3种食物多酚抑制α-葡萄糖苷酶活性评价及在低eGI米线中的应用分析

刘菲[1]，肖毓[1]，付湘晋[1*]，刘春[1]，肖华西[1]，谢尚君[2]

（1.中南林业科技大学食品科学与工程学院，湖南长沙 410004）

（2.洞口尚君生态农业科技有限公司，湖南邵阳 422300）

摘要：活性多酚能够通过抑制 α-葡萄糖苷酶的活性，减慢淀粉消化，可用于加工低血糖生成指数（Glycaemic Index, GI）米线。为了测定多酚提取物对 α-葡萄糖苷酶的抑制率，将石榴皮多酚、葡萄皮多酚与陈皮多酚提取物添加到米线中，测定了米线血糖生成预测指数（estimate Glycemic Index, eGI）、蒸煮品质及感官品质。结果表明：石榴皮多酚、葡萄皮多酚和陈皮多酚提取物对 α-葡萄糖苷酶的抑制率分别是 76.86%、67.91% 和 74.30%；当米线中石榴皮多酚、葡萄皮多酚与陈皮多酚提取物的质量分数为 1.00%、2.00%、5.00% 时，米线的 eGI 值从 80.00 分别降低到 50.05、61.32、53.52；感官评分从 73.10 分别升高到 77.90、75.00、80.10；且米线断条率从 17.10% 分别降低到 9.87%、12.13%、10.97%；蒸煮损失从 27.96% 分别降低至 18.77%、23.36%、23.02%；所以，添加多酚提取物并未对米线的质构品质产生不良影响，同时提升了米线的感官品质和蒸煮品质。该研究为食物多酚在低 eGI 米线加工中的应用提供了数据支持和指导。

关键词：食物多酚；eGI；α-葡萄糖苷酶；米线；质构品质

文章编号：1673-9078(2025)10-196-203 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0898

Evaluation of α-glucosidase Inhibitory Activities of Three Kinds of Food Polyphenols and Analysis of Their Applications in Low eGI Rice Noodles

LIU Fei[1], XIAO Yu[1], FU Xiangjin[1*], LIU Chun[1], XIAO Huaxi[1], XIE Shangjun[2]

(1. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)(2. Dongkou Shangjun Ecological Agriculture Technology Co. Ltd., Shaoyang 422300, China)

Abstract: Active polyphenols can slow down starch digestion by inhibiting the activity of α-glucosidase, and can be used in the production of low Glycemic Index (GI) rice noodles. In order to determine the inhibition rates of polyphenol extracts against α-glucosidase, pomegranate peel polyphenol, grape skin polyphenol, and tangerine peel polyphenol extracts were added to rice noodles. The estimate Glycemic Index (eGI), cooking quality, and sensory quality of the rice noodles were determined. The results showed that the inhibition rates of pomegranate peel polyphenol, grape skin polyphenol, and tangerine peel polyphenol extracts against α-glucosidase were 76.86%, 67.91%, and 74.30%, respectively. When the mass fractions of these polyphenol extracts in the rice noodles were 1.00%, 2.00%, and 5.00%, the eGI values of the rice noodles decreased from 80.00 to 50.05, 61.32, and 53.52,

引文格式：

刘菲,肖毓,付湘晋,等.3种食物多酚抑制α-葡萄糖苷酶活性评价及在低eGI米线中的应用分析[J].现代食品科技,2025,41(10):196-203.

LIU Fei, XIAO Yu, FU Xiangjin, et al. Evaluation of α-glucosidase inhibitory activities of three kinds of food polyphenols and analysis of their applications in low eGI rice noodles [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 196-203.

收稿日期：2024-06-25；修回日期：2024-10-17；接受日期：2024-10-21

基金项目：国家自然科学基金面上项目（32372412）；长沙市重大专项（kh2003013）

作者简介：刘菲（2000-），女，硕士研究生，研究方向：食品加工与安全，E-mail：2807935248@qq.com

通讯作者：付湘晋（1980-），男，博士，教授，研究方向：粮油深加工和食品风味研究，E-mail：drxjfu@163.com

respectively; The sensory scores increased from 73.10 to 77.90, 75.00, and 80.10, respectivel;. The breakage rates of the rice noodles decreased from 17.10% to 9.87%, 12.13%, and 10.97%, respectively, and the cooking losses decreased from 27.96% to 18.77%, 23.36%, and 23.02%, respectively. Therefore, the addition of polyphenol extracts did not adversely affect the textural quality of rice noodles, while improving their sensory and cooking qualities. This study provides data support and guidance for the application of food polyphenols in the processing of low-GI rice noodles.

