

膳食纤维对饼干体外消化速率的抑制作用

李楠, 张良, 刘倩楠, 刘伟, 徐芬, 樊月, 胡宏海

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

摘要: 本研究以马铃薯全粉/籼米粉混合物 (3:2) 制作饼干 (P1) 作为对照, 分别将燕麦麸 (28%)、菊粉 (22%)、燕麦麸/菊粉 (28%/22%) 添加至马铃薯全粉/籼米粉混合物 (3:2) 中制成饼干 P2, P3 和 P4。通过测定淀粉糊化特性、淀粉水解率、葡萄糖释放量、蛋白质水解率及氨基酸含量等指标, 采用体外模拟胃肠消化方法考察燕麦麸、菊粉对不同配方饼干中淀粉和蛋白质消化特性的影响。结果表明, 添加燕麦麸、菊粉可降低饼干中淀粉的糊化度, 淀粉糊化度从低到高依次为 P4 (33.41%), P2 (38.23%), P3 (38.35%), P1 (53.79%)。燕麦麸和菊粉能延缓淀粉水解产生葡萄糖, 葡萄糖释放量从低到高依次为 P3 (101.56 $\mu\text{g/mL}$), P4 (102.29 $\mu\text{g/mL}$), P2 (108.63 $\mu\text{g/mL}$), P1 (125.46 $\mu\text{g/mL}$), 菊粉对饼干中淀粉代谢的影响大于燕麦麸。饼干 P1 淀粉含量最高 (78.35%), 累积葡萄糖释放量最高 (125.46 $\mu\text{g/mL}$), 淀粉水解率最低 (31.92%)。燕麦麸和菊粉能抑制蛋白质水解率, 胃部蛋白质水解率从低到高依次为 P2 (53.79%)、P4 (64.86%)、P3 (74.28%)、P1 (83.24%), 燕麦麸对饼干中蛋白代谢的影响大于菊粉。由此可见, 添加燕麦麸、菊粉可在一定程度上抑制饼干的体外消化速率。

关键字: 饼干; 淀粉; 蛋白质; 体外消化

文章编号: 1673-9078(2020)08-110-116

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.8.0021

Inhibitory Effect of Dietary Fiber on the *in vitro* Digestion Rate of Biscuits

LI Nan, ZHANG Liang, LIU Qian-nan, LIU Wei, XU Fen, FAN Yue, HU Hong-hai

(Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Comprehensive Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

Abstract: In this study, whole potato flour and indica rice flour were mixed at a 3:2 ratio for preparing biscuits as a control (P1). Oat bran (28%), inulin (22%) or oat bran-to-inulin (28%/22%) was mixed with the whole potato flour-to-indica rice flour (at a ratio of 3:2) to make biscuits (P2, P3 and P4, respectively). The effects of oat bran and inulin on the digestibility of starch and protein in the biscuits of different formulas were investigated by *in vitro* simulated gastrointestinal digestion method based on the indicators such as starch gelatinization characteristics, starch hydrolysis rate, content of released glucose, protein hydrolysis rate and amino acid content. The results showed that the addition of oat bran and inulin reduced the gelatinization degree of the starch in the biscuits, with the decreasing order of the starch gelatinization degree as P4 (33.41%), P2 (38.23%), P3 (38.35%) and P1 (53.79%). Oat bran and inulin could delay the hydrolysis of starch to produce glucose, with the content of released glucose increasing in the order of P3 (101.56 $\mu\text{g/mL}$), P4 (102.29 $\mu\text{g/mL}$), P2 (108.63 $\mu\text{g/mL}$) and P1 (125.46 $\mu\text{g/mL}$). The effect of inulin on starch metabolism of biscuits was greater than that of oat bran. The biscuit P1 had the highest starch content (78.35%), the highest cumulative glucose content (125.46 $\mu\text{g/mL}$), and the lowest starch hydrolysis rate (31.92%). Oat bran and inulin could inhibit the rate of protein hydrolysis. The rate of gastric protein hydrolysis increased in the order of P2 (53.79%), P4 (64.86%), P3 (74.28%) and P1 (83.24%). The effect of oat bran on protein metabolism of biscuits was greater than that of inulin. These results showed that the addition of oat bran and inulin can inhibit the *in vitro* digestion rate of biscuits to a certain extent.

