

青刺果粕肽饼干的品质、消化特性和降糖潜能

姚登杰¹, 吕静¹, 黄锐², 张贝贝¹, 秦宇¹, 李莉蓉^{1*}

(1. 昆明理工大学食品科学与工程学院, 云南昆明 650500)

(2. 中垦华山牧乳业有限公司, 陕西渭南 714000)

摘要: 模拟胃肠消化结合超滤制备分子量 >5 ku 和 <5 ku 的青刺果粕肽 PMPa (*Prinsepia utilis* Royle Meal Peptide>5 ku) 和 PMPb (*Prinsepia utilis* Royle Meal Peptide<5 ku), 分析它们的降糖和抗氧化活性, 研究肽的添加量为 0、1.25%、2.5%、5.0% 和 7.5% 饼干的颜色和质构, 模拟消化后饼干快速消化淀粉 (RDS) 含量、慢性消化淀粉 (SDS) 含量、血糖负荷 (GL) 以及对 II 型糖尿病小鼠餐后 2 h 血糖水平。PMPa 和 PMPb 的 α -淀粉酶抑制率分别为 62.33% 和 68.51%, 且显著高于阿卡波糖, PMPb 对白蛋白抑制率和 DPPH 自由基清除率均显著高于 PMPa 和阳性对照双氯酚酸钠、维生素 E; 随肽添加量的增加, 饼干的亮度、硬度和咀嚼度逐渐降低, 饼干消化后 RDS 含量减少、SDS 含量增加; 且添加 7.5% PMPa 和 PMPb 的饼干具有最低的血糖负荷, 分别为 15.57 和 13.79, 属于中等 GL 食物; 高比例 PMP (5.0% 和 7.5%) 替代的饼干饲喂 II 型糖尿病小鼠后 2 h 餐后血糖 (2 h Postprandial Blood Glucose, 2 h PBG) 显著低于对照组。综上, PMP 的添加可以改善小麦饼干的体外消化特性并在一定程度上调控餐后血糖水平, 其活性特征可作为天然活性食品配料应用于健康饼干。

关键词: 青刺果粕肽; 饼干; 淀粉消化; 血糖负荷; 血糖

文章编号: 1673-9078(2024)11-246-255

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.11.1313

Quality, Digestive Properties, and Hypoglycemic Potential of *Prinsepia utilis* Royle Meal Peptide Biscuits

YAO Dengjie¹, LYU Jing¹, HUANG Rui², ZHANG Beibei¹, QIN Yu¹, LI Lirong^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

(2. Zhongken Huashanmu Uiry Co. Ltd., Weinan 714000, China)

Abstract: Simulated gastrointestinal digestion combined with ultrafiltration was used to prepare peptides PMPa (*Prinsepia utilis* Royle Meal Peptide>5 ku) and PMPb (*P. utilis* Royle Meal Peptide<5 ku) with different molecular weights, and their hypoglycemic and antioxidant activities were analyzed. The added amounts of the studied peptides were 0%, 1.25%, 2.5%, 5.0%, and 7.5% biscuits. The color and texture of the biscuits simulate the rapidly digestible starch (RDS) content; chronically digestible starch (SDS) content; blood glucose load (GL); and 2 h postprandial blood glucose levels in type 2 diabetic mice after digestion. The α -amylase inhibition rates of PMPa and PMPb were 62.33% and 68.51%, respectively,

引文格式:

姚登杰, 吕静, 黄锐, 等. 青刺果粕肽饼干的品质、消化特性和降糖潜能 [J]. 现代食品科技, 2024, 40(11): 246-255.

YAO Dengjie, LYU Jing, HUANG Rui, et al. Quality, digestive properties, and hypoglycemic potential of *Prinsepia utilis* royle meal peptide biscuits [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 246-255.

收稿日期: 2023-11-01

基金项目: 云南省科技厅科技计划面上项目 (202001AT070032); 陕西省科技厅市联动渭南现代农业重点项目 (2022GD-TSLD-58); 云南省高层次科技人才和创新团队专项项目 (202405AS350005)

作者简介: 姚登杰 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养, E-mail: 775059344@qq.com

通讯作者: 李莉蓉 (1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: lilirong-lily@126.com

which were significantly higher than those of acarbose. The albumin inhibition rate and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl free radical scavenging rate significantly higher for PMPb than PMPa and the positive control diclofenac sodium., vitamin E. As the amount of added peptide increased, the brightness, hardness, and chewiness of the biscuits gradually decreased, the RDS content decreased, and the SDS content increased after the biscuits were digested. Moreover, biscuits with 7.5% PMPa and PMPb added had the lowest glycemic loads of 15.57 and 13.79, respectively, which indicate that they are medium GL foods. The 2 h postprandial blood glucose concentration was significantly lower in type II diabetic mice fed biscuits with high proportions of PMP (5.0% and 7.5%) than in control mice. In summary, the addition of PMP can improve the *in vitro* digestion properties of wheat biscuits and regulate postprandial blood sugar levels to a certain extent. Owing to its dynamic attributes, PMP can be applied as a natural active food ingredient in nutritious biscuits.

Key words: *Prinsepia utilis* Royle meal peptide; biscuit; starch digestion; glycemic load; blood glucose

淀粉类食物长期以来一直是人们首选的主要供能食物之一，但是摄食富含淀粉的食物容易导致机体血糖的快速升高，这也是增加肥胖和 II 型糖尿病 (Diabetes Mellitus Type 2, T2DM) 风险和危害的因素之一，所以有必要开发和推广调控餐后血糖波动、减弱餐后血糖反应的淀粉类食物。饼干是一类以小麦粉为主要原料制成的面粉加工食品。小麦饼干通常属于高血糖指数 (Glycemic Index, GI) 食物 (GI > 70)，其因含有高比例的小麦粉，食用后在人体内快速消化释放单糖，引起血糖水平迅速上升^[1,2]。近年来，低 GI 食品 (GI < 55) 的研发是目前食品领域的研究热点，许多研究者致力于寻找合理的原料部分替代小麦面粉，以降低淀粉类食品的 GI 值。

生物活性肽不同的氨基酸组成、序列和结构决定了它们不同和多样的功能特性，包括降糖、降压、抗菌和抗氧化等作用^[3-5]。已有研究者将动物或植物蛋白酶解物部分替代小麦面粉制作低 GI 饼干或面包，通过调节消化酶活性和肠道消化速率来实现摄食后产生较低的血糖指数和血糖负荷^[6]，减弱人体内血糖和胰岛素释放，胰岛素敏感性升高，抑制餐后高血糖和高胰岛素^[7]。Sinthusamran 等^[8]通过碱提酸沉和酶解制备白虾蛋白酶解物，将其应用于小麦饼干的开发，改善小麦饼干的营养价值和感官特性。Karimi 等^[9]将玉米胚芽酶解物添加到面包中，增强了面包的 α -淀粉酶抑制活性，改善面包的淀粉消化率。

