产物抗氧化活性的研究鲜见报道。模拟体外胃肠消化具有操作简便、成本较低、人性化等优点。因此,本实验采用体外模拟人体胃肠消化的方法,研究小米酸肉中辅料小米在不同消化阶段消化特性及抗氧化活性的变化。以期科学评价发酵小米及小米酸肉的营养价值及抗氧化活性提供参考,为研究发酵对小米制品营养品质评价提供良好的理论及数据支持,同时对发酵小米的未来加工和技术研究提供基础理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

盐酸(优级纯)、30%过氧化氢(分析纯),洛阳昊华化学试剂有限公司;氯化亚铁,天津市光复精细化工研究所;菲洛嗪(分析纯),生工生物工程股份有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、5,5'-二硫双(2-硝基苯甲酸)(DTNB)、乙二胺四乙酸、硫酸亚铁、酒石酸钾钠、1,10-菲啰啉、无水乙醇、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、N-(1-萘基)乙二胺盐酸盐、亚硝酸钠、4-氨基苯磺酸均为分析纯,国药集体化学试剂有限公司;1:10000胃蛋白酶,北京Solarbio科技有限公司;胰蛋白酶、胆汁提取液,美国sigma-P1750;

没食子酸, 科邦生物工程有限公司。

GI20 体外模拟消化系统, 澳大利亚/Nutra Scan; N-1100 旋转蒸发器, 上海爱郎仪器有限公司; SHB-III 循环水式多用真空泵, 郑州长城科工贸有限公司; AE224 电子天平, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; FSP-625 匀浆机; UV-2600 紫外可见分光光度计, 岛津分析仪器有限公司; Rise-2008 激光粒度仪, 济南润之科技有限公司。

## 1.2 酸肉样品的制备

小米酸肉加工流程:

原料肉(五花肉)→清洗沥水→预煮→冷却→切块(3×2×1 cm)→加去杂小米, 食盐混匀→装坛→密封发酵 120 d→成品  
取酸肉表面小米辅料于-20 °C 冰箱中保存备用。

## 1.3 体外消化模拟及血糖测定

### 1.3.1 试剂的配置

模拟唾液 (SSF): 37.3 g/L KCl 15.1 mL, 68 g/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3.7 mL, 84 g/L NaHCO<sub>3</sub> 6.8 mL, 30.5 g/L MgCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O) 60.5 mL, 48 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0.06 mL, 6 M HCl 0.09 mL, 44.1 g/L CaCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 0.025 mL。

模拟胃液 (SGF): 37.3 g/L KCl 6.9 mL, 68 g/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.9 mL, 84 g/L NaHCO<sub>3</sub> 12.5 mL, 117 g/L NaCl 11.8 mL, 30.5 g/L MgCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O) 60.4 mL, 48 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0.5 mL, 6 M HCl 1.3 mL, 44.1 g/L CaCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 0.005 mL, 使用 HCl 调节 pH=2.0。

模拟肠液 (SIF): 37.3 g/L KCl 6.8 mL, 68 g/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.8 mL, 84 g/L NaHCO<sub>3</sub> 42.5 mL, 117 g/L NaCl 9.6 mL, 30.5 g/L MgCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O) 61.1 mL, 6 M HCl 0.7 mL, 44.1 g/L CaCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 0.04 mL, 使用 NaOH 调节 pH 至 7.0。

### 1.3.2 模拟体外消化过程<sup>[30]</sup>

口腔: 5 g 食物+4 mL SSF, 0.3 M CaCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> 0.025 mL, 10 mg/mL 胆汁 0.75 mL, 0.225 mL H<sub>2</sub>O, 75 U/mL 唾液淀粉酶 (100 U/mg), 使用口腔模拟器模拟咀嚼 2 min, 充分破碎后放于 GI-20 体外胃肠模拟器。

胃: 向模拟口腔的 10 mL 口腔消化物中加 8 mL SGF, 0.3 M CaCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> 0.005 mL, 2000 U/mL 胃蛋白酶 (3000 U/mg), 60 U/mL 胃脂肪酶 (25 U/mg), 0.448 mL H<sub>2</sub>O, 5 M HCl 0.4 mL, 200 r/min, 37 °C 恒温孵育 2 h。反应结束将样品于沸水浴灭酶活 10 min, 进行消化特性 (消化率及粒径)、抗氧化特性分析, 每个样品重复 3 次, 小肠模拟前产物样品为相同操作。

小肠: 取 20 mL 胃消化物, 8 mL SIF, 0.3 M

CaCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> 0.04 mL, 100 U/mL 胰蛋白酶 (6 U/mg), 10 mM 胆汁盐 3 mL, 3.16 mL H<sub>2</sub>O, 5 M NaOH 0.8 mL, 200 r/min, 37 °C 恒温孵育 2 h。反应结束利用葡萄糖分析仪对样品进行餐后血糖值测定, 测定胃肠消化后酸肉辅料小米、小米对照及空白对照在餐后 0~300 min 内血糖变化值。将样品于沸水浴灭酶活 10 min, 进行消化特性 (消化率及粒径)、抗氧化特性分析, 每个样品重复 3 次。