Key words: biscuit; starch; protein; *in vitro* digestion

引文格式:

李楠, 张良, 刘倩楠, 等. 膳食纤维对饼干体外消化速率的抑制作用[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 110-116

LI Nan, ZHANG Liang, LIU Qian-nan, et al. Inhibitory effect of dietary fiber on the *in vitro* digestion rate of biscuits [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 110-106

收稿日期: 2020-01-08

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金资助 (GARS-09-P27); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503001-2)

作者简介: 李楠 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全

通讯作者: 胡宏海 (1975-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工理论与技术

糖尿病是世界性的健康问题,国际糖尿病联合会(International Diabetes Federation, IDF)指出,预计2045年全球糖尿病患者的人数将增加至7亿。饮食治疗是糖尿病治疗中最行之有效的、最基本的治疗方法,尤其是轻型患者,经饮食控制和调节,通常不需服药或少量服药,血糖尿糖即可恢复正常乃至症状消失^[1,2]。淀粉是日常膳食中主要供能物质,淀粉的快速消化会促使餐后血糖水平迅速升高,从而诱发胰岛素耐受和糖尿病等代谢性疾病^[3]。膳食纤维作为人体的七大营养素之一,在保持消化系统健康方面扮演着重要角色,逐渐成为现代人健康饮食不可缺少的食物组分^[4],广泛应用于糖尿病专用食品开发。近年来,众多研究表明,膳食纤维能在一定程度上抑制淀粉水解^[5,6],从而控制食物的血糖指数(Glycemic Index, GI),降低其餐后血糖反应^[7,8]。燕麦麸富含膳食纤维,吸水膨胀可增加饱腹感,具有降血糖、降血脂功能。在饼干、桃酥、脆饼等产品中添加燕麦膳食纤维,可使产品组织更加紧密、口感更加酥脆^[9]。菊粉是一种天然存在的可溶性膳食纤维,具有调节血糖功能^[10]。同时,菊粉甜度是蔗糖的十分之一,且具有改善质构、减少热量等作用,可作为代替脂肪和蔗糖的低热量添加剂^[11]。由此可见,燕麦麸和菊粉既可改善食品品质,亦可赋予其降血糖等功效。但燕麦麸、菊粉对食品体系中淀粉、蛋白等其他营养组分消化影响尚需进一步深入研究。

饼干作为一种口感风味独特、食用方便、便于储运的食品,在日常生活中深受消费者喜爱^[12]。研发满足糖尿病患者的饮食需求的饼干,并对其消化特性进行解析已日渐成为研究热点,饼干原料亦不再局限于小麦粉,而日趋多样化。马铃薯全粉营养丰富,富含膳食纤维、维生素、钾、磷等矿物质,其蛋白质营养价值高,富含小麦粉等其他谷物所缺乏的赖氨酸,具有马铃薯特有的风味^[13,14]。马铃薯全粉保质期长,储运方便,以马铃薯全粉与其他谷物复配研发的新型食品,可改善食品的营养特性,越来越受到消费者喜爱^[15,16]。叶小清等^[17]将马铃薯全粉与大米粉复配可提高混合粉的溶解度、膨胀度以及胶稠度,利于产品加工。

因此本研究以马铃薯全粉、粳米粉为基础原料,配以不同比例的燕麦麸、菊粉研发饼干新产品。同时,通过体外模拟人体胃肠道消化过程,研究富含膳食纤维的燕麦麸、菊粉对饼干中淀粉、蛋白质消化的影响,为开发适合糖尿病患者食用的饼干提供科学数据参考。

1 材料与方法

1.1 原料

粳米粉(水分 11.86%,粗脂肪 0.64%,粗蛋白 8.61%,灰分 0.61%,总淀粉 78.56%,总膳食纤维 0.80%),购于市场;马铃薯全粉(水分 7.16%,粗脂肪 0.27%,粗蛋白 8.19%,灰分 2.24%,总淀粉 77.24%,总膳食纤维 2.62%),购于内蒙古凌志马铃薯科技有限公司;菊粉(水分 2.45%,菊粉含量为 95%),购于甘肃白银熙瑞生物工程有限公司;燕麦麸(水分 6.20%,脂肪 4.60%,碳水化合物 64.40%,总膳食纤维 36.70%,粗蛋白 23.80%),购于张家口易素燕麦食品开发有限公司。饼干制作中使用的其他材料包括起酥油,鸡蛋,碳酸氢钠和碳酸氢铵,购自当地商场;淀粉葡糖苷酶(Megazyme E-AMGDF),爱尔兰 Megazyme 公司;葡萄糖氧化酶试剂盒(GOP-POD),爱尔兰 Megazyme 公司;转化酶(Invertase);胰蛋白酶 200 U/mg;胃蛋白酶 3000 U/mg;脂肪酶,均购于美国 Sigma-Aldrich 公司;所用实验试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

ML204 分析天平,梅特勒-托利多仪器上海有限公司;磁力搅拌器,德国 IKA 公司;BECKMAN COULTER 离心机,美国贝克曼库尔特公司;752 型紫外分光光度计,上海光谱仪器有限公司;SHZ-A、水浴恒温振荡器,上海博讯实业有限公司;TA DSC Q100 差示扫描热量仪,美国 TA 公司。