青刺果粕是青刺果 (*Prinsepia utilis* Royle) 果仁榨油后的副产物，含有丰富的营养物质和活性成分，如蛋白质、脂肪、黄酮、多糖、氨基酸、维生素和微量元素等，其中蛋白含量达 24.58%^[10,11]。前人研究显示，青刺果粕具有良好的 α -淀粉酶抑制

活性、抗氧化活性和抑菌活性^[12]。但是，目前缺少青刺果粕肽 (*Prinsepia utilis* Royle Meal Peptide, PMP) 应用于食品营养和健康食品的研究，这不利于青刺果副产物的深入开发利用和经济价值的提高。

本研究拟通过模拟胃肠消化和超滤制备分子量 > 5 ku、< 5 ku 的青刺果粕肽组分 PMPa 和 PMPb，分析以 0、1.25%、2.5%、5.0% 和 7.5% 的 PMPa 及 PMPb 替代小麦面粉的饼干颜色和质构，进行体外淀粉消化、快速消化淀粉 (Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉 (Slowly Digestible Starch, SDS)、GI、血糖负荷 (Glycemic Load, GL) 和餐后 2 h 血糖 (2 hour Postprandial Blood Glucose, 2 h PBG) 的评价，以探究 PMP 对饼干体外消化特性和对餐后血糖的影响，为 PMP 在中等 GL 淀粉类食物中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

青刺果粕，云南省丽江市宁蒗县农贸市场；低筋小麦面粉、黄油和食盐，云南省昆明市呈贡区永辉超市；超滤膜 (再生纤维素膜 RC，截留分子量 5 ku)，Millipore 公司；AX3WI α -淀粉酶，东京华成实业有限公司；猪胰蛋白酶 (320 U/L)、糖化酶 (100 000 U/mL)、2,2-联苯基-1-苦基肼 (DPPH)、Trolox (水溶性维生素 E) 和 3,5-二硝基水杨酸 (DNS)，上海阿拉丁试剂有限公司；链脲佐菌素，生工生物工程 (上海) 股份有限公司；其他化学试剂均为分析纯。

C57BL/6 小鼠 [4~5 周龄、体质量 18~20 g，动物许可证编号：SCXK(湘)2019-0004]，湖南斯莱克

景达实验动物有限公司；普通饲料，昆明理工大学实验动物学部；高糖高脂饲料（普通饲料 65%，猪油 10%，蔗糖 20%，胆固醇 2.5%，碳水化合物 1%，脱氧胆酸钠 1%，纤维素 0.5%，质量分数），南京盛民科研动物养殖场。

1.2 仪器与设备

AS10200BT 超声仪，杭州汇尔仪器设备有限公司产品；UV-1800PC 紫外可见分光光度计，上海美谱达仪器有限公司产品；XR1 台式高速冷冻离心机，赛默飞世尔科技有限公司产品；Dk-8D 三温水浴锅，常州高德仪器有限公司产品；CR-400 色差仪，日本柯尼达美能达产品；TA.XT Plus 质构仪，英国 Stable Micro Systems 产品；GA-3 型血糖测试仪，三诺生物传感股份有限公司产品。

1.3 研究方法

1.3.1 青刺果蛋白的制备

经粉碎、100 目过筛后获得青刺果粕粉，与超纯水按 1:20 (m/V) 料液比进行混合，超声搅拌 30 min 后，置于 30 °C 水浴锅中继续搅拌，并用 1.0 mol/L 的 NaOH 调节溶液 pH 值至 8.8。提取 2 h 后，在 10 000 r/min 转速下离心 10 min，收集上清液。上清液用 1.0 mol/L 的 HCl 调节 pH 值至 4.2，静置 30 min 后，在 10 000 r/min 转速下离心 10 min，收集沉淀。用超纯水洗沉淀 3 次，用超纯水复溶，调 pH 值至中性，冷冻干燥后得到青刺果粕蛋白。

1.3.2 模拟胃肠消化制备青刺果粕肽

将 0.6 g 青刺果粕蛋白与 20 mL 模拟胃液（终浓度为 6.9 mmol/L 的 KCl，0.9 mmol/L 的 KHPO₃，25 mmol/L 的 NaHCO₃，47.2 mmol/L 的 NaCl，0.1 mmol/L 的 MgCl₂，0.5 mmol/L 的 (NH₄)₂CO₃ 和 0.15 mmol/L 的 CaCl₂ 混合液混合），底物浓度为 3%。用 1 mol/L 的 HCl 将 pH 值调节至 3.0 后加入 2 000 U/g 胃蛋白酶，将溶液在 37 °C 静态条件下孵育 2 h 后再用 1 mol/L 的 NaOH 将 pH 值调节至 7.0 来模拟胃消化过程；模拟肠消化过程是在胃消化结束后加入 48 mg 猪胰蛋白酶，（8% m/m ，基于蛋白质），将溶液在 37 °C 静态条件下孵育 2 h。模拟肠消化结束后，将酶解液 pH 值调至中性，煮沸 10 min 钝化酶，冷却后在 10 000 r/min 转速下离心 10 min，收集上清液^[13]。收集的上清液用截留量为 5 ku 的超滤膜进行超滤，收集分子量 > 5 ku 的青

刺果粕肽（PMPa）和分子量 < 5 ku 的青刺果粕肽（PMPb），青刺果粕肽质量浓度为 20 mg/mL，冷冻干燥置于 -20 °C 冰箱保存备用。

1.3.3 α -淀粉酶抑制率

分别将 0.2 mL 质量浓度为 20 mg/mL 的 PMPa 和 PMPb 和 0.2 mL 的 α -淀粉酶（700 U/g）置于 1.5 mL 离心管中混匀，在 37 °C 水浴孵育 10 min，加入 0.2 mL 1% 的可溶性淀粉，在 37 °C 水浴孵育 3 min，加入 0.2 mL DNS 试剂，煮沸 10 min 后迅速冷却，加入 5 mL 超纯水，在 540 nm 波长下测定其吸光值。按照下式计算 α -淀粉酶抑制率，以 1 μ g/mL 阿卡波糖为对照^[14]：

$$C = \left(1 - \frac{A_a - A_b}{A_c}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中：

C —— α -淀粉酶抑制率，%

A_a ——待测样品吸光值；

A_b ——磷酸盐缓冲液代替 DNS 时待测样品吸光值；

A_c ——超纯水代替样品时的吸光值。

1.3.4 DPPH 自由基清除活性

向离心管中加入 1 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液和质量浓度分别为 20 mg/mL 的 1 mL PMPa 和 PMPb 充分混合后，在室温下避光静置 30 min。测量 517 nm 处的吸光值。以 0.06 mg/mL 的 Trolox 为阳性对照。