Key words: food polyphenols; estimate Glycemic Index; α-glucosidase; rice noodles; texture quality

米线是中国南方及一些东南亚国家深受喜爱的主食食品[1]，其原料主要是籼米。成品涵盖了从新鲜到干燥、冷冻等多种形态和规格[2]。米线口感爽滑，易于消化，但普遍具有较高的血糖生成指数值（Glycemic Index, GI）。目前，鉴于长期摄入高 GI（＞70）食品对血糖控制的负面影响，特别是糖尿病人口的增加[3]，市场对低 GI 主食的需求呈现上升趋势。减缓米线在消化过程中葡萄糖释放速率，加工低 eGI 米线成为研究热点。

血糖生成预测指数（eGI）是用来预测食物中碳水化合物引起血糖反应的指标。目前已有许多通过添加低 eGI 食物原料或添加外源活性物质来开发低 eGI 食品的研究[4]。Li 等[5]将含有大量多酚的抹茶添加到米线中，将米线的 eGI 值从 84.78 降低到 68.34。刘璐[6]将不同杂豆添加对糙米米线中，发现其将糙米米线的 eGI 值从 75.24 降低到 62.28。但这些研究均未达到低血糖指数食品的要求（＜55）。

大量研究表明，多酚类物质可通过减缓 α-葡萄糖苷酶与 α-淀粉酶的活性，延缓碳水化合物消化，达到降低 eGI 值的效果[7,8]。本研究组前期通过食品多酚数据库及网络药理学分析，认为石榴皮、葡萄皮与陈皮多酚提取物可能具有较高的 α-葡萄糖苷酶的抑制率，且具有价格低廉、安全性高等优势。因此本文选定这三种食物多酚进行研究。测定了多酚提取物对 α-葡萄糖苷酶的抑制率，将多酚提取物添加入米线中，并测定多酚米线的 eGI 值、蒸煮品质及感官品质。以期为开发低 eGI 米线新产品提供科学指导。通过开发低 eGI 米线新产品，提高米线附加值，可以满足市场对低 eGI 米线健康食品的需求，并在预防糖尿病中发挥积极作用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

白面包、大米粉：于湖南长沙市天心区购置。

石榴皮多酚提取物，西安隆泽生物工程有限责任公司；葡萄皮多酚提取物，连云港百牧生物工程有限责任公司；陈皮多酚提取物，河南龙腾生物工程有限公司。各多酚提取物以 50% 酒精为提取剂提取，再干燥而得。

福林酚定量试剂盒，北京鼎国昌盛生物技术有限责任公司；α-葡萄糖苷酶、胰 α-淀粉酶，上海瑞永生物科技有限公司，AR；糖化酶，上海瑞永生物科技有限公司，AR；乙酸、无水碳酸钠、溴化钾、乙酸钠、酒石酸钾钠、3,5-二硝基水杨酸、氢氧化钠、苯酚，上海国药集团化学试剂有限公司，AR。

1.2 仪器与设备

DNM-9602 酶标仪，北京普朗新技术有限公司；TG25KR 高速冷冻离心机，东旺仪器；BluestarB 紫外可见分光光度计，北京莱伯泰科仪器股份有限公司；TA-XT plus-41249 质构仪，Stable Micro Systems。

1.3 方法

1.3.1 总酚含量测定

采用福林酚定量试剂盒的方法，以没食子酸作为标准品绘制标准曲线，测定多酚提取物总酚含量。该含量表示每克干质量样品中所含没食子酸的质量，单位为 mg/g。多酚含量计算公式：

$$W=\frac{CV}{m} \quad (1)$$

式中：

W——总酚含量，mg/g；

C——提取液中总酚的质量浓度，mg/mL；

V——总酚提取液体积，mL；

m——多酚样品的质量，g。

1.3.2 α-葡萄糖苷酶抑制活性测定

参照潘玥[9]的方法并作出修改。配制多酚质量浓度为 1、5、10、20、30 μg/mL 的食物多酚提取物，pH 值 6.8 的 0.1 mol/L 的磷酸盐缓冲液，1.26 U/mL 的 α-葡萄糖苷酶的酶溶液和 6 mmol/L 的 pNPG 进行 α-葡萄糖苷酶抑制实验。设置实验组（0.05 mL 抑制剂 + 0.05 mL 酶溶液）、实验空白组（0.05 mL PBS+0.05 mL 抑制剂）、对照组（0.05 mLPBS+0.05 mL 酶溶液）、空白组（0.10 mL PBS）。按照分组，平行操作三次，在

96孔板中进行反应。样品进行水浴（37 ℃，10min）后，然后每孔加入 0.1 mL 的 pNPG 试剂，继续水浴 1 h 后，加入 1 mol/L 的 Na_2CO_3 终止反应，在 400 nm 下测吸光度，根据公式进行计算抑制率。

根据抑制率与多酚提取物浓度关系，计算半抑制浓度 IC_{50} 值。

$$IR=(1-\frac{OD_A-OD_a}{OD_B-OD_b})\times100\% \quad (2)$$

式中：

IR——α-葡萄糖苷酶抑制率，%；

OD_A——实验组吸光值；

OD_a——实验空白组吸光值；

OD_B——对照组吸光值；

OD_b——空白组吸光值。

1.3.3 米线制作

参照文献方法[10]并做出一定改进：称取 50 g 大米粉，与多酚提取物混匀，加入 60 mL 蒸馏水搅拌均匀，在水浴锅中搅拌加热 8 min，使大米粉糊化，糊化后的大米粉揉捏成型，使用面条机挤压成 2.5 mm 圆柱状米线。将米线放入蒸笼中蒸 210 s，冷却；置于恒温恒湿箱（温度 25 ℃，湿度 90%）中老化 8 h，得到多酚米线。