1.3 方法

1.3.1 饼干的制备

以马铃薯全粉/粳米(3:2)混合物为饼干基础配方粉,该比例是实验室前期实验确定的。饼干制备流程如下:首先将鸡蛋液 4 g,起酥油 10 g,木糖醇 10 g,碳酸氢钠 0.5 g、碳酸氢铵 0.5 g 和一定量的水(加水量以饼干面团水分含量达到 38%为准)充分混合 120 s。然后,加入 100 g 饼干基础配方粉,再混合 6 min。混匀后,将面团静置 5 min,使用压片机将面团压成厚度为 2 mm 的面带。使用圆形饼干模具将面带切成圆形直径为 50 mm 的饼干坯,每批至少准备 25 个饼干坯。将饼干坯在 180 °C 烤箱中烘烤 12 min,然后从烤箱中取出,冷却至室温后密封保存,制得饼干样品 P1。按照上述制备流程制备以下饼干:将燕麦麸、菊粉按照添加量 28%、22% 分别添加到基础配方粉中制得饼干 P2、P3,将燕麦麸(28%)和菊粉(22%)同时添加到基础配方粉中制得饼干 P4。燕麦麸(28%)

和菊粉(22%)是以混合粉为基数来计算的。

1.3.2 基本组分的测定

淀粉含量测定: GB 5009.9-2016《食品中淀粉的测定》;蛋白质含量测定: GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》;总膳食纤维、可溶性膳食纤维、不可溶性膳食纤维含量测定: GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维的测定》。

1.3.3 淀粉糊化度测定

使用 TA DSC Q100 差示扫描热量仪,通过差示扫描热量法(DSC)研究了饼干的热性质。将 15 mg 磨碎的饼干样品与 10 μ L 去离子水混合,并密封在铝锅中。样品以 5 $^{\circ}$ C/min 速率从 35 $^{\circ}$ C 扫描到 110 $^{\circ}$ C 使用钢作为标准品校准差示扫描量热分析仪,并使用空铝盘作为参考。TA Universal Analysis TM 软件用于

分析热分析图。糊化特性为糊化的起始(T_0)和峰值(T_p)温度,以及淀粉的糊化焓 ΔH (J/g)。所有实验至少进行三次,并表示为平均值。

糊化度(Gelatinization Degree, GD)是通过将饼干原料中淀粉的糊化焓 ΔH_1 与烘烤后饼干样品中淀粉的糊化焓 ΔH_2 进行比较来计算的,计算方法如下:

$$GD(\%) = \left(1 - \frac{\Delta H_2}{\Delta H_1}\right) \times 100\% \quad (1)$$

1.3.4 体外模拟胃肠消化过程

参照 Minekus 等^[18]报道建立体外模拟胃肠消化体系,按照表 1 配制模拟胃液(simulated gastric fluid, SGF)储备溶液、模拟肠液(simulated intestinal fluid, SIF)储备溶液各 500 mL,放置-20 $^{\circ}$ C 冰箱待用。

表 1 模拟消化储备液的制备

Table 1 Preparation of stock solutions of simulated digestion fluids

组分	电解质溶液浓度		SGF (pH 3)		SIF (pH 7)	
	g/L	mmol/L	加入电解质体积 /mL	SGF 中的浓度 /mmol/L	加入电解质体积 /mL	SIF 中的浓度 /mmol/L
KCl	37.3	0.5	6.9	6.9	6.8	6.8
K ₂ HPO ₄	68.0	0.5	0.9	0.9	0.8	0.8
NaHCO ₃	84.0	1.0	12.5	25.0	42.5	85.0
NaCl	117	2.0	11.8	47.2	9.6	38.4
MgCl ₂ (H ₂ O) ₆	30.5	0.15	0.4	0.1	1.1	0.33
(NH ₄) ₂ CO ₃	48.0	0.5	0.5	0.5	-	-

注:计算每种模拟流体的最终体积为 500 mL 的体积。建议用蒸馏水补充 400 mL 储备溶液,即 1.25 浓缩液,储存于-20 $^{\circ}$ C 在实验部分,这些 1.25 浓缩液称为模拟胃液(SGF),模拟肠液(SIF)储备液。添加酶,胆汁盐, Ca²⁺溶液等和水将导致最终消化混合物中的电解质浓度正确。因 CaCl₂(H₂O)₂ 可能发生沉淀,不添加到储备溶液中,而是添加到模拟消化液和食物的最终混合物中。

胃部消化液:在 400 mL 胃部储备液中加入胃蛋白酶,胃蛋白酶浓度在最终消化混合液中 2000 U/mL,调 pH=3,加超纯水定容 500 mL。

肠部消化液:在 400 mL 肠部储备液中加入胰蛋白酶,胰酶,最终胰蛋白酶浓度 100 U/mL,胰酶 4 USP/mL,胆盐浓度 10 mmol/L。调 pH=7,加超纯水定容至 500 mL。