## 1.4 消化产物粒径的测定

使用 Rise-2008 激光粒度仪测定消化后均质产物的粒径<sup>[31]</sup>, 分别测定未处理的样品、胃蛋白酶消化产物和胃蛋白酶/胰蛋白酶消化产物的粒径, 折射率实部 1.76, 虚部 0.05, 颗粒密度 1 g/cm<sup>3</sup>; 介质为乙醇, 介质折射率为 1.33。获得的数据为: Dx (10) 表示样品中有 10% 的颗粒粒径小于该值; Dx (50) 表示样品中有 50% 的颗粒粒径小于该值; Dx (90) 表示样品中有 90% 的颗粒粒径小于该值; D3,2 表示占表面积的平均直径, D4,3 表示占体积的平均直径。同一样品, 平行测定 3 次, 每次测试采集 10 次数据。

## 1.5 蛋白质及脂肪消化率的测定

在这项研究中, 消化率测定胃蛋白质消化产物及胃胰蛋白酶消化产物蛋白质、脂肪前后含量。每个测试取 5 g 酸肉样品, 每种酸肉进行 3 次平行测定, 按上述消化过程进行。蛋白质含量测定参考 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》, 索式提取法测定脂肪含量。体外消化率由下式计算。

$$DT(\%) = \frac{W_0 - W_D}{W_0} \times 100\%$$

其中: DT 表示不同酶液消化后蛋白质/脂肪消化率, W<sub>0</sub>、W<sub>D</sub> 分别代表消化前和消化后样品蛋白含量/脂肪含量。

## 1.6 多酚含量的测定

总酚含量测定采用 Folin-Ciocalteu 法<sup>[32]</sup>, 以没食子酸为标准品绘制标准曲线。取 1 mL 蒸馏水, 加入 0.5 mL 样品, 加 0.5 mL Folin-Ciocalteu 试剂, 摇匀后加 5 mL 7% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液, 避光反应 90 min 于 760 nm 处测定吸光值。多酚含量以 mg 没食子酸当量/100 g 样液质量。

## 1.7 多肽含量的测定

参考 Church<sup>[33]</sup>等方法, 利用双缩脲法测定多肽含量。以标准牛血清蛋白绘制标准曲线  $Y=0.0341+0.0027X$ , R<sup>2</sup>=0.9987。取 0.5 mL 样品液, 加 0.5 mL 10%

三氯乙酸溶液, 混匀, 静置反应 5 min, 4 °C 4000 r/min 离心 15 min, 上清液转移至 10 mL 容量瓶定容至刻度; 取 3.0 mL 溶液加 2.0 mL 双缩脲试剂 (双缩脲试剂 A: 双缩脲试剂 B=3:1), 摇匀, 静置反应 10 min, 2000 r/min 离心 15 min, 上清液于 540 nm 处测定吸光度值, 计算样品液多肽含量 (mg/mL)。

### 1.8 抗氧化活分分析

#### 1.8.1 清除羟自由基的测定

参考 YangHsin-ling 等<sup>[34]</sup>方法, 取 1.0 mL 邻二氮菲溶液 (1.865 mmol/L), 加入 2 mL 磷酸盐缓冲 (0.2 mol/L, pH=7.4) 和 1 mL 样品溶液, 混匀后加 1.0 mL FeSO<sub>4</sub> 溶液 (1.865 mmol/L), 摇匀后加 1.0 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (0.03%), 37 °C 恒温水浴 60 min 后, 于 536 nm 测定吸光度值 A 样品; 以蒸馏水代替样品, 测定吸光度值为 A 损伤; 以蒸馏水替代 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 及样品, 测定吸光度值 A 未损伤。羟自由基清除率按公式计算:

$$-\text{OH} \text{ 自由基清除率 } (\%) = \frac{(A_{\text{样品}} - A_{\text{损伤}})}{(A_{\text{未损伤}} - A_{\text{损伤}})} \times 100\%$$

#### 1.8.2 DPPH 自由基清除率的测定

参考 SheihChuan 等<sup>[35]</sup>的方法。分别取 2 mL DPPH 0.2 mM (以 95%乙醇溶解) 置于试管, 加入 2.0 mL 样品液及对照溶液, 混匀, 避光反应 30 min, 于 517 nm 测定样品吸光度 A 样品, 同时以 2.0 mL 95%乙醇加 2.0 mL 样品作空白对照 A 空白, 2.0 mL DPPH 自由基溶液加 2.0 mL 95%乙醇为对照 A 对照, DPPH 清除率按公式计算。

$$\text{DPPH 清除率 } (\%) = \left[ 1 - \frac{(A_{\text{样品}} - A_{\text{空白}})}{(A_{\text{对照}} - A_{\text{空白}})} \right] \times 100\%$$

#### 1.8.3 ABTS 清除率的测定

参考张巧明等<sup>[36]</sup>方法, ABTS<sup>+</sup>工作液的配置: 取 50 mL ABTS (2 mmol/L) 溶液与 200 mL K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 水溶液 (70 mmol/L) 混匀, 避光放置 12~16 h 后, 用磷酸盐缓冲 (0.2 M, pH=7) 稀释至 A=734 nm 下吸光度为 0.70±0.02。

0.5 mL 样品液加 2.5 mL 的 ABTS<sup>+</sup>工作液摇匀后于 30 °C 下孵育 6 min, A<sub>745 nm</sub> 测定吸光值 A<sub>1</sub>。以 0.5 mL 甲醇代替样品液作对照, 测定吸光值为 A<sub>2</sub> 为。样品对 ABTS<sup>+</sup>清除率按公式计算:

$$\text{ABTS 自由基清除率 } (\%) = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \times 100\%$$