1.3.4 米线eGI值测定

参考 Frei 等[11]的方法并作出修改。称取 100 mg 的样品，加入蒸馏水 2 mL，然后将样品放置于 50 mL 离心管中，水浴（100 ℃，15 min）使样品糊化，再添加 13 mL pH 值 5.2 的 0.20 mol/L 乙酸缓冲液，继续水浴（37 ℃，10 min）平衡，再加 0.2 mL 混合酶液（胰 α-淀粉酶 400 U/mL，糖化酶 20 U/mL），在 37 ℃恒温水浴下振荡（转速为 150 r/min）。振荡反应时间设置为 0、30、60、90、120、180 min 后分别取 0.10 mL 上清液经沸水浴 5 min 灭酶处理后以 3 835×g 离心 5 min。取一定量稀释后的溶液加 1 倍的 DNS 试剂沸水浴 5 min，再加 8 倍的蒸馏水于 540 nm 下测吸光度，绘制淀粉水解曲线。

参考 Goni 等[12]的方法进行血糖生成预测指数值的计算：

$$HR=\frac{(m_2-m_1)\times0.9}{m} \quad (3)$$

葡萄糖含量与样品质量的单位均为 mg，通过产品水解速率计算 eGI 值。

$$eGI=39.27+0.803\times HR_{90} \quad (4)$$

式中：

HR——水解速率；

m——测试样品质量，mg；

m_1——初试时间点样品的葡萄糖含量，mg；

m_2——取样时间点样品的葡萄糖含量，mg；

HR_{90}——90 min 取样时样品的水解速率；

eGI——血糖生成指数值。

1.3.5 米线质构品质测定

米线的质构特性参照史韬琦[13]和 Jia 等[14]的方法加以修改后测定。将 3 个均装有 50 mL 水的烧杯同时置于同一电炉上加热。水沸腾后，将 9 根长度均为 3 cm 的米线放入，煮制 6 min。立即倒出烧杯中的沸水，并用冷水对米线进行 30 s 的快速冲淋，充分降温。随后将米线放置在滤纸上，吸去水分，然后将其平铺在检测台上准备进行测定。测定时，选取 3 根米线，并按照相同的间距摆放。在 TPA 模式下，使用 P 36/R 探头进行测定，设置 70% 的压缩比，测前速度 1 mm/s、测中速度 1 mm/s、测后速度 2 mm/s 的参数。同时设置 5 g 的触发力，500 pps 的参数获取速率，确保测定结果的精确性。

1.3.6 米线感官评价

参照 LS/T 6137-2020《米粉条食用品质感官评价方法》进行[15]。煮制米线，冷水冲淋 30 s 后进行评价。选取 15 名研究生进行感官评定，对米线的滋味、色泽、口感、香气以及表观状态进行评定，并绘制感官雷达图。感官评价表见表 1。

表 1 感官评价表

Table 1 Sensory evalu ation table

项目	评分标准	分值
滋味（20 分）	入嘴有浓烈的大米香气	16~20
	入嘴香气较淡	11~15
	入嘴无香气或有异味	0~10
色泽（20 分）	色泽均匀有光泽	16~20
	色泽较均匀，较有光泽	11~15
	颜色出现分层，光泽黯淡	0~10
口感（20 分）	咀嚼爽口，不粘牙	16~20
	咀嚼较爽口，较粘牙	11~15
	咀嚼不爽口，粘牙	0~10
香气（20 分）	闻起来有强烈的大米香气	16~20
	闻起来有轻微大米香气	11~15
	闻起来无香气或有异味	0~10
表观状态（20 分）	表面平整光滑	16~20
	表面较平整光滑，出现小孔洞	11~15
	表面出现较大孔洞	0~10

1.3.7 米线的白度测定

按 GB/T 22427.6-2008 执行。色泽测定步骤如下：

米线→切成 5 cm 小段→铺满皿底→色差计→测定样品的 L^*、a^*、b^* 值→计算白度

$$W=100\sqrt{(100-L^*)^2+(a^*)^2+(b^*)^2} \quad (5)$$

式中：

W——白度；

L^*—— 明度；

a^* 和 b^*——色度，由色差计直接读出。

1.3.8 米线的蒸煮品质测定

1.3.8.1 米线的断条率测定

断条率参照梁钦梅等[16]的实验方法并做出修改。选择 35 根长度为 10 cm 的米线，置于沸水中煮 6 min，滤去汤汁，过冷水，滤干，记录断条数（n）。米线的断条率 X 即为：