根据以下公式计算 DPPH 自由基清除率^[15]：

$$D = \left(1 - \frac{A_d - A_e}{A_f}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中：

D ——DPPH 清除率，%

A_d ——待测样品吸光值；

A_e ——将 1 mL 乙醇溶液替代 DPPH 乙醇溶液测得的吸光值；

A_f ——1 mL 超纯水替代待测样品测得的吸光值。

1.3.5 饼干的制备

根据表 1 的饼干配料比例，将融化的黄油、水和食盐混合，打发 2 min 至白色发起状态，再加入小麦面粉和相应比例的青刺果粕肽 PMP（1.25%、2.5%、5.0% 和 7.5%），和面 2 min 得到均匀的面团。将面团手工压成 4 mm 厚的薄片，用饼干模具压成型。以上火 160 °C，下火 140 °C，烘烤 18 min（9 min 时烤盘调整方向，保证均匀烤制）^[8]。饼干烘烤完成后冷却到室温，保鲜袋封存，用于后续进一步分析。

表1 饼干配方

Table 1 Biscuit ingredients

材料/g	对照组	PMP组			
		1.25%	2.5%	5.0%	7.5%
小麦面粉	100.00	98.75	97.50	95.00	92.50
PMP	0.00	1.25	2.50	5.00	7.50
黄油	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
食盐	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
水	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00

1.3.6 饼干表面颜色

用色差仪测定饼干的表面颜色。色差仪预热 10 min 后用黑色和白色标准板校准。分别记录表示亮度、红色/绿色和黄色/蓝色的 L^* 、 a^* 和 b^* 的值^[16]：

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

$$\Delta C^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

式中：

ΔE^* ——色差值；

ΔL^* ——亮度差值；

Δa^* ——红色/绿色差值；

Δb^* ——黄色/蓝色的差值；

ΔC^* ——色度差值。

1.3.7 饼干的质构

用 TA.XT 质构分析仪在 25 °C 下测定饼干的质构。设定参数如下：选择 TA/5 探头，触发力为 5 g，测前速度为 0.5 mm/s，测试速度为 0.5 mm/s，测后速度为 0.5 mm/s，测定间隔时间为 5 s，压缩比率 60%，最小感应力 0.05 N，记录破坏饼干样品所需的最大力和咀嚼性^[17]。每块饼干测试 3 个点取平均值，每组样品重复不低于 3 次。

1.3.8 饼干的体外消化

消化过程包括模拟胃液消化和模拟肠液消化 2 个部分。将 2.5 g 饼干打碎后与 30 mL 超纯水充分混匀，用 1 mol/L 的盐酸将 pH 值调节至 2.5，加入 1 mL 10% 胃蛋白酶溶液（2 500 U/mL，0.05 mol/L 的 HCl 配制），将样品置于 37 °C 孵育 30 min，以 130 r/min 搅拌，用 1 mol/L 的 NaHCO₃ 和 5 mL 0.1 mol/L 的磷酸二氢钠缓冲液调节 pH 值至 6.0 终止反应。加入 100 μL 淀粉糖苷酶（0.1 mol/L 的 NaH₂PO₃ 缓冲液配制）和 5 mL 5% 猪胰蛋白酶溶液。用超纯水将消化液体积调至 55 mL 后，在 37 °C 每

隔一定时间（0、20、60、90、120、180 min）取样 0.5 mL。样品中加入 2 mL 乙醇溶液以终止酶消化反应。用二硝基水杨酸（DNS）法测定上清液中的水解葡萄糖含量^[18]。

根据以下式计算饼干淀粉消化性能^[19,20]：

$$B_1 = (E - F) \times 0.9 \quad (5)$$

$$B_2 = (G - E) \times 0.9 \quad (6)$$

式中：

F ——酶水解处理前淀粉中游离葡萄糖含量（FG）；

E ——20 min 内从淀粉和糖中释放出的葡萄糖（RAG）；

G ——120 min 后产生的有效葡萄糖含量（AG）；

B_1 ——快速消化淀粉含量（RDS）；

B_2 ——慢速消化淀粉含量（SDS）。

1.3.9 饼干的GI和GL分析

HI 和 GI 按照下列公式计算^[21]：

$$H = \frac{AUC_{180 \text{ min}}}{AUC_g} \times 100 \quad (7)$$

$$Q_1 = 39.71 + 0.549H \quad (8)$$

式中：

$AUC_{180 \text{ min}}$ ——食用样品后 180 min 内测试样品葡萄糖曲线下的面积；

AUC_g ——对照样品的葡萄糖曲线下的面积；

H ——水解指数（HI）；

Q_1 ——血糖指数（GI）。

在 50 mg 饼干样品中加入 6 mL 2 mol/L 的 KOH 在室温下振荡 30 min，以充分溶解的淀粉。加入 60 μL 糖化酶（0.4 mol/L，pH 值 4.6 的醋酸钠缓冲液配制），在 60 °C 的水浴中孵育 45 min 后，以 3 000 r/min 转速离心 10 min 收集上清液，用 DNS 法测定上清液中的葡萄糖含量。用紫外分光光度计在 540 nm 处测定吸光值计算释放的葡萄糖浓度，再乘以 0.9 换算为总淀粉含量（TS）^[22]。GI 葡萄糖以葡萄糖为参照样品，表示为以葡萄糖为标准食物的值^[21]。GL 按照以下公式计算：

$$Q_2 = \frac{Q_{1i} \times T}{100} \quad (9)$$

式中：

Q_{1i} —— $Q_1 \times 0.7$ ；

T ——总淀粉含量（TS）；

Q_2 ——血糖负荷（GL）。

1.3.10 II型糖尿病小鼠餐后2h血糖监测

将 100 只 C57BL/6 小鼠置于覆盖刨花的塑料笼中，空调室内（25 °C），正常光照，相对湿度

40%~60% 下适应一周, 进行 II 型糖尿病小鼠模型建立。所有相关实验程序均通过昆明理工大学动物保护与动物实验中心 [PZWH (滇) K2021-0019] 提供的指导意见, 并经昆明理工大学动物实验伦理委员会批准, 根据“动物伦理方法”进行相关动物实验。用普通饲料喂养小鼠进行适应性培养一周后, 高糖高脂肪饲料, 喂养小鼠 4 周。第 4 周断食和断水。给小鼠腹腔注射链脲佐菌素溶液 (40 mg/kg, 溶于 0.1 mol/L 柠檬酸缓冲液, pH 值 4.5)。注射后监测小鼠 4~5 d 血糖值, 空腹血糖水平 ≥ 7.8 mmol/L 则判定为 II 型糖尿病造模成功^[23]。