胃部反应:用超纯水将饼干粉末(70目)配置成浓度 8 g/100 mL 的饼干样液,调 pH=3。将 60 mL 饼干样液、60 mL 上述模拟胃液装入三角瓶中,将瓶口密封。用恒温水浴锅调节反应温度为 37 $^{\circ}$ C 转速设置为 150 RPM。以去离子水作为空白对照。分别在反应 30 min、60 min、120 min、180 min、240 min 取样 8 mL。调节 pH 至 7 以灭酶活。然后 8000 g 离心 10 min,保留上清液和沉淀。

肠部反应:将胃部反应剩余溶液调节 pH=7,加入等体积的肠部消化液于三角瓶中,瓶口密封。分别

在反应 30 min、60 min、120 min、180 min、240 min 取样 8 mL。在 95 $^{\circ}$ C 条件下水浴 5 min 以灭酶活。然后 8000 g 离心 10 min,保留上清液和沉淀。

1.3.5 测定淀粉水解率

取胃部、肠部离心后上清液各 1 mL,采用葡萄糖氧化酶法(GOP-POD)测定样品中葡萄糖生成量,进而确定淀粉水解率^[19]。

1.3.6 测定蛋白水解率

参照 Krieg 等^[20]方法,稍有改动。用超纯水将胃部沉淀物配制成 10 mg/mL 溶液,将肠部沉淀物配制成 50 mg/mL。利用 BCA 法测定胃、肠消化液中的总蛋白浓度(μ g/mL),计算各样品中的蛋白质含量,按照公式(2)计算蛋白质总水解率(PDT):

$$PDT(\%) = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_0 为样品中的蛋白质含量/mg; P_1 为模拟胃、肠液消化后剩余蛋白质含量/mg。

1.3.7 测定氨基酸含量

用离子色谱法测定消化液中游离氨基酸的含量。选定胃肠消化 240 min 的消化液 1 mL 与 1 mL 8% 磺基水杨酸混合, 10000 r 离心 15 min, 取上清液 1 mL 氮吹, 之后用 1 mL 0.02 M HCl 溶液复溶, 混匀过 0.22 μm 的滤膜, 滤液收集到氨基酸测定瓶中。每组测定 3 个平行。

1.3.8 统计方法

采用 Excel 对数据进行平均值及标准差计算; 采用 SPSS 软件对数据进行单因素方差分析, Duncan's 法进行多重比较分析, 显著性水平均为 ($p < 0.05$); 用 Pearson 法进行相关性分析; 采用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 不同配方对饼干糊化度的影响

不同配方饼干基本成分和热力学特性如表 2 所示, 饼干样品 P1、P2、P3、P4 中淀粉、蛋白质、膳

食纤维含量数据可知, 燕麦麸和菊粉的添加使饼干淀粉比例降低, 燕麦麸使饼干中蛋白质和不可溶膳食纤维比例增加, 菊粉使饼干中水溶性膳食纤维比例增加。饼干样品 P1 起始糊化温度 T_0 、糊化焓 ΔH 、淀粉糊化度 GD 均高于饼干样品 P2, P3, P4。这些结果与文献中^[21]添加可溶性纤维会降低糊化焓和糊化度的结果一致。淀粉糊化过程需要充足的水分和热量, 淀粉水化不足可能抑制淀粉糊化, 导致淀粉糊化度降低。Tudorica^[22]等也发现在生面食中添加豌豆, 瓜尔豆胶和菊粉会降低糊化焓。有学者认为, 在淀粉中添加的可溶性纤维可围绕淀粉颗粒形成基质, 减少直链淀粉溶出, 减少淀粉颗粒溶胀^[23]降低糊化焓, 限制淀粉糊化。与饼干样品 P1 相比, 饼干样品 P2, P3, P4 中, 膳食纤维含量较高 ($p < 0.05$), 膳食纤维和水具有高亲和力和, 在水分含量相对有限的条件下, 与淀粉竞争吸水, 因此相比较于饼干样品 P1 糊化度 53.79%, 饼干样品 P2 (38.23%)、P3 (38.35%)、P4 (33.41%) 糊化度显著降低 ($p < 0.05$)。

表 2 不同配方饼干的成分组成和热力学特性分析

Table 2 Composition and thermal characteristics of biscuits with different formulas