$$X=\frac{n}{35}\times 100\% \quad (6)$$

1.3.8.2 米线的蒸煮损失以及吸水性测定

米线的吸水率和蒸煮损失率测定参考金茂国等[17]的方法并做出修改。取 20 根称重后的米线样品，记为 m_1；将米线放入烧开的水中煮制 6 min 后，将烧杯中的水倒出，立即用冷水进行 30 s 的冲淋。随后，使用专用吸水纸轻轻吸去米线表面的多余水分，并进行质量称量，记录下此时的质量为 m_2。然后，将米线放入热风干燥箱中，在 105 ℃的温度下烘干至恒重状态，并记录下此时的质量为 m_3。米线的水分含量记为 W。

$$L=\frac{m_2-m_1(1-W)}{m_1(1-W)}\times 100\% \quad (7)$$

$$P=\frac{m_1(1-W)-m_3}{m_1(1-W)}\times 100\% \quad (8)$$

式中：

L——吸水率，%；

P——蒸煮损失率，%；

m_1——煮前米线的质量，g；

m_2——煮后米线的质量，g；

m_3——煮后米线的干重，g；

W——米线水分含量，%。

1.3.9 数据处理与绘图

实验数据采用 Excel 软件与 SPSS 22.0 进行整理分析，采用 Origin 2021 与 Graph Pad Prism 8 软件进行绘图，比较各组数据差异显著性（$P<0.05$），所有实验重复三次，结果以平均值 ± 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 多酚提取物中的总酚含量

对三种不同的多酚提取物中的多酚含量进行测定，结果见图 1。结果表明：三种多酚提取物的总酚含量由高到低分别为石榴皮、陈皮与葡萄皮多酚提取物，其总酚含量分别为 509.30、501.19 和 436.83 mg/g。三种多酚提取物中总酚含量都较高。

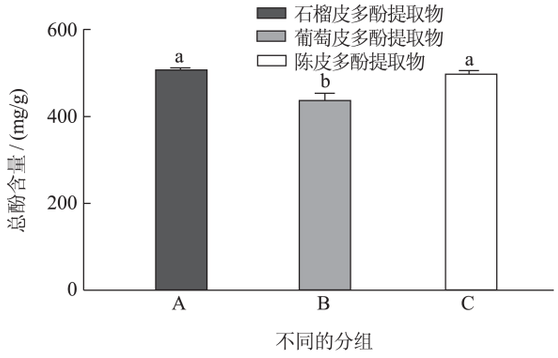


图 1 多酚提取物总酚含量

Fig.1 Total phenol content of polyphenol extract

注：a~b 不同小写字母表示样品间差异显著，$P<0.05$。

2.2 多酚提取物对α-葡萄糖苷酶活性的抑制

各多酚提取物对 α-葡萄糖苷酶抑制活性见图 2。随着多酚浓度的逐步增加，对 α-葡萄糖苷酶的抑制率增加。当质量浓度达到 30 μg/mL 时，抑制率从高到低为石榴皮多酚提取物（86.11%）＞陈皮多酚提取物（82.16%）＞葡萄皮多酚提取物（71.06%）。石榴皮多酚提取物、陈皮多酚提取物和葡萄皮多酚提取物的 IC_{50} 值分别为 7.86、8.73 和 12.66 μg/mL。石榴皮多酚中主要单体是安石榴苷，葡萄皮多酚中主要单体是低聚花青素，陈皮多酚中主要单体是芸香柚皮苷，前期分子对接研究发现，这几个多酚单体可以与 α-葡萄糖苷酶分子形成稳定复合物。多酚对酶的抑制活性主要通过以下两种方式实现：一是阻断酶的活性位点，阻止底物与酶的结合；二是通过氢键、疏水或静电相互作用与酶分子结合，改变酶的空间构象，进而降低其催化活性，干扰底物与酶结合[18]。Jin 等[19]从黑、黄、蓝、紫品种的大麦中制备了多酚提取物，其对 α-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值分别为 7.40、8.30、9.36 和 11.26 mg/g。Kalita 等[20]从紫薯中制备了多酚提取物，其对 α-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值为 42.00 μg/mL。Esposito 等[21]从白茶、乌龙茶和绿茶中制备了多酚提取物，其对 α-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值分别为 42.0、63.1 和 71.60 μg/mL。王倩等[22]从香蕉果肉中制备了多酚提取物，其可以抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性，且质量浓度为 1.00 mg/mL 时，对 α-淀粉酶抑制率为 76.25%，IC_{50} 值为 530.00 μg/mL。Nascimento 等[23]从阿拉比卡咖啡叶中制备了多酚提取物，其对 α-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值为 40.30 μg/mL。与文献中的活性多酚相比，本研究中筛

选到的食物多酚活性更高。并且本研究所用多酚均来源于食品加工副产物，具有价格低廉，原材料易得、安全性高的优点，属于副产物高值化利用，有助于提高整个产业链的附加值[24]。