将糖尿病 ($n=100$) 小鼠随机分为 10 组, 所有分组情况如下:

- (1) 对照组 (糖尿病对照小鼠, 200 mg/(kg·d), $n=10$)
- (2) 阿卡波糖 (Aca, 200 mg/(kg·d), $n=10$)
- (3) PMPa 组 (1.25%、2.5%、5%、7.5%, 200 mg/(kg·d), $n=40$, 每组 10 只)
- (4) PMPb 组 (1.25%、2.5%、5%、7.5%, 200 mg/(kg·d), $n=40$, 每组 10 只)

将糖尿病小鼠进一步随机分为组。禁食 12 h 后, 按照对照、1.25%、2.5%、5.0% 和 7.5% 的 PMPa 和 PMPb 进行分组, 每组各喂食 0.5 g 饼干, 用 GA-3 型便捷式血糖仪测量小鼠餐后 2 h 血糖值^[24]。

1.3.11 统计方法

数据以平均值 \pm 标准差表示。用 SPSS 软件对数据进行单因素方差分析, Duncan's 法进行多重比较, $P < 0.05$ 为显著性水平。用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 青刺果粕肽对 α -淀粉酶抑制率和 DPPH 自由基清除活性

α -淀粉酶是一种水解多糖 α 糖苷键产生葡萄糖和麦芽糖的酶^[3]。存在于唾液和胰腺中的 α -淀粉酶负责分解淀粉产生多糖, 所以抑制 α -淀粉酶活性可以降低多糖水解产生葡萄糖的水平^[25]。如表 2 所示, PMPb 具有更高的 α -淀粉酶抑制活性, 对 α -淀粉酶抑制率为 68.51%, 显著高于 PMPa 的 62.33% 和阳性对照阿卡波糖的 55.99% ($P < 0.05$)。Chamorro 等^[26]发现, 通过模拟胃肠消化制备分子量 < 5 ku 的藜麦低分子肽比分子量 > 5 ku 藜麦肽显示出更有效的 α -淀粉酶抑制活性。小分子的 PMPb 的 α -淀粉酶抑制活性高于 PMPa, 可能是因为短肽数量的增加导致暴

露更多的末端基团, 从而影响 α -淀粉酶抑制活性^[27]。

表 2 青刺果粕肽的 α -淀粉酶抑制活性和 DPPH 清除活性
Table 2 The α -amylase inhibitory and DPPH free radical scavenging activity of PMP

样品	α -淀粉酶抑制率/%	DPPH 清除率/%
PMPa	62.33 \pm 0.88 ^b	76.38 \pm 1.59 ^b
PMPb	68.51 \pm 0.82 ^c	79.21 \pm 0.46 ^c
阿卡波糖	55.99 \pm 0.54 ^a	—
Trolox	—	72.49 \pm 1.40 ^a

注: “—”表示未测定。同一列数值上标不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

过量的自由基生成会导致体内胰腺 β 细胞被破坏、严重的胰岛素分泌不足以及糖尿病症状加重^[28]。研究表明, 肽类自由基抑制剂可与 DPPH 自由基中心的氮原子配对形成稳定的 DPPH-H 化合物, 从而表现出良好的抗氧化性^[29]。表 2 显示, 青刺果粕肽具有显著的清除 DPPH 自由基的抗氧化活性, PMPb 的 DPPH 自由基清除活性为 79.21%, 显著高于 PMPa (76.38%) 和阳性对照 Trolox (72.49%) 的 DPPH 清除活性 ($P < 0.05$)。类似的, Ruben 等^[13]以藜麦为原料通过模拟胃肠消化和超滤得到分子量 < 5 ku 的藜麦肽的抗氧化活性高于分子量 > 5 ku 的藜麦肽。研究证实, 低分子量的肽段可以产生较高的抗氧化活性^[30]。因此, PMPb 较好的抗氧化能力可能与其较低的分子量有关。

2.2 青刺果粕肽对饼干颜色的影响

由图 1 和表 3 可知 (图 1 为手机将饼干放置黑色纸板上统一拍摄并合并), 与对照组相比, 添加 PMPa 和 PMPb 的饼干 L^* 和 b^* 值均随着肽添加浓度的增加而降低, 7.5% 的添加量使 L^* 值下降至最低, 分别下降了 11.3 和 7.06 ($P < 0.05$), b^* 值则分别下降了 3.27 和 4.7; 饼干的 a^* 值则随青刺果粕肽添加比例的增加至 7.5% 时显著上升至最高 ($P < 0.05$), a^* 值分别上升了 1.8 和 0.51; 饼干的 ΔE^* 和 ΔC^* 值也随青刺果粕肽添加量的增加而增加。添加 PMPa 的饼干较添加 PMPb 的饼干呈现的黄色更明显, 其 a^* 值从负值 (绿色) 逐渐增加至正值 (红色), 其颜色强度和饱和度都有所增强。Kumar 等^[6]研究发现随着海洋胶原多肽浓度的增加, 饼干的 L^* 值和 b^* 值逐渐降低, a^* 值逐渐升高, ΔE^* 和 ΔC^* 值有所增强。红色指向更程度的美拉德反应和焦糖化反应, 饼干表面颜色变化可能与饼干中的肽含量增加有关, 引发美拉德反应导致饼干颜色变深亮度降低。

表 3 不同饼干的表面颜色

Table 3 The surface colors of different biscuits

组别	L^*	a^*	b^*	ΔE^*	ΔC^*	
对照	82.48 ± 0.36^a	-1.79 ± 0.07^a	23.93 ± 0.27^b			
PMPa	1.25%	77.27 ± 0.28^c	-0.84 ± 0.01^f	23.20 ± 0.72^f	5.63 ± 0.07^c	1.28 ± 0.05^a
	2.5%	76.39 ± 0.33^f	-0.32 ± 0.05^g	22.71 ± 0.08^{ef}	6.36 ± 0.04^{cd}	1.91 ± 0.03^b
	5.0%	75.57 ± 0.26^h	-0.13 ± 0.03^h	22.38 ± 0.10^{de}	6.65 ± 0.11^d	2.27 ± 0.07^b
	7.5%	72.50 ± 0.25^e	0.96 ± 0.01^i	20.66 ± 0.12^c	12.08 ± 0.10^f	4.27 ± 0.09^c
PMPb	1.25%	80.41 ± 0.45^b	-1.53 ± 0.02^b	22.55 ± 0.34^{de}	2.49 ± 0.02^a	1.41 ± 0.04^a
	2.5%	79.28 ± 0.86^c	-1.37 ± 0.04^c	22.10 ± 0.19^d	3.71 ± 0.05^b	1.88 ± 0.11^b
	5.0%	78.53 ± 0.21^d	-1.19 ± 0.02^d	20.00 ± 0.34^b	6.06 ± 0.03^{cd}	3.98 ± 0.06^c
	7.5%	76.36 ± 0.27^f	-1.02 ± 0.01^c	19.22 ± 0.02^a	8.52 ± 0.12^e	4.77 ± 0.02^d