配方	P1	P2	P3	P4
淀粉/%	78.35 \pm 0.39 ^a	66.44 \pm 0.53 ^b	62.00 \pm 0.24 ^c	65.79 \pm 0.17 ^b
蛋白质/%	6.62 \pm 0.04 ^c	11.13 \pm 0.05 ^a	4.82 \pm 0 ^d	8.91 \pm 0.13 ^b
总膳食纤维/%	7.21 \pm 0.07 ^d	12.32 \pm 0.35 ^a	11.48 \pm 0.16 ^c	12.05 \pm 0.07 ^b
可溶性膳食纤维/%	0.48 \pm 0.01 ^d	0.57 \pm 0.01 ^c	2.95 \pm 0.04 ^a	1.43 \pm 0.01 ^b
不可溶性膳食纤维/%	6.72 \pm 0.08 ^d	11.75 \pm 0.02 ^a	8.62 \pm 0.02 ^c	10.61 \pm 0.07 ^b
T_p / $^{\circ}\text{C}$	82.13 \pm 0.62 ^a	79.78 \pm 0.75 ^c	82.27 \pm 0.65 ^a	81.22 \pm 0.50 ^b
T_g / $^{\circ}\text{C}$	76.60 \pm 0.17 ^a	74.60 \pm 1.01 ^a	75.55 \pm 0.15 ^a	74.56 \pm 0.74 ^b
ΔH /(J/g)	1.19 \pm 0.10 ^a	0.89 \pm 0.02 ^b	0.93 \pm 0.04 ^b	0.60 \pm 0.10 ^c
GD/%	53.79 \pm 0.06 ^a	38.23 \pm 0.06 ^b	38.35 \pm 0.08 ^b	33.41 \pm 0.07 ^b

注: 不同字母代表差异性显著 $p < 0.05$ 。

2.2 不同配方对饼干淀粉水解的影响

不同配方饼干体外模拟消化肠部葡萄糖释放量和淀粉水解率的变化趋势如图 1 和图 2 所示。淀粉水解生成葡萄糖与淀粉含量有关, 对于相同的淀粉水解速率, 淀粉含量较高, 消化过程中葡萄糖释放量更多。同时, 淀粉糊化形成的无定形结构导致 α -淀粉酶结合位点的可用性更高, 从而使得底物淀粉更容易被酶水解^[24]。

糊化程度越低, α -淀粉酶越难接触到淀粉, 水解程度就越小^[25]。由于不存在淀粉酶, 因此饼干样品在胃腔中未发生淀粉水解 (数据未显示)。这些结果与 Dartois 等^[26]人的结果一致。如图 1 所示, 所有饼干均在最初 30 min 内消化迅速, 体外消化 240 min 时饼干

P1 的葡萄糖释放量为 125.46 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 高于其他配方饼干 P2 (108.63 $\mu\text{g}/\text{mL}$), P3 (101.56 $\mu\text{g}/\text{mL}$) 和 P4 (102.29 $\mu\text{g}/\text{mL}$) 的葡萄糖释放量。但饼干 P1 在 240 min 时淀粉水解率最低 (31.92%), 低于其他配方饼干 P2 (36.72%), P3 (36.93%) 和 P4 (34.91%) 的淀粉水解率 (图 2), 这由于饼干 P1 淀粉含量 (78.35%) 和糊化度 (53.79%) 较高 (表 2)。糊化度高, 淀粉易水解, 葡萄糖释放较高。但淀粉水解率是通过计算在葡萄糖当量中水解淀粉占总淀粉含量百分比来表示, 由于饼干 P1 淀粉含量 (78.35%) 高于其他配方饼干, 最终导致饼干 P1 的淀粉水解率低于其他配方饼干。另外, 饼干样品 P4 中淀粉含量显著高于 P3 ($p < 0.05$), 但是饼干样品 P4 在 30 min 内葡萄糖释放量最低, 淀粉水解率最低。这可能是由于燕麦麸和菊粉的同时添

加使饼干样品 P4 糊化度更低 (33.41%), 淀粉更不易被酶水解。同时, 饼干样品 P4 膳食纤维含量较高, 已有研究表明膳食纤维可通过增加胃肠道内容物黏度阻碍消化酶与反应底物的接触, 降低葡萄糖等小分子的扩散速率^[27,28], 从而抑制饼干中淀粉消化。

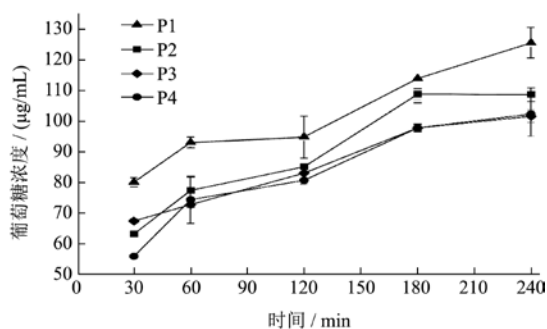


图 1 不同配方饼干消化后的体外肠部葡萄糖含量

Fig.1 *In vitro* intestinal glucose content upon digestion for different formulas biscuits