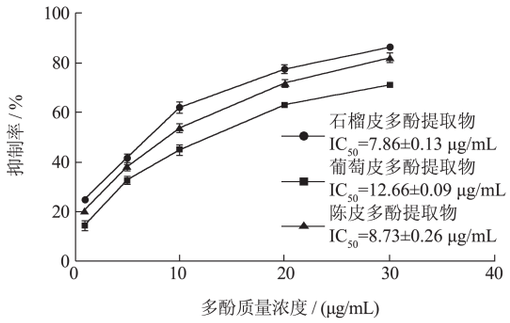


图 2 石榴皮、葡萄皮和陈皮多酚提取物对 α-葡萄糖苷酶活性的影响

Fig.2 Effects of polyphenol extracts from pomegranate peel, grape peel and orange peel on α-glucosidase activity

2.3 食物多酚提取物对米线淀粉水解曲线、eGI值的影响

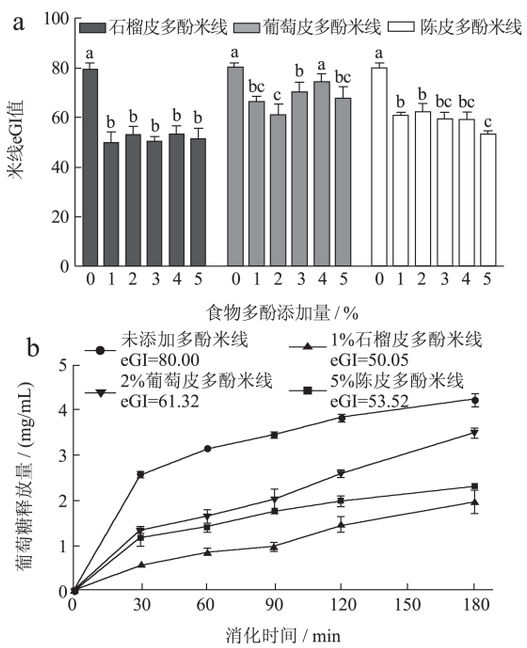


图 3 石榴皮、葡萄皮和陈皮多酚对米线 eGI 值及淀粉水解曲线的影响

Fig.3 Effects of polyphenol extracts from pomegranate peel, grape peel and orange peel on eGI value and starch hydrosis curve

注：a~c 不同小写字母表示同一种多酚米粉不同多酚添加量样品间差异显著，$P<0.05$。

食物多酚添加量对多酚米线淀粉水解曲线和米线 eGI 值的影响见图 3。由图 3a 可知，各食物多酚提取物均能显著降低米线的 eGI 值。多酚提取物添加量不同，米线的 eGI 值有一定差异。石榴皮多酚提取物、葡萄皮多酚提取物、陈皮多酚提取物的最佳质量分数添加量分别是 1.00%、2.00%、5.00%，eGI 值分别为 50.05、61.32、53.52。三种多酚米线中葡萄皮多酚米线效果稍差，可能是因为葡萄皮多酚提取物中的花青素等活性物质在加工过程中发生活性丧失[25]。热处理对花青素的破坏作用很大，米线加工过程涉及 100℃的高温，导致花青素降解[26]。Yang 等[27]发现，黄秋葵（包括原花色素和槲皮素）显示出显著抑制 α-淀粉酶和 α-葡糖苷酶活性的能力，将黄秋葵的种子和木薯淀粉添加到新鲜米线中，发现其将米线的 GI 值从 84.00 降低至 64.00[28]。董志熊[29]将 RS2 抗性淀粉和苦荞粉复配添加到米线中，发现其将米线的 GI 值从 74.32 降低至 54.45，但 RS2 抗性淀粉成本高于本研究所用原料。

由图 3b 可知，添加多酚提取物的米线葡萄糖释放速率显著（$P<0.05$）低于未添加多酚的米线。多酚的添加能够抑制 α-葡萄糖苷酶的活性，从而降低淀粉的水解速率。

2.4 食物多酚提取物对米线质构的影响

将质量占比为 1.00% 石榴皮多酚提取物、2.00% 葡萄皮多酚提取物和 5.00% 陈皮多酚提取物加入米线中，并测定其质构特性。多酚提取物对米线质构的影响可见表 2。质构特性测定结果表明，米线的硬度变化范围为 1 097.60~1 222.62 g，变化不显著（$P>0.05$）。这说明多酚加入米线中没有造成米线老化变硬。添加了多酚提取物后，米线的黏性均发生显著下降（$P<0.05$），其中添加了 1% 石榴皮多酚提取物的米线黏性最低，为 −115.76 g·s。黏性的降低会使米线的口感变得更加顺滑。随着多酚提取物的添加，米线的弹性、胶粘性与耐咀嚼度也发生了显著下降。1.00% 石榴皮多酚提取物的和 2.00% 葡萄皮多酚提取物的耐咀嚼度较高，石榴皮多酚提取物的弹性和胶粘性相对于其他两种多酚更高。弹性、胶粘性和耐咀嚼度最低的为添加了 5% 陈皮多酚的米线，分别为 67.82、524.86 和 339.20。综上所述，三种多酚提取物对米线的硬度影响不大，对黏性、弹性、胶粘性与耐咀嚼度均造成了不同程度的影响，其中以 5% 陈皮多酚提取物对米线造成的影响最大。