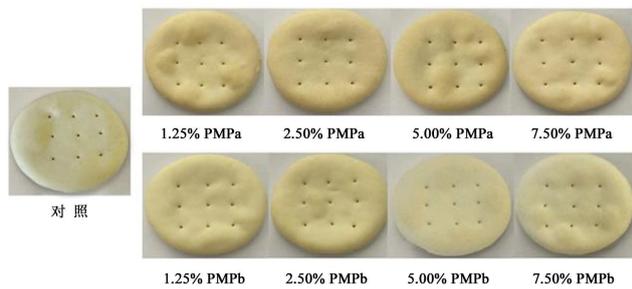


图 1 不同 PMPa 和 PMPb 添加量饼干图片

Fig.1 Biscuits with different proportions of PMPa and PMPb

2.3 青刺果粕肽对饼干质构的影响

饼干的硬度是由嵌入未胶凝淀粉颗粒中的蛋白质聚集体和脂质的复合基质决定的，饼干中面筋网络结构的减少可以降低饼干的硬度^[31]。如表 4 所示，随着 PMPa 和 PMPb 添加比例的增加至 7.5% 时，饼干的硬度和咀嚼度显著下降至最低 ($P < 0.05$)，硬度分别下降了 8 102.49 和 11 448.03 g，咀嚼度分别下降了 2 460.76 和 2 973.41 g，说明青刺果粕肽的添加降低牙齿咬碎饼干的压缩力并减少了饼干可以吞咽的咀嚼次数，即在一定程度上改善韧性饼干的口感。这可能与 PMPa 和 PMPb 竞争性的吸收水分，包裹淀粉颗粒分布在面筋网络结构中，阻止多个蛋白质分子牢固地缠绕在一起，阻碍了空间网络结构的形成^[32]。随着 PMPa 和 PMPb 添加量的增加，稀释的面筋蛋白和面团的粘附性下降，饼干的咀嚼度显著下降^[33]。这与林光月^[34]的研究结果相一致，蚕蛹酶解液添加会影响饼干的硬度，无添加肽饼干的硬度值最高，蚕蛹酶解液添加量最多为 24.79% 时的饼干的硬度值最低。

表 4 饼干的硬度和咀嚼度

Table 4 The hardness and chewability of biscuits

组别	硬度/g	咀嚼度/g	
对照	$25\ 472.08 \pm 342.24^c$	$5\ 385.28 \pm 89.19^f$	
PMPa	1.25%	$22\ 577.14 \pm 217.11^d$	$4\ 447.85 \pm 68.36^{def}$
	2.5%	$20\ 432.86 \pm 322.25^{cd}$	$4\ 168.9 \pm 75.57^{cde}$
	5.0%	$19\ 283.18 \pm 185.90^{bc}$	$3\ 686.71 \pm 47.49^{bcd}$
	7.5%	$17\ 369.59 \pm 379.86^b$	$2\ 924.52 \pm 86.65^{ab}$
PMPb	1.25%	$21\ 966.75 \pm 319.92^d$	$4\ 908.52 \pm 53.36^{ef}$
	2.5%	$20\ 775.16 \pm 376.23^{cd}$	$3\ 841.46 \pm 99.95^{bcde}$
	5.0%	$18\ 333.89 \pm 154.53^{bc}$	$3\ 091.09 \pm 36.45^{abc}$
	7.5%	$14\ 024.05 \pm 158.41^a$	$2\ 411.87 \pm 73.21^a$

2.4 青刺果粕肽添加对饼干的葡萄糖释放量的影响

淀粉在口腔的唾液和胰腺分泌的 α 淀粉酶作用下转化为麦芽糖、异麦芽糖以及糊精等二糖，随后在胰液消化酶和小肠粘膜上皮细胞分泌的消化酶共同作用下水解为葡萄糖。图 2 显示，饼干在体外消化过程中所有组别饼干的葡萄糖释放量均随着消化时间的增加而增加，在肠消化的前 20 min 呈现出较快的增长，随后的 20~180 min 消化过程趋于平稳。Lu 等^[2]发现添加不同含量比例为鹰嘴豆粉的均在消化的前 30 min，葡萄糖释放量呈快速增加趋势，随后的消化过程中，水解速度逐渐减慢。对照组在体外消化 0 min (159.94 mg/g)、20 min (554.13 mg/g)、60 min (588.68 mg/g)、90 min (613.48 mg/g)、120 min (628.90 mg/g) 和 180 min (690.00 mg/g) 不同时间段均表现出明显的高葡萄糖释放量。添加

1.25% PMPa 和 PMPb 的饼干在 90、120 和 180 min 时葡萄糖释放量显著低于对照组 ($P < 0.05$)。添加 2.5% PMPa 和 PMPb 的饼干在相同时间间隔的葡萄糖释放量比添加 1.25% PMP 的饼干更低, 但差异不显著 ($P > 0.05$), 然而添加了 5.0% 和 7.5% PMPa 和 PMPb 的饼干之间的葡萄糖释放量存在显著差异 ($P < 0.05$), 添加 7.5% PMP 饼干的葡萄糖释放量最低。添加 5.0% 和 7.5% 玉米胚芽蛋白水解物的面包在消化前 20 min 内释放的葡萄糖分别减少了 13% 和 28%^[8]。结果表明, 青刺果粕肽的添加具有减缓饼干淀粉消化率、降低葡萄糖释放量的作用, 这与青刺果粕肽具有较强的葡萄糖吸附能力和淀粉酶抑制能力有关。