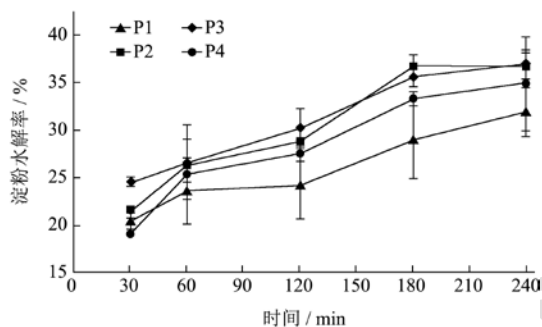


图 2 不同配方饼干体外消化后肠部淀粉水解率

Fig.2 *In vitro* intestinal starch hydrolysis upon digestion for different formulas biscuits

2.3 不同配方对饼干蛋白质水解的影响

体外消化过程中不同配方饼干蛋白在胃部和肠部的消化率变化如图 3a 和图 3b 所示。胃部消化阶段, 30~120 min 间蛋白质消化率增加显著高于 120~240 min, 由此可见蛋白质在胃部的消化主要发生于 0~120 min 间。如图 3a 所示, 不同配方饼干样品在 240 min 内的胃部蛋白质水解率从高到低依次为饼干 P1 (83.24%)、P3 (74.28%)、P4 (64.86%)、P2 (53.11%)。不同配方样品在胃部消化后氨基酸含量如图 4 所示, 胃部消化阶段饼干样品 P1 中氨基酸含量最高为 106.99 mol, 依次为饼干样品 P3 (95.22 mol)、P2 (92.24 mol) 和 P4 (83.01 mol)。由此可见, 菊粉对饼干样品中蛋白质消化的抑制效果低于燕麦麸。究其原因, 可能是由于燕麦麸主要含不溶性膳食纤维, 不溶性膳食纤维可吸收大量水分, 使食糜体积增大, 从而阻碍酶与蛋白接触; 而菊粉主要含可溶性膳食纤维, 可通过增加食糜黏度而阻碍蛋白酶与底物接触。二者对蛋白

质消化的作用机制可能不同, 从而导致抑制效果存在差异。有研究表明添加的膳食纤维成分可能与样品蛋白质部分之间形成复杂的混合物^[29], 从而抑制蛋白水解。P4 中总膳食纤维含量低于 P2, 分析可能燕麦麸和菊粉对蛋白质水解具有协同作用, 导致蛋白质水解率 P4 低于 P2。不同配方饼干样品在 240 min 内的肠部蛋白质消化率从高到低依次为饼干 P1 (98.85%)、P4 (93.17%)、P2 (87.75%)、P3 (79.89%), 比胃部 240 min 蛋白质水解率增加数值在 15~27 之间, 对比图 3a 和 3b 蛋白质水解率变化趋势表明, 肠消化阶段蛋白质消化率变化程度小于胃消化阶段, 蛋白质消化主要在发生胃部, 图 4 所示胃部和肠部氨基酸含量的变化亦进一步说明饼干中蛋白质水解主要在胃部完成。

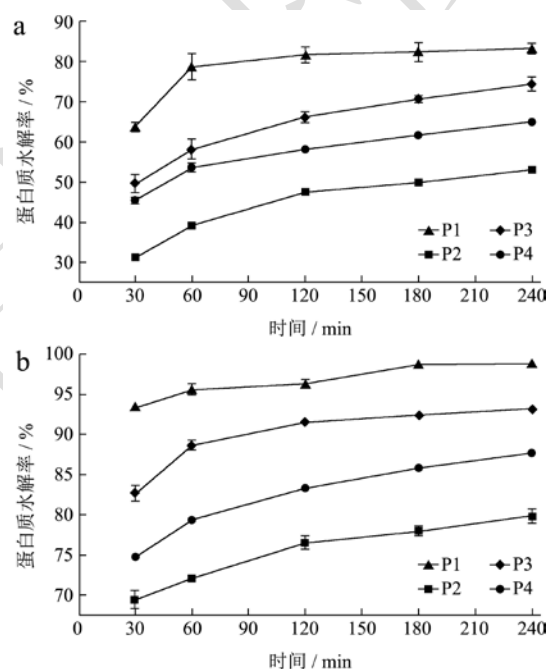


图 3 不同配方饼干体外消化后蛋白质水解率

Fig.3 *In vitro* protein hydrolysis upon digestion for different formulas biscuits

注: a: 胃部; b: 肠部。

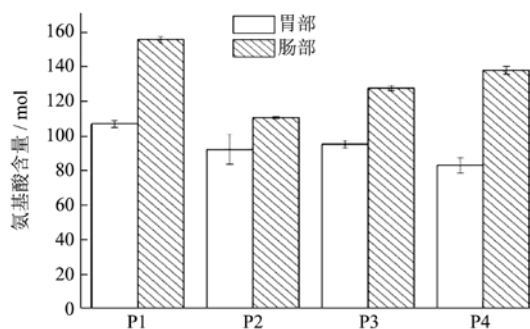


图 4 不同配方饼干体外消化后氨基酸含量

Fig.4 *In vitro* amino acid content upon digestion for different formulas biscuits