### 1.9 数据处理

数据采用平行测定 3 次, 结果以平均值±标准差表示。血糖变化数据采用 Excel 进行统计分析, Origin 8.0 进行数据整理及作图分析; 粒径大小、多酚、多肽含量及抗氧化活性等数据采用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析和 Duncan's 多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 体外消化模拟过程中血糖变化

1981 年多伦多大学 Jenkins<sup>[37]</sup>博士首次提出血糖生成指数 (Glycemic Index, GI) 的概念, 用于衡量人体摄入碳水化合物后血糖浓度变化的指标。血糖生成指数指摄入 50 g 可利用的碳水化合物, 餐后 2 h 内血糖应答曲线面积与含等量可利用碳水化合物的标准食品餐后血糖应答曲线面积之比。根据血糖生成指数可将食品分为三类: 低 GI (GI≤55); 中 GI (55<GI≤70); 高 GI (GI>70)。

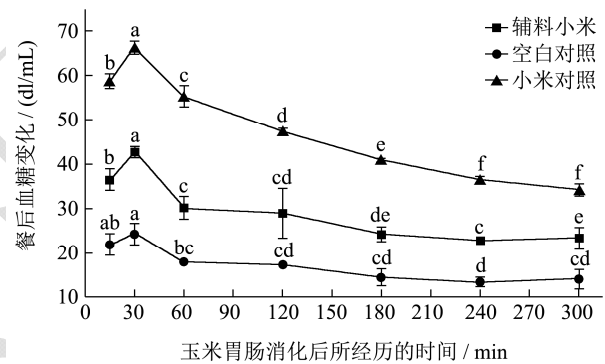


图 1 酸肉辅料小米胃肠消化餐后血糖变化

Fig.1 Changes of blood sugar after gastrointestinal digestion of millet, an acid meat adjunct

注: 同组数据小写字母不同表示差异显著, p<0.05。

酸肉辅料小米餐后血糖变化如图 1 所示, 胃肠消化后 15 min 时, 酸肉辅料小米、小米对照及空白对照的 GI 值分别为 36.52、58.60、21.92 dl/mg, 随着时间的延长血糖值先升高, 后逐渐降低, 当胃餐消化时间大于 180 min 时血糖值基本稳定。且血糖值体现为小米对照>辅料小米>空白对照, 至消化后 300 min 时血糖值表现为 34.27 (小米对照)>14.2 (辅料小米)>23.42 (空白对照), 表明辅料小米较正常小米对餐后血糖的变化较小, 适宜糖尿病等慢性病人食用。韩玲玉<sup>[38]</sup>等分析测定 7 种谷物血糖生成指数, 结果表现为小米血糖的生成血糖指数最高, GI=82.49, 表现为小米>豌豆>藜麦>绿豆>燕麦>青稞>薏苡, 与本实验测定餐后 15 min 时血糖值相同, 属于中 GI 食物。丁慧等<sup>[39]</sup>利用荞麦复配米饭, 发现荞麦与米饭复配可有效调节餐后血糖升高水平, 使 GI 值降低 30.9%。Srikaeo 等<sup>[40]</sup>研究

发现米粉中直链淀粉含量与其对应的血糖生成指数呈显著负相关。脂肪酶和蛋白酶在酶解过程中淀粉与蛋白酶发生结合，从而降低了直链淀粉含量，使血糖值

得以降低。

## 2.2 体外消化模拟过程中粒径大小变化

表 1 辅料小米体外消化粒径大小

Table 1 *In vitro* digestible granule size of millet auxiliary materials

消化阶段	分类	Dx(10)/ $\mu\text{m}$	Dx(50)/ $\mu\text{m}$	Dx(90)/ $\mu\text{m}$	D3,2/ $\mu\text{m}$	D4,3/ $\mu\text{m}$
S1	辅料小米	74.60±0.92 <sup>a</sup>	108.76±0.96 <sup>a</sup>	146.59±0.85 <sup>c</sup>	110.32±0.89 <sup>b</sup>	0.07±0.00 <sup>b</sup>
	小米对照	70.44±0.08 <sup>d</sup>	109.71±0.10 <sup>a</sup>	147.85±0.10 <sup>a</sup>	110.48±0.10 <sup>b</sup>	0.07±0.00 <sup>b</sup>
S2	辅料小米	73.68±2.52 <sup>ab</sup>	111.29±0.72 <sup>b</sup>	149.35±0.48 <sup>b</sup>	112.44±1.04 <sup>b</sup>	0.06±0.00 <sup>c</sup>
	小米对照	50.40±0.62 <sup>d</sup>	105.35±0.23 <sup>d</sup>	145.22±0.17 <sup>d</sup>	145.22±0.17 <sup>d</sup>	0.07±0.00 <sup>a</sup>
S3	辅料小米	68.50±0.05 <sup>b</sup>	109.72±0.03 <sup>abc</sup>	147.80±0.01 <sup>ab</sup>	110.10±0.03 <sup>b</sup>	0.07±0.00 <sup>d</sup>
	小米对照	78.52±0.26 <sup>a</sup>	112.96±0.11 <sup>ab</sup>	150.32±0.09 <sup>a</sup>	114.62±0.13 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>e</sup>