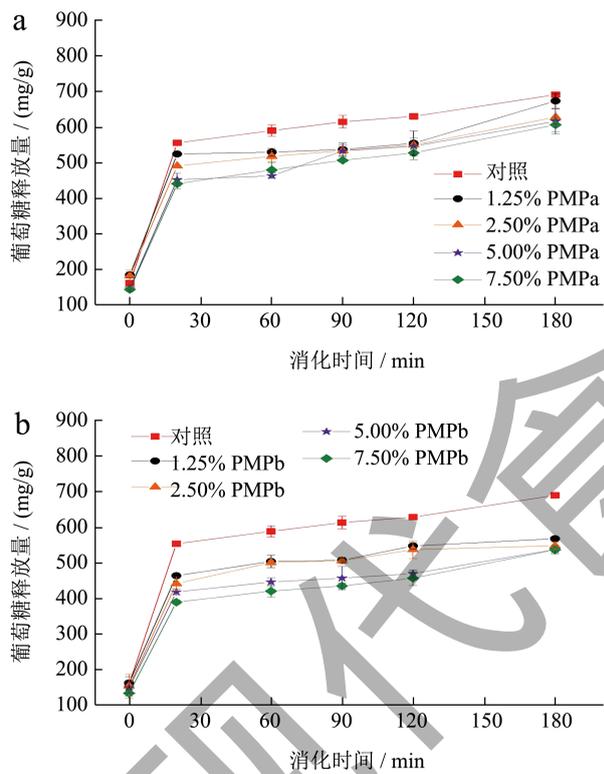


图 2 不同 PMPa (a) 和 PMPb (b) 添加量饼干的葡萄糖释放曲线

Fig.2 The glucose release curve of biscuits of different adding levels of PMPa (a) and PMPb (b)

注: (a) PMPa; (b) PMPb。

2.5 添加PMP对饼干的RDS和SDS的影响

RDS 为在小肠 30 min 内被消化的淀粉, 其迅速水解成糖分子, 提供身体所需的能量。SDS 为在小肠 180 min 内被消化的淀粉, 在小肠中缓慢水解成糖分子以维持正常血糖水平^[35]。如图 3 所示, 饼干的 RDS 含量随着 PMP 添加量的增加而降

低, RDS 含量从对照组的 60.22% 分别下降至 7.5% PMPa 组的 52.14% 和 7.5% PMPb 组的 51.46%; 饼干 SDS 含量则随着 PMP 添加量的增加而增加, 从对照组的 20.77% 分别增加至 7.5% PMPa 和 PMPb 组的 28.85% 和 29.53%。但是仅添加 5.0% 和 7.5% 的 PMPa 和 7.5% 的 PMPb 饼干的 RDS 和 SDS 与对照组饼干之间差异显著 ($P < 0.05$), 组间差异不显著 ($P > 0.05$), 说明该 PMP 添加浓度对饼干 RDS 和 SDS 作用效果明显且相当。饼干加入 PMP 后快消化淀粉下降可能是 PMP 阻碍消化酶与淀粉的接触, 形成慢消化特性, 从而降低了淀粉的水解速率^[36]。付田田等^[37]研究发现, 对照组的大米淀粉 RDS 的含量为 90.99%, 在添加了淀粉含量 1% 和 5% 的玉米肽之后, 大米淀粉的 RDS 含量分别下降至 80.04% 和 66.43%, SDS 含量则由对照组的 5.97 分别上升至 18.42 和 20.53, 肽的添加对淀粉 RDS 和 SDS 的影响与本研究结果相似。通常含较高的 SDS 值的淀粉类食物, 摄入后胰岛素逐渐产生, 有利于控制血糖水平^[38]。本研究结果表明, 添加 PMP 可以提高饼干 SDS 的含量, 对调控饼干消化后的正常血糖水平有益。

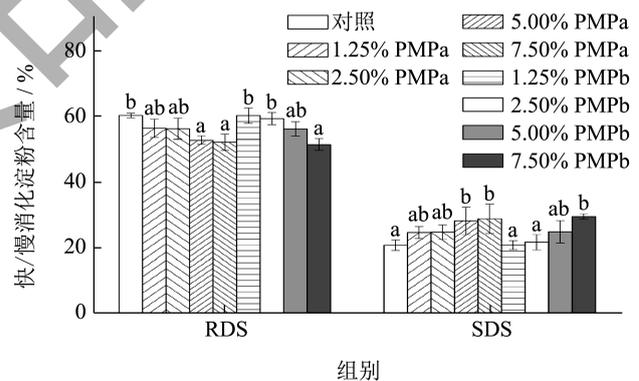


图 3 饼干的 RDS 和 SDS

Fig.3 The RDS and SDS of biscuits

注: 图中不同字母标示组间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.6 青刺果粕肽对饼干GI和GL的影响

不同碳水化合物含量的食物引起的升糖效应不同, 食物的 GI 和 GL 是根据急性升糖效应对食物进行分类。如表 5 所示, 与对照组相比, 除了 1.25% PMPb 和 2.5% PMPb 组饼干以外, 其它组饼干的 GI 值随着 PMP 添加量的增加显著降低 ($P < 0.05$), 其中添加 7.5% PMPa 和 PMPb 饼干的 GI 分别下降至 85.28% 和 84.75%。GI 值的降低归因于通过体外淀粉消化获得的低 RDS 分值和高 SDS 分值^[9]。但

是餐后血糖水平的变化不仅仅取决于食物中所含碳水化合物的类型，还取决于摄入的碳水化合物总量，所以 GL 更能反映食物对餐后血糖的影响。例如高 GI 食物苏打饼干、胡萝卜和西瓜的 GI 值分别为 72、71 和 72，而 GL 值分别为 5.86、3.98 和 5.47。GL 值 >20 为高 GL 食物，提示食用相当质量的食物对血糖影响明显；GL 值在 11-20 之间为中 GL 食物，提示食用相当质量的食物对血糖影响一般；GL 值 <11 为低 GL 食物，提示食用相当质量的食物对血糖影响不大^[39]。各组别饼干的 GL 值结果显示（表 5），添加了不同比例的 PMPa 和 PMPb 后，饼干的 GL 值均出现显著下降（ $P < 0.05$ ），在添加至 7.5% PMP 时 GL 值达到最低，分别为 15.57 和 13.79，属于中 GL 食物范围，说明 PMP 的替代可降低饼干的 GL。

表 5 饼干的GI和GL值

Table 5 GI and GL values of biscuits

组别	血糖指数 (GI)	血糖负荷 (GL)
对照	98.85 ± 1.35 ^{cd}	18.29 ± 0.93 ^c
PMPa	1.25%	89.38 ± 0.92 ^b
	2.5%	89.41 ± 0.72 ^b
	5.0%	86.71 ± 1.37 ^a
	7.5%	85.28 ± 0.16 ^a
PMPb	1.25%	94.25 ± 0.44 ^c
	2.5%	92.96 ± 1.37 ^c
	5.0%	88.26 ± 0.94 ^b
	7.5%	84.75 ± 0.72 ^a