表3 膳食纤维含量与饼干消化特性指标相关性分析

	膳食纤维含量	糊化度	葡萄糖释放量	淀粉水解率	蛋白质水解率	氨基酸含量
膳食纤维含量	1					
糊化度	-0.785**	1				
葡萄糖释放量	-0.794**	0.737**	1			
淀粉水解率	0.685*	-0.412	-0.245	1		
蛋白质水解率	-0.822**	0.552	0.459	-0.513	1	
氨基酸含量	-0.583*	0.257	0.323	-0.551	0.649*	1

注: *在 0.05 水平上显著相关; **在 0.01 水平上极显著相关。

2.4 膳食纤维含量与饼干消化特性相关性分析

采用 Pearson 法对饼干样品的膳食纤维含量、淀粉糊化度、葡萄糖释放量、淀粉水解率、蛋白质水解率和氨基酸含量进行了相关性分析,结果如表 3 所示。从表中数据可以看出,饼干中膳食纤维含量与淀粉糊化度和葡萄糖释放量呈显著负相关性,同时,淀粉糊化度与葡萄糖释放量呈显著正相关性,相关性系数为 0.737;膳食纤维含量与淀粉水解率呈显著正相关,即膳食纤维含量越高,淀粉水解率越高,此结果与图 2 结果一致。由此可见,淀粉水解率还应考虑底物含量差异。膳食纤维含量与蛋白质水解率、氨基酸含量有显著负相关,且与蛋白质水解率相关性系数最大(-0.822)。上述结果表明,饼干中膳食纤维含量可显著影响与其中淀粉、蛋白质的消化水解。

3 结论

本研究采用体外模拟胃肠消化方法,研究燕麦麸或菊粉单一添加,燕麦麸和菊粉组合添加对饼干中淀粉、蛋白质水解的影响规律。通过比较 4 个不同配方饼干中淀粉和蛋白质的体外消化特性,结果发现饼干的淀粉糊化度、葡萄糖释放量、蛋白质水解率、氨基酸含量与膳食纤维含量负相关,富含膳食纤维的燕麦麸和菊粉对饼干中葡萄糖释放量、蛋白质体外水解率有抑制作用。在抑制葡萄糖释放量方面,菊粉的作用效果优于燕麦麸。而燕麦麸对饼干中蛋白质水解抑制作用优于菊粉。同时,本研究饼干体系中膳食纤维含量与淀粉水解率呈正相关性。由此可见,酶水解是一个复杂的过程,受消化酶、底物性质与含量及其共存组分的影响,燕麦麸、菊粉对饼干淀粉水解的影响机制有待进一步研究,从而为进一步改善产品品质提供科学指导。

参考文献

[1] 欧怡,袁鹏,谢勇丽.个体化饮食治疗处方在 2 型糖尿病治疗

中的应用[J].现代医院,2019,8

OU Yi, YUAN Peng, XIE Yong-li. Application of individualized diet therapy prescription in the treatment of type 2 diabetes [J]. Modern Hospital, 2019, 8

[2] 唐艳艳.糖尿病饮食治疗与教育中血糖生成指数的应用及其安全性研究[J].解放军预防医学杂志,2019,37(4):33-34

TANG Yan-yan. Application and safety of glycemic index in diabetic diet and education [J]. Journal of Preventive Medicine, 2019, 37(4): 33-34

[3] Ludwig, S D. The glycemic index: physiological mechanisms relating to obesity, diabetes, and cardiovascular disease [J]. JAMA (Journal of the American Medical Association), 2002, 287(18): 2414-2423

[4] Lambeau K V, McRorie J W. Fiber supplements and clinically proven health benefits: how to recognize and recommend an effective fiber therapy [J]. Journal of the American Association of Nurse Practitioners, 2017, 29(4): 216-223

[5] 邓婧,马小涵,赵天天,等.青稞 β -葡聚糖对淀粉体外消化性的影响[J].食品科学,2018,39(10):106-111

DENG Jing, MA Xiao-han, ZHAO Tian-tian, et al. Effects of highland barley on the digestibility of starch *in vitro* [J]. Food Science, 2018, 39(10): 106-111

[6] Dhital S, Dolan G, Stokes J R, et al. Enzymatic hydrolysis of starch in the presence of cereal soluble fibre polysaccharides [J]. Food & Function, 2014, 5(3): 579

[7] 吴佳,谢笔钧.燕麦 β -葡聚糖对 α -淀粉酶的体外作用[J].营养学报,2011,33(6):82-85

WU Jia, XIE Bi-jun. Effects of oat β -glucan on α -amylase *in vitro* [J]. Chinese Journal of Nutrition, 2011, 33(6): 82-85