注：同列字母不同，表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

在体外消化过程中，辅料小米在分别经口腔、胃、小肠消化处理后，粒径数值结果如表 1 所示，随消化的进行粒径呈现明显的减小趋势。辅料小米与小米对照在分别经口腔 (S1)、胃 (S2)、小肠 (S3) 不同程度的消化后呈显著差异，在经口腔 (S1)、胃 (S2)、小肠 (S3) 不同程度的消化过程中，辅料小米及小米对照的粒径表面积 (D3,2) 由口腔 (S1) 阶段的 110.32  $\mu\text{m}$ 、110.48  $\mu\text{m}$  增大至胃 (S2) 阶段的 112.44  $\mu\text{m}$ 、145.22  $\mu\text{m}$ ，到小肠 (S3) 减小为 110.10  $\mu\text{m}$ 、114.62  $\mu\text{m}$ ；辅料小米的粒径体积 (D4,3) 由口腔 (S1) 阶段的 0.07  $\mu\text{m}$  减小至胃 (S2) 阶段的 0.06  $\mu\text{m}$ ，小肠 (S3) 增大至 0.07  $\mu\text{m}$ 。胃 (S2) 消化阶段辅料小米的粒径数值均大于小米对照，与张诗雯<sup>[41]</sup>等研究芹菜茎、芹菜叶对鱼肉香肠模拟体外消化后蛋白质聚集体粒径的影响结果一致。

## 2.3 体外消化模拟过程中蛋白质、脂肪消化率的测定

表 2 辅料小米胃及胃肠蛋白质、脂肪消化率的比较

Table 2 Comparison of digestibility of protein and fat in stomach and gastrointestinal of millet excipients

指标	分类	S2	S3
蛋白质 消化率/%	辅料小米	44.41±2.50	69.45±1.25
	小米对照	23.66±0.12	38.25±1.74
脂肪 消化率/%	辅料小米	24.48±2.74	29.88±0.40
	小米对照	9.23±0.35	13.35±2.87

由表 2 可知：辅料小米在分别经胃 (S2) 中胃蛋白酶、小肠 (S3) 中胰蛋白酶酶解后，胃消化阶段 (S2) 辅料小米蛋白质消化率为 44.41%，脂肪消化率为 24.48%，在小肠 (S3) 酶解消化后蛋白质消化率为 69.45%，脂肪消化率为 29.88%。蛋白质及脂肪消化率

均表现为小肠胰蛋白酶消化后消化率大于胃蛋白酶消化后的消化率，同时与对照组相比，辅料小米的蛋白质消化率及脂肪消化率均高于小米对照，说明小米经发酵后蛋白质及脂肪等发生降解，使其更有利用发生酶解，消化率更高。结果表明小米经发酵后较正常小米营养价值明显增加。蛋白消化率的变化与<sup>[42]</sup>徐婧婷等研究小米乳与大豆乳结果一致，蛋白质经胃蛋白酶消化及胃蛋白酶-胰蛋白酶的联合消化其消化率明显增加 15.0%。

## 2.4 体外消化模拟过程中抗氧化活性比较分析

研究发现，自由基的过剩与人类大多数疾病的发生有关。因此，研究具有清除自由基功能的抗氧化食品已经成为热点。人体内许多生化反应会伴随着自由基的产生，数量过多会与体内脂肪酸、蛋白质等发生反应，破坏相关细胞的功能和结构，引发机体衰老，成为癌症、动脉粥样硬化等疾病的诱因<sup>[43]</sup>。-OH 及 DPPH 自由基清除率和 ABTS+ 被广泛用于模拟人体自由基和食品抗氧化能力的测定。

表 3 辅料小米各阶段消化产物多酚及多肽含量分析

Table 3 Analysis of polyphenols and polypeptides in digestive products of millet accessories at different stages

抗氧化指标	分类	S1	S2	S3
多酚含量 (mg/100 g)	辅料小米	2.23±0.07 <sup>c</sup>	4.82±0.02 <sup>b</sup>	6.06±0.04 <sup>a</sup>
	小米对照	1.05±0.04 <sup>e</sup>	3.19±0.06 <sup>b</sup>	3.81±0.23 <sup>a</sup>
多肽 (mg/mL)	辅料小米	1.95±0.02 <sup>c</sup>	3.10±0.05 <sup>b</sup>	5.21±0.06 <sup>a</sup>
	小米对照	1.16±0.10 <sup>e</sup>	2.72±0.10 <sup>b</sup>	3.93±0.19 <sup>a</sup>

注：同行字母不同，表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。表 4 同。

小米含丰富的多酚类物质，表 3 为辅料小米在模拟体外消化过程中消化液中多酚及多肽含量的变化，赵旭等<sup>[44]</sup>研究发现，消化对谷物酚类物质具有显著的影响。由表 3 可知，辅料小米在分别经口腔 (S1)、

胃 (S2)、小肠 (S3) 不同程度的消化后, 多酚含量分别为 2.23 mg/100 g (S1)、4.82 mg/100 g (S2)、6.06 mg/100 g (S3); 多肽含量分别为 1.95 mg/mL (S1)、3.10 mg/mL (S2)、5.21 mg/mL (S3), 均表现为口腔 <胃 < 小肠, 随消化过程的进行辅料小米多酚、多肽含量均显著增加 ( $p < 0.05$ ), 随消化的进行体系中酶的种类及酶量逐渐增多, 多酚含量逐渐增加, 这与吕俊丽<sup>[45]</sup>、魏春红<sup>[22]</sup>等研究结论基本一致, 同时, 大分子蛋白酶解越完全, 产生的活性肽越多, 活性越强, 这与帖余<sup>[44]</sup>、成希飞<sup>[46]</sup>、黄金梅<sup>[16]</sup>等的研究结论一致。