2.7 添加青刺果粕肽饼干对II型糖尿病小鼠 2 h PBG的影响

食用低 GI 和低 GL 食物可以降低餐后葡萄糖和胰岛素反应^[40]。如图 4 所示，对照组小鼠摄食饼干 2 h PBG 水平高达 17.13 mmol/L，阿卡波糖干预后小鼠的 2 h PBG 水平降至 8.83 mmol/L；添加 1.25% PMPa、2.5% PMPa 和 2.5% PMPb 饼干 2 h PBG 水平分别为 16.8、16.73 和 16.16 mmol/L，与对照组 2 h PBG 无明显差异（ $P > 0.05$ ）；随着 PMP 添加量的增加，小鼠摄食饼干 2 h PBG 水平开始与对照组出现明显差异（ $P < 0.05$ ），其中摄食添加 5% 和 7.5% 的 PMPa 和 PMPb 饼干小鼠的餐后血糖下降效果最为显著（ $P < 0.05$ ）；7.5% 的添加组较对照组的餐后血糖由 17.13 mmol/L 分别下降至 12.46 和 12.16 mmol/L。结果表明，添加了 PMP 的饼干对于降低餐后血糖效果显著，做为中等 GL 食物的膳食

血糖干预有一定效果。抑制 α -淀粉酶活性是控制血糖的有效干预措施之一^[41]，青刺果粕肽具有较好的 α -淀粉酶抑制活性，延迟碳水化合物水解，使葡萄糖吸收率降低，从而有效地减少餐后血糖峰值，有利于控制糖尿病小鼠餐后血糖水平。

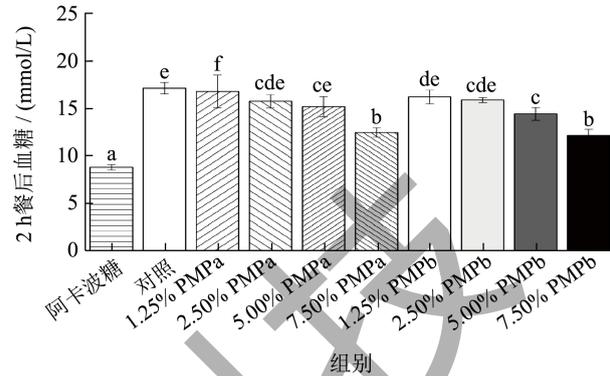


图 4 II 型糖尿病小鼠摄食不同比例 PMPa 和 PMPb 餐后血糖响应

Fig.4 Postprandial blood glucose response of type II diabetes mice to biscuits with different levels of PMPa and PMPb

3 结论

本研究分析 PMPa 和 PMPb 的体外 α -淀粉酶抑制率和自由基清除活性，以及添加不同比例 PMPa 和 PMPb 对小麦饼干的表面颜色、质构、体外淀粉消化性质和 2 h PBG 的影响。结果表明，PMPb 具有最高 α -淀粉酶抑制率和对 DPPH 自由基清除活性，分别为 68.51% 和 79.21%，显著高于 PMPa 的 65.33% 和 76.38%；随着 PMP 对面粉替代量的增加，饼干的亮度（ L^* ）和黄/蓝（ b^* ）值逐渐降低，红/绿（ a^* ）值逐渐增加，硬度和咀嚼度逐渐降低，即改善了饼干的色泽和口感；添加 7.5% PMPa 和 PMPb 对降低饼干葡萄糖释放量的效果最好，RDS 含量分别下降了 7.455%、8.76%，SDS 含量分别增加了 8.08% 和 8.76%；添加 7.5% PMPa 和 PMPb 促进饼干淀粉消化，具有最低的 GI 值（分别为 85.28 和 84.75），和最低的 GL 值（分别为 15.57 和 13.79），属于中等 GL 食物；II 型糖尿病小鼠摄食添加 PMPa 和 PMPb 饼干的 2 h PBG 水平显著低于摄入未添加 PMP 的对照饼干。综上，青刺果粕肽应用于制作的小麦饼干具有较好的持续提供能量、餐后血糖缓慢释放的消化特性和血糖调控作用。本研究可为青刺果粕肽在血糖调控淀粉类食品的开发和应用上提供理论依据。