表 2 多酚提取物对米线质构的影响

Table 2 Effect of polyphenol extract of pomegranate on the texture of rice noodle

样品	硬度/g	黏性/(g·s)	弹性	胶粘性	耐咀嚼度
A	1 150.63 ± 37.31[a]	−252.29 ± 9.34[c]	88.62 ± 1.84[a]	651.77 ± 8.73[a]	576.07 ± 18.50[a]
B	1 222.62 ± 75.42[a]	−115.76 ± 10.85[b]	79.86 ± 3.05[b]	562.23 ± 12.11[b]	437.33 ± 13.60[b]
C	1 097.60 ± 13.53[a]	−64.89 ± 13.53[a]	68.96 ± 1.87[c]	528.03 ± 26.48[c]	450.86 ± 43.19[b]
D	1 168.83 ± 42.52[a]	−75.29 ± 5.58[a]	67.82 ± 1.40[c]	524.86 ± 17.07[c]	339.20 ± 16.73[c]

注：A 组为未添加多酚提取物的米线，B、C 和 D 分别为添加了 1% 的石榴皮多酚提取物、2% 的葡萄皮多酚提取物和 5% 的陈皮多酚提取物的米线。a~c 不同小写字母表示不同样品间差异显著（$P<0.05$）。

2.5 食物多酚提取物对米线感官品质的影响

将质量占比为 1.00% 石榴皮多酚提取物、2.00% 葡萄皮多酚提取物和 5.00% 陈皮多酚提取物加入米线中，评价其感官品质。多酚提取物对米线感官品质的影响见图 4。由图 4 可知，添加了多酚提取物的米线仍然保持了较好的感官品质，其滋味、色泽、口感、香气与表观状态评分都在 12 分以上。其中感官评分总得分最高的为添加了 5.00% 陈皮多酚的米线，其感官评分总得分为 80.10。以上数据说明多酚提取物并未对米线的感官品质产生较大的负面影响。