辅料小米在在分别经口腔 (S1)、胃 (S2)、小肠 (S3) 3 个阶段不同程度的消化后-OH 自由基清除率、

DPPH 自由基清除率及 ABTS 清除率如表 4 所示。由表 4 可知, 辅料小米在分别经口腔 (S1)、胃 (S2)、小肠 (S3) 消化后, -OH 自由基清除率分别为 52.91% (S1)、70.37% (S2)、81.63% (S3), 随消化的进行, -OH 自由基清除率逐渐增大, 且不同消化阶段其-OH 自由基清除率存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 经胃肠消化的溶液-OH 自由基清除率为 81.63%, 表现为最高, 与正常小米相比, 辅料小米的 OH 自由基清除率高于对照组, 辅料小米较经胃肠消化后的正常小米 OH 自由基增加 63.27%。这与马艺超<sup>[47]</sup>等研究苦荞面包在消化过程中 OH 自由基变化规律一致, 表现为随消化的进行, -OH 自由基清除率逐渐增大。

表 4 辅料小米各阶段消化产物抗氧化活性分析

Table 4 Antioxidant activity analysis of digestive products in different stages of millet accessories

抗氧化指标	分类	S1	S2	S3
OH 自由基清除率/%	辅料小米	52.91±0.59 <sup>c</sup>	70.37±0.07 <sup>b</sup>	81.63±1.41 <sup>a</sup>
	小米对照	36.11±1.45 <sup>c</sup>	44.14±2.05 <sup>b</sup>	51.65±1.15 <sup>a</sup>
DPPH 自由基清除率/%	辅料小米	41.99±1.54 <sup>c</sup>	64.11±2.35 <sup>b</sup>	78.12±0.72 <sup>a</sup>
	小米对照	34.05±0.62 <sup>c</sup>	47.46±1.12 <sup>b</sup>	61.11±0.86 <sup>a</sup>
ABTS 自由基清除率/%	辅料小米	2.95±0.04 <sup>c</sup>	5.49±0.24 <sup>b</sup>	7.62±0.42 <sup>a</sup>
	小米对照	2.52±0.03 <sup>c</sup>	4.69±0.28 <sup>b</sup>	5.33±0.10 <sup>a</sup>

辅料小米在分别经口腔 (S1)、胃 (S2)、小肠 (S3) 消化后, DPPH 自由基清除率分别为 41.99% (S1)、64.11% (S2)、78.12% (S3), 随消化的进行, DPPH 自由基清除率逐渐增大, 且不同消化阶段其 DPPH 自由基清除率存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 经胃肠消化的溶液 DPPH 自由基清除率为 78.12%, 表现为最高, 与正常小米相比, 辅料小米的 DPPH 自由基清除率高于对照组, 辅料小米较经胃肠消化后的正常小米 DPPH 自由基增加 78.23%。

辅料小米在分别经口腔 (S1)、胃 (S2)、小肠 (S3) 消化后, ABTS 清除率分别为 2.95% (S1)、5.49% (S2)、7.62% (S3), 随消化的进行, ABTS 清除率逐渐增大, 且不同消化阶段其 ABTS 清除率存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 经胃肠消化的溶液 ABTS 清除率为 7.62%, 表现为最高, 与正常小米相比, 辅料小米的 ABTS 清除率高于对照组, 辅料小米较经胃肠消化后的正常小米 ABTS 清除率增加 69.95%。田志琴<sup>[19]</sup>研究表明小米多酚对 DPPH 自由基、ABTS 自由基、超氧阴离子自由基均有较好的清除能力, 抗氧化剂浓度越高, 自由基的清除率能力越大, 多酚类存在类似现象。徐元元等<sup>[48]</sup>比较分析了 6 种常见杂粮和 2 种主粮总酚含量与抗氧化活性相关性, 结果表明抗氧化活性与总酚含量之间具有良好的线性关系。刘剑利等<sup>[12]</sup>采用碱性蛋白酶酶解小米蛋白为活性肽, 活性肽对超氧阴离子自由

基 ( $O_2^{\cdot-}$ )、DPPH 及-OH 自由基的清除率均表现较高, 说明其酶解产物肽具有良好的抗氧化活性。HIMANI 等<sup>[49]</sup>利用猪胰蛋白酶酶解小米蛋白获得抗氧化活性肽。Baublis 等<sup>[50]</sup>研究发现谷物在胃酸和胃肠消化酶作用下总抗氧化活性有显著提高。综合相关研究报道, 均与本文结论存在相似之处。