参考文献

- [1] CHEN Y, ZHAO L, HE T, et al. Effects of mango peel powder on starch digestion and quality characteristics of bread [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 140(C): 647-652.
- [2] LIN L, CAIGAO H, BINGJIE L, et al. Incorporation of chickpea flour into biscuits improves the physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility [J]. LWT, 2022, 159: 113222.
- [3] YUAN G, LI W, PAN Y, et al. Shrimp shell wastes: optimization of peptide hydrolysis and peptide inhibition of α -amylase [J]. Food Bioscience, 2018, 25: 52-60.
- [4] VÁSQUEZ-VILLANUEVA R, MUÑOZ-MORENO M L, CARMENA M J, et al. *In vitro* antitumor and hypotensive activity of peptides from olive seeds [J]. Journal of Function Foods, 2018, 42: 177-184.
- [5] RANITHRI A, SITIAN Z, WENZHU Y, et al. Development of antioxidant peptides from brewers' spent grain proteins [J]. LWT, 2022, 158: 113162.
- [6] KUMAR A, ELAVARASAN K, HANJABAM M D, et al. Marine collagen peptide as a fortificant for biscuit: effects on biscuit attributes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 109: 450-456.
- [7] WU S, ZUO J, CHENG Y, et al. Ethanol extract of *Sargassum fusiforme* alleviates HFD/STZ-induced hyperglycemia in association with modulation of gut microbiota and intestinal metabolites in type 2 diabetic mice [J]. Food Research International, 2021, 147: 110550.
- [8] SINTHUSAMRAN S, BENJAKUL S, KIJROONGROJANA K, et al. Chemical, physical, rheological and sensory properties of biscuit fortified with protein hydrolysate from cephalothorax of Pacific white shrimp [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(3): 1145-1154.
- [9] AMIN K, HASSAN G A, ROGHAYEH S A, et al. Effect of maize germ protein hydrolysate addition on digestion, *in vitro* antioxidant activity and quality characteristics of bread [J]. Journal of Cereal Science, 2021, 97: 103148.
- [10] LIU X, SHI J, YI J, et al. The effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on phenolic bioaccessibility and bioactivities of *Prinsepia utilis* Royle fruits [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 138(1): 110782.
- [11] 吕程,蒲中慧,殷中琼,等.青刺果种粕粉提取物体外抑菌作用的研究[J].安徽农业科学,2009,37(22):10533-10535.
- [12] 刘招娣,刘祥义,张水滔,等.青刺果总黄酮超声波辅助提取及其抗氧化活性[J].食品研究与开发,2018,39(1):20-24.
- [13] RUBEN V, MIRALLES B, CARRILLO W, et al. *In vitro* chemopreventive properties of peptides released from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) protein under simulated gastrointestinal digestion [J]. Food Research International, 2018, 105: 403-411.
- [14] ROGHAYEH S A, ALI M S, HASSAN G A, et al. Influence of fish protein hydrolysate-pistachio green hull extract interactions on antioxidant activity and inhibition of α -glucosidase, α -amylase, and DPP-IV enzymes [J]. LWT, 2021, 142: 111019.
- [15] UDORIYA P, DEY Y N, SHARMA D, et al. *In-vitro* anti-inflammatory and antioxidant activities of an Ayurvedic formulation-*Trayoushang guggulu* [J]. Journal of Herbal Medicine, 2020, 23: 100366.
- [16] LEE S P D, GAN X A, KIM E J. Incorporation of biovalorised okara in biscuits: Improvements of nutritional, antioxidant, physical, and sensory properties [J]. LWT, 2020, 134: 109902.
- [17] FRANCO-MIRANU H, CHEL-GUERRERO L, CASTELLANOS-RUELAS S, et al. Physicochemical, rheological, bioactive and consumer acceptance analyses of concha-type Mexican sweet bread containing Lima bean or cowpea hydrolysates [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 250-256.
- [18] RAJKUMAR P S, SURIYAMOORTHY P, MOSES J A, et al. Mass transfer approach to *in-vitro* glycemic index of different biscuit compositions [J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(12): e13559.1-e13559.10.
- [19] DELAMARE G Y F, BUTTERWOTH P J, ELLIS PR, et al. Incorporation of a novel leguminous ingredient into savoury biscuits reduces their starch digestibility: Implications for lowering the Glycaemic Index of cereal products [J]. Food Chemistry: X, 2020, 5: 100078.
- [20] LIN J, TEO L M, LEONG L P, et al. *In vitro* bioaccessibility and bioavailability of quercetin from the quercetin-fortified bread products with reduced glycemic potential [J]. Food Chemistry, 2019, 285: 629-635.
- [21] WOLTER A, HAGER A S, ZANNINI E, et al. Influence of sourdough on *in vitro* starch digestibility and predicted glycemic indices of gluten-free breads [J]. Food and Function, 2014, 5(3): 564-572.
- [22] CHINEDUM E, SANNI S, THERESSA N, et al. Effect of domestic cooking on the starch digestibility, predicted glycemic indices, polyphenol contents and alpha amylase inhibitory properties of beans (*Phaseolis vulgaris*) and breadfruit (*Treculia africana*) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 200-206.
- [23] SISAY W, ANURGIE Y, MOLLA M, et al. *Glinus lotoides* linn. Seed extract as antidiabetic agent: *In vitro* and *in vivo* anti-glucolipototoxicity efficacy in Type-II diabetes mellitus [J]. Metabolism Open, 2022, 14: 100189.
- [24] SODIPO M A, OYELEYE S I, OBOH G, et al. Hypoglycemic effect of biscuits produced from flour blends of three medicinal foods on high-fat diet-streptozotocin-induced diabetic rats [J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(3): e13334.
- [25] PEREIRA S D E, VINHOLES R J, CAMARGO MT, et al.

- Characterization of araçá fruits (*Psidium cattleianum* Sabine): Phenolic composition, antioxidant activity and inhibition of α -amylase and α -glucosidase [J]. *Food Bioscience*, 2020, 37: 100665.
- [26] CHAMORRO R D V, MARTINEZ-VILLALUENGA C, HERNÁNDEZ-LEDESMA B, et al. Release of dipeptidyl peptidase IV, alpha-amylase and alpha-glucosidase inhibitory peptides from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during *in vitro* simulated gastrointestinal digestion [J]. *Journal of Function Foods*, 2017, 35: 531-539.
- [27] NGOH Y Y, GAN C Y. Enzyme-assisted extraction and identification of antioxidative and α -amylase inhibitory peptides from Pinto beans (*Phaseolus vulgaris* cv. Pinto) [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 331-337.
- [28] REN R, ZENG H, MEI Q, et al. Effects of *Monascus purpureus*-fermented tartary buckwheat extract on the blood lipid profile, glucose tolerance and antioxidant enzyme activities in KM mice [J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 105: 103465.
- [29] FOUUH A I, ALQARNII M H, ALAM A, et al. Evaluation of the composition and *in vitro* antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory activities of Cilantro (*Coriandrum sativum* L. leaves) cultivated in Saudi Arabia (Al-Kharj) [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, 28(6): 3461-3468.
- [30] YANG L, GUO Z, WEI J, et al. Extraction of low molecular weight peptides from bovine bone using ultrasound-assisted double enzyme hydrolysis: impact on the antioxidant activities of the extracted peptides [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 146: 111470.
- [31] JIA M, YU Q, CHEN J, et al. Physical quality and *in vitro* starch digestibility of biscuits as affected by addition of soluble dietary fiber from defatted rice bran [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 99(C): 105349.
- [32] CHEVALLIER S, COLONNA P, BULÉON A, et al. Physicochemical behaviors of sugars, lipids, and gluten in short dough and biscuit [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(4): 1322-1326.
- [33] LIANG X, FENG L, RAN J, et al. Influence of adding steam-exploded apple pomace on wheat flour characteristics and biscuit quality [J]. *Food Science and Technology*, 2020, 57: 3031-3039.
- [34] 林光月. 蚕蛹酶解液美拉德反应特性分析及在咸味饼干中的应用[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [35] SARUBI F, AZIZIMH, GAVLIGHI HA, et al. The effect of *Moringa peregrina* seed husk on the *in vitro* starch digestibility, microstructure, and quality of white wheat bread [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 136: 110332.
- [36] AZEEM M, MU TH, ZHANG M. Effects of hydrocolloids and proteins on dough rheology and *in vitro* starch digestibility of sweet potato-wheat bread [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 142: 110970.
- [37] 付田田, 舒蓝萍, 徐理宏, 等. 谷物蛋白肽对大米淀粉理化特性和体外消化特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(10): 76-84.
- [38] GRACA C, RAYMUNDO A, SOUSA I D. Yoghurt and curd cheese addition to wheat bread dough: impact on *in vitro* starch digestibility and estimated glycemic index [J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 127887.
- [39] 于英慧, 庄媛媛. 血糖负荷百分等级评价的方法[J]. *现代预防医学*, 2022, 49(6): 1143-1147.
- [40] STAMATAKI NS, NIKOLIUK EK, YANNI AE, et al. Evaluation of a high nutritional quality snack based on oat flakes and inulin: effects on postprandial glucose, insulin and ghrelin responses of healthy subjects [J]. *Food and Function*, 2016, 7(7): 3295-3303.
- [41] BARROS C P, GROM L C, GUIMARÃES J T, et al. Paraprobiotic obtained by ohmic heating added in whey-grape juice drink is effective to control postprandial glycemia in healthy adults [J]. *Food Research International*, 2020, 140: 109905.