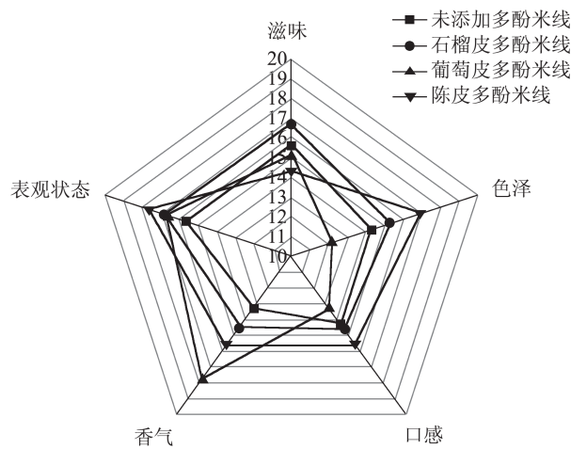


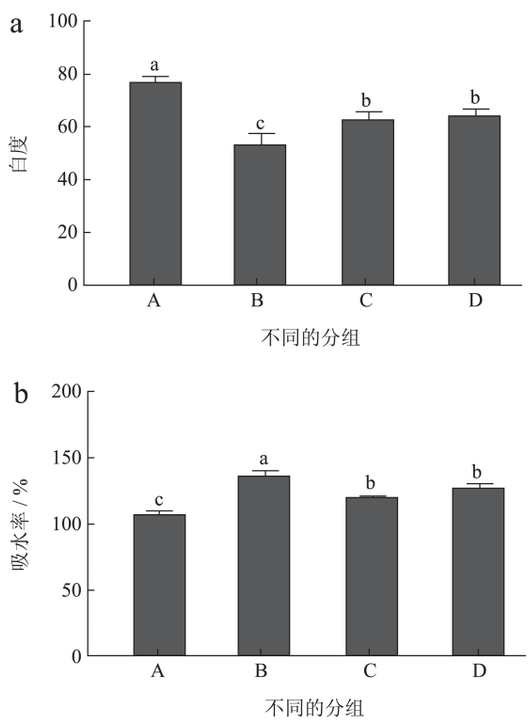
图 4 多酚提取物对米线感官品质的影响

Fig.4 Effect of polyphenol extract on sensory quality of rice noodles

2.6 食物多酚提取物对米线蒸煮品质的影响

将质量占比为 1.00% 石榴皮多酚提取物、2.00% 葡萄皮多酚提取物和 5.00% 陈皮多酚提取物加入米线中，并测定其蒸煮品质，结果见图 5。

由图 5 可知，多酚提取物对米线的白度影响较大。加入石榴皮、陈皮、葡萄皮多酚提取物的米线白度分别从 77.12 降低到 53.93、64.19 和 62.79。发生这一现象的原因可能是因为多酚提取物本身的颜色影响了米线的颜色。这与聂复新等[30]的研究结论相似，加入板栗多酚提取物的冷冻鱼糜制品也会因多酚提取物本身的颜色发生白度降低。米线的吸水率低容易导致硬芯、糊化速度慢、不易煮熟，而吸水率高的米线口感好且易煮熟。多酚提取物能显著提高米线的吸水率。其导致米线吸水率升高的原因可能是多酚类物质与淀粉形成了可以吸收大量水分的络合物[31]。另外，多酚提取物具有降低米线断条率的效果，其中石榴皮多酚提取物的效果最好，将米线的断条率由 17.10% 降低到 9.87%。降低米线的断条率有利于提高米线的品质，节约成本。多酚提取物降低米线断条率的原因可能是多酚类物质与淀粉形成的络合物具有密集的网状结构，从而提高了米线的韧性[32]。多酚提取物还可以降低米线的蒸煮损失。这可能是因为加入多酚提取物后，形成的网状络合物能够延缓老化，限制水分的流动，提高了米线的保水性和韧性，从而降低了蒸煮损失[33]。综上所述，多酚提取物能够明显降低米线的白度，显著提高米线的吸水率，有效地降低米线的断条率及蒸煮损失，提升米线品质。



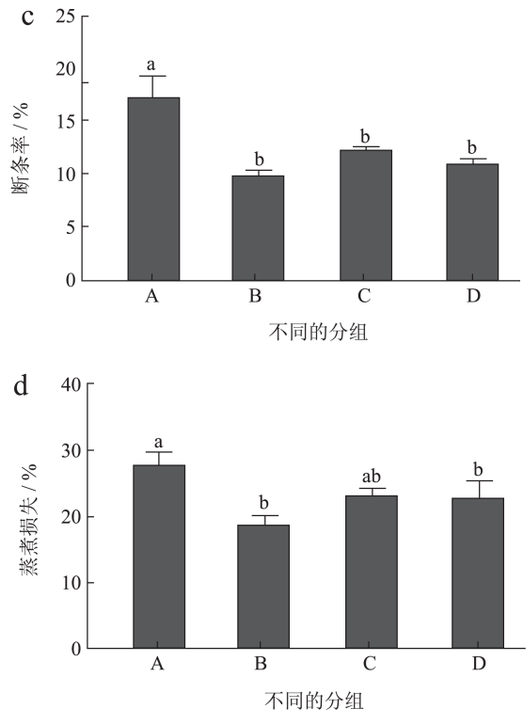


图 5 多酚提取物对米线品质指标的影响

Fig.5 Effect of polyphenol extract on the whiteness of rice noodles

注：a、b、c、d 分别为无添加米线、石榴皮多酚米线、葡萄皮多酚米线、陈皮多酚米线，a~c 不同小写字母表示不同样品间差异显著（$P<0.05$）。

3 结论

石榴皮多酚提取物、陈皮多酚提取物、葡萄皮多酚提取物对 α-葡萄糖苷酶的抑制活性较强，其 IC_{50} 值分别为 7.86、8.73 和 12.66 μg/mL。当米线中石榴皮多酚、葡萄皮多酚与陈皮多酚添加物的添加量为 1.00%、2.00%、5.00% 时，可将米线的 eGI 从 80.00 降低到 50.05、61.32、53.52，并且多酚提取物未对米线的感官品质、蒸煮品质产生明显负面影响。本研究为低 eGI 米线的开发提供了参考，有利于提高米线附加值，也适应了人们对健康主食的新需求。

参考文献

[1] 吴娜娜,乔聪聪,田晓红,等.鲜湿糙米线品质劣变机理及调控技术研究进展[J].粮油食品科技,2023,31(5):83-92.

[2] TONG L T, GAO X X, LIN L Z, et al. Effects of semidry flour milling on the quality attributes of rice flour and rice noodles in China [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 62: 45-49.

[3] 李亚杰,李剑波,莘军龙,等.老年流动人口高血压和糖尿病患病现状及与自评健康的相关性研究[J].中国慢性病预防与控制,2022,30(5):381-384.

[4] GENG D H, ZHANG X J, GAN J, et al. Understanding the texture and digestibility attributes of rice noodles supplemented with common vetch starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 772-782.

[5] LI Y, XIAO J H, TU J, et al. Matcha-fortified rice noodles: Characteristics of *in vitro* starch digestibility, antioxidant and eating quality [J]. LWT, 2021, 149: 111852.

[6] 刘璐.杂豆添加对糙米米线食用品质及eGI值的影响[D].北京:中国农业科学院,2021.

[7] ZHAO Q N, YANG J Y, LI J H, et al. Hypoglycemic effect and intestinal transport of phenolic-rich extract from digested mulberry leaves in Caco-2/insulin-resistant HepG2 co-culture model [J]. Food Research International, 2024, 175: 113689.