### 3 结论

3.1 谷物因全面的营养价值和保健功能倍受消费者的青睐, 本实验通过体外模拟消化法, 对小米酸肉中的辅料小米在胃肠模拟消化过程中消化特性及抗氧化活性变化进行研究。本实验结果表明: 餐后血糖变化表现为随餐后时间的延长, 血糖值在 0~30 min 时先增加, 大于 30 min 迅速降低, 餐后 240 min 时血糖值基本稳定, 为 22.79 dl/mg, 与 300 min 血糖值 23.42 dl/mg 无显著差异 ( $p > 0.05$ )。在消化过程的 3 个阶段中, 随消化的进行消化产物粒径经逐渐减小, 在口腔及胃消化阶段中, 与正常小米对照组相比, 辅料小米消化产物粒径均大于正常小米消化产物粒径; 而在经肠道酶解后消化产物粒径大小表现为正常小米对照大于辅料小米粒径。在胃肠消化过程中蛋白质及脂肪在酶的作用下发生降解, 生成小分子肽、氨基酸及游离脂肪酸等, 随消化过程在胃、肠的进行蛋白质消化率、脂肪消化率逐渐增加, 与正常小米对照组相比, 辅料小米的蛋

白消化率及脂肪消化率均高于正常小米组, 导致其差异的原因可能是因为辅料小米在发酵过程中微生物的分解使其内部大分子蛋白、脂肪降解, 在后期消化过程酶促作用下, 加速降解速度, 使其消化率增大。在抗氧化试验中, 随消化的进行多酚及多肽含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 消化过程中酶的种类及酶量逐渐增多, 大分子物质酶解越完全, 产生的酚及肽类越多。辅料小米样品抗氧化活性-OH·清除率、DPPH<sup>+</sup>清除率及ABTS<sup>+</sup>清除率在消化过程中随消化过程的进行显著增加, 并与消化过程中蛋白消化率及脂肪消化率呈显著正相关, 且与正常小米对照相比显著增大。

3.2 目前关于食品抗氧化性的报道大都为利用有机试剂提取样品中活性成分, 比较分析食物中活性成分的氧化活性, 类似的分析结果与人体胃肠液作溶剂产生的消化物的活性比较结果存在较大差异<sup>[51]</sup>。虽然对于谷物食品营养保健功能的研究较多, 但对于发酵谷物食品的抗氧化功能却鲜有报道。模拟体内营养成分的消化吸收, 其结果更接近生理变化, 对探究食品在生理消化过程中活性变化具有重要意义, 为体内试验提供参考。

3.3 本实验通过模拟体外胃肠消化过程, 分析比较小米酸肉中辅料小米在胃肠消化过程中消化特性及抗氧化特性变化规律, 研究发酵小米在人体消化过程中消化特性及抗氧化活性的变化规律, 从健康营养及抗氧化的角度分析了发酵小米, 同时为小米酸肉的辅料提供更好的利用价值, 也对发酵小米的未来加工和技术研究提供基础理论依据。但结果与体内复杂环境中的变化是否保持一致仍需进一步的进行动物或人体观察研究。因此后期可对辅料小米中酚及肽类生理生化活性进行动物验证分析。

## 参考文献

- [1] Silva S V, Malcata F X. Caseins as source of bioactive peptides [J]. *International Dairy Journal*, 2005, 15(1): 1-15
- [2] 靳志强, 陈艳彬, 王玺. 湿热处理和发酵对小米营养生物可给性及淀粉消化性的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 177-186  
JIN Zhi-qiang, CHEN Yan-bin, WANG Xi. Effects of wet heat treatment and fermentation on bioavailability of millet nutrients and starch digestibility [J]. *Chinese Journal of Food*, 2019, 19(12): 177-186
- [3] Aukam K C, Reid G. African traditional fermented foods and probiotics [J]. *Journal of Medicinal Food*, 2009, 12(6): 1177-1184
- [4] Devisetti R, Yadahally S N, Bhattacharya S. Nutrients and antinutrients in foxtail and proso millet milled fractions: Evaluation of their flour functionality [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(2): 889-895
- [5] 袁美兰, 鲁战会, 程永强, 等. 自然发酵对米粉 RVA 黏度性质及米粉拉伸性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2008, 1: 6-9  
YUAN Mei-lan, LU Zhan-hui, CHENG Yong-qiang, et al. Effects of Natural Fermentation on RVA viscosity and tensile properties of rice noodles [J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2008, 1: 6-9
- [6] Selma H A Elyas, Abdullahi H El Tinay, Nabila E Yousif, et al. Effect of natural fermentation on nutritive value and in vitro protein digestibility of pearl millet [J]. *Food Chemistry*, 2002, 78(1): 75-79
- [7] Marco Gobetti, Carlo G Rizzello, Raffaella Di Cagno, et al. How the sourdough may affect the functional features of leavened baked goods [J]. *Food Microbiology*, 2014, 37: 30-40
- [8] 寇芳, 李文杰, 沈蒙, 等. 小米自然发酵菌株的鉴定及发酵菌株特性分析[J]. *中国生物制品学杂志*, 2017, 30(9): 931-935, 942  
KOU fang, LI Wen-jie, SHEN Meng, et al. Identification of millet natural fermentation strain and analysis of fermentation strain characteristics [J]. *Chinese Journal of Biologicals*, 2017, 30(9): 931-935, 942
- [9] Samaranyaka A G P, Li-Chan E C Y. Food-derived peptidic antioxidants: A review of their production, assessment, and potential applications [J]. *Journal of Functional Foods*, 2011, 3(4): 229-254
- [10] Sánchez, Adrián, Vázquez, Alfredo. Bioactive peptides: A review [J]. *Food Quality & Safety*, 2017, 1(1): 29-46
- [11] Kitts David D, Weiler Katie. Bioactive proteins and peptides from food sources, applications of bioprocesses used in isolation and recovery [J]. *Current pharmaceutical design*, 2003, 9(16): 1309-1323
- [12] 刘剑利, 曹向宇. 小米多肽的制备及其抗氧化功能研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(8): 64-67  
LIU Jian-li, CAO Xiang-yu. Preparation of millet polypeptide and its antioxidant function [J]. *Food Science*, 2009, 30 (8): 64-67
- [13] Agrawal H, Joshi R, Gupta M. Isolation, purification and characterisation of antioxidative peptide of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) protein hydrolysate [J]. *Food Chemistry*, 2016, 204: 365-372
- [14] 帖余, 刘军, 李丽, 等. 两步法制备菜粕肽及提高蛋白溶解度工艺[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(16): 143-147