[8] Schuchardt JP, Wonik J, Bindrich U, et al. Glycemic index and microstructure analysis of a newly developed fiber enriched cookie [J]. Food & Function, 2016, 7(1): 464-474

[9] 王娜,王喜萍,刘怡辰,等.燕麦麸膳食纤维功能特性与研究现状[J].粮食问题研究,2019,6

- WANG Na, WANG Xi-ping, LIU Yi-chen, et al. Functional characteristics and research status of oat bran dietary fiber [J]. *Studies on Food Problems*, 2019, 6
- [10] 谭晓琼. 菊糖的提取及其性状的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008
- TAN Xiao-qiong. Study on the extraction of inulin and its characters [D]. Chongqing: Southwest University, 2008
- [11] Shoaib M, Shehzad A, Omar M, et al. Inulin: properties, health benefits and food applications [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 147: 444-454
- [12] Sozer N, Cicerelli L, Heinio R-L, et al. Effect of wheat bran addition on *in vitro* starch digestibility, physico-mechanical and sensory properties of biscuits [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(1): 105-113
- [13] 王金秋, 武舜臣. 马铃薯主粮化的动力、障碍与前景[J]. *农业经济*, 2018, 4: 17-19
- WANG Jin-qiu, WU Shun-chen. Motivations, obstacles, and prospects of the potato grain-based strategy [J]. *Agricultural Economy*, 2018, 4: 17-19
- [14] 徐海泉, 王秀丽, 马冠生. 马铃薯及其主食产品开发的营养可行性分析[J]. *中国食物与营养*, 2015, 21(7): 10-13
- XU Hai-quan, WANG Xiu-li, MA Guan-sheng. Feasibility analysis of potato and its staple food product development [J]. *Food and Nutrition in China*, 2015, 21(7): 10-13
- [15] 侯飞娜. 马铃薯全粉营养特性分析及马铃薯-小麦复合馒头专用品种筛选研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015
- HOU Fei-na. Study on processing technology of raw potato flour and its nutritional and functional properties [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015
- [16] Friedman M. Chemistry, biochemistry, and dietary role of potato polyphenols: a review [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45(5): 1523-1540
- [17] 叶小清, 刘婷婷, 谢定源. 马铃薯全粉对大米粉理化特性的影响[J]. *食品科技*, 2017, 4: 124-128
- YE Xiao-qing, LIU Ting-ting, XIE Ding-yuan. The effect of whole potato flour on the physical properties of rice flour [J]. *Food Science and Technology*, 2017, 4: 124-128
- [18] Minekus M, Alminger M, Alvito P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food: an international consensus [J]. *Food & Function*, 2014, 5(6): 1113-1124
- [19] Ahmed R, Segal I, Hassan H. Fermentation of dietary starch in humans [J]. *American Journal of Gastroenterology*, 2000, 95 (4): 1017-1020
- [20] Krieg R C, Dong Y, Schwamborn K, et al. Protein quantification and its tolerance for different interfering reagents using the bca-method with regard to 2D SDS PAGE [J]. *Journal of Biochemical & Biophysical Methods*, 2005, 65(1): 13-19
- [21] Brennan C S, Cleary L J. Utilisation glucagel(R) in the β -glucan enrichment of breads: a physicochemical and nutritional evaluation [J]. *Food Research International*, 2007, 40(2): 0-296
- [22] Tudorica C M, Kuri V, Brennan C S. Nutritional and physicochemical characteristics of dietary fibre enriched pasta [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50: 347-356
- [23] Ding L, Huang Q, Li H, et al. Controlled gelatinization of potato parenchyma cells under excess water condition: structural and *in vitro* digestion properties of starch [J]. *Food & Function*, 2019, 10
- [24] Dhital S, Warren FJ, Butterworth PJ, et al. Mechanisms of starch digestion by α -amylase-structural basis for kinetic properties [J]. *CRC Critical Reviews in Food Technology*, 2017, 57(5): 875-892
- [25] Holm J, Lundquist I, Björck I, et al. Degree of starch gelatinization, digestion rate of starch *in vitro*, and metabolic response in rats [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1988, 47(6): 1010-1016
- [26] Dartois A, Singh J, Kaur L, et al. Influence of guar gum on the *in vitro* starch digestibility-rheological and microstructural characteristics [J]. *Food Biophysics*, 2010, 5(3): 149-160
- [27] Fabek H, Goff H D. Simulated intestinal hydrolysis of native tapioca starch: understanding the effect of soluble fibre [J]. *Bioactive Carbohydrates & Dietary Fiber*, 2015, 6(2): 83-98
- [28] Dikeman C L, Fahey G C. Viscosity as related to dietary fiber: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2006, 46(8): 649-663
- [29] Bilgiçli N, İbanog˘lu Ş, Herken E N. Effect of dietary fibre addition on the selected nutritional properties of cookies [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(1): 86-89