[8] 吕庆云,陈款,江蕾,等.低eGI值复合挤压米成型工艺、理化特性及风味[J].现代食品科技,2024,40(10):14-25.

[9] 潘玥.蓝莓叶多酚提取物对α-淀粉酶和α-葡萄糖苷酶的抑制作用及其在低GI米糕中应用研究[D].上海:上海海洋大学,2021.

[10] TEBA S D C, SILVA D M M E, CHAVEZ H W D, et al. Effects of whey protein concentrate, feed moisture and temperature on the physicochemical characteristics of a rice-based extruded flour [J]. Food Chemistry, 2017, 228: 287-296.

[11] FREI M, SIDDHURAJU P, BECKER K. Studies on the *in vitro* starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines [J]. Food Chemistry, 2003, 83(3): 395-402.

[12] GONI I, GARCIA A A, SAURA C F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. Nutrition Research, 1997, 17(3): 427-437.

[13] 史韬琦,张晨,丁文平,等.不同品种籼米直链淀粉含量对米线加工特性和品质的影响[J].食品工业科技,2020,41(19):33-38,44.

[14] JIA Y Z, ZHANG Z, LI M, et al. The effect of hydroxypropyl starch on the improvement of mechanical and cooking properties of rice noodles [J]. Food Research International, 2022, 162(PA): 111922.

[15] LS/T 6137-2020,米粉条食用品质感官评价方法[S].

[16] 梁钦梅,程子良,王福,等.不同磨粉工艺对大米粉及鲜湿米粉品质的影响[J].食品工业,2024,45(3):30-34.

[17] 金茂国,吴嘉根,吴旭初.粉丝生产用淀粉性质及其与粉丝品质关系的研究[J].无锡轻工业学院学报,1995,4:307-312.

[18] CAMPOS F, PEIXOTO A F, FERNANDES P A R, et al. The antidiabetic effect of grape pomace polysaccharide-polyphenol complexes [J]. Nutrients, 2021, 13(12): 4495.

[19] JIN H M, DANG B, ZHANG W G, et al. Polyphenol and anthocyanin composition and activity of highland barley with different colors [J]. Molecules, 2022, 27(11): 3411.

[20] KALITA D, HOLM D G, LABARBERA D V, et al. Inhibition of α-glucosidase, α-amylase, and aldose reductase by potato polyphenolic compounds [J]. PloS One, 2018, 13(1): e0191025.

[21] ESPOSITO F, PALA N, CARCELLI M, et al. α-Glucosidase inhibition by green, white and oolong teas: *in vitro* activity and computational studies[J]. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 2023, 38(1): 2236802.

[22] 王倩,王娟,傅金凤,等.青香蕉果肉多酚成分鉴定及其对α-淀粉酶和α-葡萄糖苷酶的抑制作用[J].食品科学,2024,45(7):61-68.

[23] NASCIMENTO G O, MARQUES S P D, MAIA C E G, et al. Hypoglycemic effect of Coffea arabica leaf extracts and major bioactive constituents [J]. Journal of Biomolecular Structure and Dynamics, 2023, 41(24): 14871-14886.

[24] 朱清华,邬家燕,杨丹,等.不同番石榴果实提取物抗氧化、降血糖活性比较[J].现代食品科技,2024,40(11):238-245.

[25] 卫强,纪小影,徐飞,等.木槿叶化学成分及抑制α-葡萄糖苷酶活性研究[J].中药材,2015,38(5):975-979.

[26] 田美玲,陈沁雯,刘斌雄,等.玫瑰茄花青素纯化、鉴定及抗氧化活性评价[J].现代食品科技,2024,40(7):155-165.

[27] DIMENG Y, LEE H L, YUAN M Y, et al. Incorporation of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) seed powder into fresh rice noodles with tapioca starch improves postprandial glycemia, insulinemia and satiety in healthy human volunteers [J]. Journal of Functional Foods, 2023, 100: 105382.

[28] SHEN D D, LI X, QIN Y L, et al. Physicochemical properties, phenolic profiles, antioxidant capacities, and inhibitory effects on digestive enzymes of okra (*Abelmoschus esculentus*) fruit at different maturation stages [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(3): 1275-1286.

[29] 董志雄.基于RS2型抗性淀粉和苦荞的低GI米线配方研制[D].武汉:武汉轻工学.

[30] 聂复新,汪凤仙,张婷,等.板栗壳多酚对冷藏鱼糜制品的保鲜效果研究[J].食品科技,2022,47(8):89-95.

[31] 梁璐,隋勇,梅新,等.紫薯粉对米粉食用品质和理化特性的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(11):254-260.

[32] HAN C W, MA M, ZHANG H H, et al. Progressive study of the effect of superfine green tea, soluble tea, and tea polyphenols on the physico-chemical and structural properties of wheat gluten in noodle system [J]. Food Chemistry, 2020, 308: 125676.

[33] 胡海鹏,张聪男,薛薇,等.不同抗老化剂对鲜湿米线品质及储藏稳定性的影响[J].中国粮油学报,2023,38(12):30-37.