- TIE Yu, LIU Jun, LI Li, et al. Two-step process for preparation of rapeseed meal peptide and improvement of protein solubility [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45 (16): 143-147
- [15] 成希飞,杨沙,陈果,等.两种酶水解制备丝素肽的抗菌性及对人胚肾细胞的毒性分析[J].食品与发酵工业,2019,45(6): 115-121
- CHENG Xi-fei, YANG Sha, CHEN Guo, et al. Antimicrobial activity of silk fibroin peptides prepared by enzymatic hydrolysis and toxicity analysis on human embryonic kidney cells [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45 (6): 115-121
- [16] 黄金梅,胡居吾,高红,等.米渣肽双酶两步水解法制备过程中物化特性与结构变化[J].食品与发酵工业,2019,45(16): 32-39
- HUANG Jin-mei, HU Ju-wu, GAO Hong, et al. Physical and chemical characteristics and structural changes during the preparation of rice residue peptide by two-step enzymatic hydrolysis [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45 (16): 32-39
- [17] 王若兰,田志琴,李东岭,等.微波辅助提取小米中多酚类活性物质的研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2010, 31(6):15-20
- WANG Ruo-lan, TIAN Zhi-qin, LI Dong-ling et al. Study on microwave extraction of bioactive polyphenol compound from foxtail millet [J]. Journal of Henan University of Technology ( Natural Science Edition), 2010, 31(6): 15-20
- [18] Yu-Hsiu Tseng, Joan-Hwa Yang, Hui-Ling Chang, et al. Antioxidant properties of methanolic extracts from monascus adlay [J]. Food Chemistry, 2006, 97(3): 375-381
- [19] 田志琴.小米多酚类活性物质的提取及抗氧化性研究[D].郑州:河南工业大学,2011
- TIAN Zhi-qin. The studies on extraction and antioxidant activities of foxtail millet polyphenol [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011
- [20] 李淳,李双石,兰蓉,等.酶法提取葡萄藤茎中多酚物质含量的比较研究[J].酿酒科技,2015,7:38-40
- LI Wei, LI Shuang-shi, LAN Rong, et al. Comparative study on enzymatic extraction of polyphenols from grapevine stem [J]. Brewing Science and Technology, 2015, 7: 38-40
- [21] 李存芝,欧仕益,周琪,等.薏米及发芽薏米酶解抗氧化活性变化[J].食品工业科技,2011,1:100-103
- LI Cun-zhi, OU Shi-yi, ZHOU Qi, et al. Changes in enzymatic antioxidant activity of coix seed and germinated coix seed [J]. Food Industry Science and Technology, 2011, 1: 100-103
- [22] 魏春红,何丽娜,丁闻浩,等.酶法辅助提取小米多酚的工艺研究[J].中国粮油学报,2019,34(1):93-98
- WEI Chun-hong, HE Li-na, DING Wen-hao, et al. Study on enzymatic assisted extraction of polyphenols from millet [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2019, 34(1): 93-98
- [23] Issoufou A.发酵小米多肽的抗氧化与抗菌活性的研究[D].无锡:江南大学,2014
- Issoufou A. Study on antioxidant and antibacterial activities of fermented millet polypeptides [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014
- [24] 倪香艳,钟葵,佟立涛,等.糙米体外消化过程中酚类物质含量及抗氧化活性[J].食品科学,2018,39(16):105-111
- NI Xiang-yan, ZHONG Kui, TONG Li-tao, et al. Phenolic substance content and antioxidant activity of brown rice during *in vitro* digestion [J]. Food Science, 2018, 39 (16): 105-111
- [25] 张桂英,朱静,张喜文,等.小米发糕发酵剂中乳酸菌的筛选及其在小米发糕中的应用[J].中国粮油学报,2019,34(12): 78-86
- ZHANG Gui-ying, ZHU Jing, ZHANG Xi-wen, et al. Screening of lactic acid bacteria in starter of millet Haifa cake and its application in millet Haifa cake [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2019, 34(12): 78-86
- [26] 李长见.抗氧化小米发酵饮料的研制[J].饮料工业,2017, 20(6):27-30
- LI Chang-jian. Preparation of antioxidant millet fermented beverage [J]. Beverage Industry, 2017, 20(6): 27-30
- [27] 徐杨郁青,董颖辰,郭赵瑞,等.小米糯米酒酿造工艺及抗氧化性[J].食品工业,2019,40(3):139-142
- XU YANG Yu-qing, DONG Ying-chen, GUO Zhao-rui, et al. Brewing technology and antioxidant activity of millet glutinous rice wine [J]. Food Industry, 2019, 40(3): 139-142
- [28] 宋忠励.小米乳酸菌发酵饮料的研制[D].晋中:山西农业大学,2018
- SONG Zhong-li. Preparation of millet lactic acid bacteria fermented beverage [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2018
- [29] 寇芳,康丽君,沈蒙,等.发酵处理对小米粉物化特性的影响[J].中国生物制品学杂志,2017,30(6):600-606
- KOU Fang, KANG Li-jun, SHENG Meng, et al. Effect of fermentation on physicochemical properties of millet flour [J]. Chinese Journal of Biologicals, 2017, 30(6): 600-606
- [30] Brodkorb A, Egger L, Alminger M, et al. Infogest static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature



- Protocols, 2019, 14: 991-1014
- [31] JIANG Shui, XIA Dong, ZHANG Dan-ni, et al. Analysis of protein profiles and peptides during *in vitro* gastrointestinal digestion of four Chinese dry-cured hams [J]. LWT, 2020,120
- [32] GUO Xu-Dan, WU Chun-Sen, MA Yu-Jie, et al. Comparison of milling fractions of tartary buckwheat for their phenolics and antioxidant properties [J]. Food Research International, 2012, 49(1): 53-59
- [33] Church Frank C, Swaisgood Harold E, Porter David H, et al. Spectrophotometric assay using o-phthalaldehyde for determination of proteolysis in milk and isolated milk proteins [J]. Journal of Dairy Science, 1983, 66(6): 1219-1227
- [34] YANG Hsin-ling, CHEN Ssu-ching, Senthil Kumar K J, et al. Antioxidant and anti-inflammatory potential of hesperetin metabolites obtained from hesperetin-administered rat serum: An *ex vivo* approach [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(1): 522-532
- [35] Sheih I C, Wu T K, Fang T J. Antioxidant properties of a new antioxidative peptide from algae protein waste hydrolysate in different oxidation systems [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(13): 3419-3425
- [36] 张巧明, 龚明贵. 白果总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2014, 39(9): 231-234  
ZHANG Qiao-ming, GONG Ming-gui. Study on optimization of extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from *Ginkgo biloba* [J]. Food Science and Technology, 2014, 39(9): 231-234
- [37] Jenkins D J, Wolever T M, Taylor R H, et al. Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1981, 34(3): 362-366
- [38] 韩玲玉. 多谷物共挤压加工对其物化及消化特性影响研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.  
HAN Ling-yu. Effect of multi-grain co-extrusion processing on its physico-chemical and digestive properties [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [39] 丁慧, 彭晴, 乔宇, 等. 富含荞麦碱米饭的配方筛选及其对血糖生成指数的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(1): 42-54  
DING Hui, PENG Qing, QIAO Yu, et al. Formula selection of rice rich in buckwheat alkali and its effect on blood glucose index [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(1): 42-54
- [40] Khongsak Sriakao, Janya Sangkhiaw. Effects of amylose and resistant starch on glycaemic index of rice noodles [J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 59(2): 1129-1135
- [41] 张诗雯. 芹菜对鱼糜制品凝胶品质及体外消化特性的影响 [D]. 锦州: 渤海大学, 2019  
ZHANG S W. Effect of celery on gel quality and *in vitro* digestibility of surimi products [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019
- [42] 徐婧婷, 刘思思, 刘贺, 等. 小米蛋白的营养消化性研究[J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(4): 15-20  
XU Jing-ting, LIU Si-si, LIU He, et al. Study on nutritional digestibility of millet protein [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 32(4): 15-20
- [43] 解温品, 秦士新. 自由基医学研究进展[J]. 中华损伤与修复杂志, 2012, 7(2): 194-196  
XIE Wen-pin, QIN Shi-xin. Research progress of free radical medicine [J]. Chinese Journal of Injury and Repair, 2012, 7(2): 194-196
- [44] 王月华, 李斌, 孟宪军, 等. 模拟体外消化对蓝莓果提取物花色苷组成及抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(19): 100-105  
WANG Yue-hua, LI Bin, MENG Xian-jun, et al. Effects of simulated *in vitro* digestion on anthocyanin composition and antioxidant capacity of *Lonicera edulis* extract [J]. Food Science, 2016, 37(19): 100-105
- [45] 吕俊丽, 游新勇, 任志龙, 等. 酶解水溶剂法提取苜蓿多酚的工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 11: 123-127  
LYU Jun-li, YOU Xin-yong, REN Zhi-long, et al. Study on extraction of polyphenols from naked oats by enzymatic hydrolysis water solvent method [J]. Journal of China Cereals and Oils, 2017, 11: 123-127
- [46] 成希飞, 杨沙, 陈果, 等. 两种酶水解制备丝素肽的抗菌性及对人胚肾细胞的毒性分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(6): 119-125  
CHENG Xi-fei, YANG Sha, CHEN Guo, et al. Antimicrobial activity of silk fibroin peptides prepared by enzymatic hydrolysis and toxicity analysis on human embryonic kidney cells [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(6): 119-125
- [47] 马艺超, 路飞, 马凤鸣, 等. 体外模拟消化对苦荞面包黄酮及抗氧化的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(9): 20-27  
MA Yi-chao, LU Fei, MA Feng-ming, et al. Effects of simulated digestion on flavonoids and antioxidation in tartary buckwheat bread [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2019, 34(9): 20-27