

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.01.013

谢芳, 丁丽, 黄强, 等. 粒径和面筋蛋白含量对面条中淀粉体外消化性的影响[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(1): 96-102.

XIE F, DING L, HUANG Q, et al. Effects of particle size and gluten content on starch digestibility of noodles *in vitro*[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(1): 96-102.

粒径和面筋蛋白含量对面条中淀粉体外消化性的影响

谢芳¹, 丁丽¹, 黄强^{1,3}, 张斌^{1,3}, 王桂丹²✉

- (1. 华南理工大学, 食品科学与工程学院, 广东 广州 510640;
2. 湖南未来健康科技集团有限公司, 湖南 长沙 410000;
3. 中新国际联合研究院, 广东 广州 511363)

摘要: 为研究粒径和面筋蛋白含量对面条中淀粉体外消化性的影响, 在不同粒径的小麦面粉中分别添加 0%、5% 和 10% 的面筋蛋白制作中式面条, 烘干研磨后分离出大颗粒与小颗粒面条, 研究面条样品的形貌特征、结构特性热力学特性和淀粉体外消化特性。结果表明, 随着面条中面筋蛋白含量增加, 面条表面的平滑度增强, 糊化温度升高而焓值降低, 且蒸煮后面条中形成的面筋网络面积增加。体外消化动力学结果显示随着面粉粒径的减小或面筋蛋白含量的增大, 淀粉消化程度降低。

关键词: 面条; 粒径; 面筋蛋白; 热力学特性; 淀粉体外消化性

中图分类号: TS231 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)01-0096-07

网络首发时间: 2020-12-23 14:26:28

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20201223.1357.014.html>

Effects of Particle Size and Gluten Content on Starch Digestibility of Noodles *in Vitro*

XIE Fang¹, DING Li¹, HUANG Qiang^{1,3}, ZHANG Bin^{1,3}, WANG Gui-dan²✉

- (1. South China University of Technology, School of Food science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. Hunan Future Health Technology Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China
3. Sino-Singapore International Joint Research Institute, Guangzhou, Guangdong 511363, China)

Abstract: In order to study the effects of particle size and gluten content on the starch digestibility of noodles *in vitro*, 0%, 5% and 10% of gluten were added into wheat flour with different particle size to make Chinese noodles, and noodles with large and small particles were separated after drying and grinding. The morphology, structural thermal properties and *in vitro* starch digestion properties of noodle samples were investigated. The results showed that with the increase of gluten content in noodle samples, the surface smoothness and gelatinization temperatures were increased, while the enthalpy values were decreased, and the area of gluten network formed in the noodles after cooking were increased. The *in vitro* digestion kinetics results showed that the starch digestion extent was decreased with the decreasing of flour size or the increasing

收稿日期: 2020-06-15

基金项目: 中新国际联合研究院-湖南未来健康科技集团有限公司资助(201-D119002)

Supported by: Sino-Singapore International Joint Research Institute-Hunan Future Health Technology Project (No. 201-D119002)

作者简介: 谢芳, 女, 1992 年出生, 在读研究生, 研究方向为功能碳水化合物。E-mail: 353097240@qq.com.

通讯作者: 王桂丹, 女, 1983 年出生, 硕士, 工程师, 研究方向为肥胖与慢性病的健康管理。E-mail: 280443599@qq.com.

of gluten content.

Key words: noodles; particle size; gluten; thermal properties; *in vitro* starch digestibility

目前,我国已成为全球糖尿病患者人数最多的国家,患者人数高达 1.164 亿。研究表明,现代社会 II 型糖尿病和肥胖症患者的急剧增加与食品中淀粉的快速消化吸收密切相关^[1-2]。不同食品体系下,淀粉粒径及非淀粉成分如蛋白和油脂含量等也有所不同,这可能会造成淀粉消化速率和消化程度的差异,从而对人体餐后血糖应答有非常重要的影响。Al-Rabadi 等^[3]研究了粒径尺寸对大麦和高粱中淀粉消化性的影响,发现大麦或高粱的颗粒越大,淀粉的消化速率越缓慢,并且同一粒径下,大麦和高粱的淀粉消化速率之间也存在显著差异。Nguyen 等^[4]也通过研究证实,经不同研磨方式制备的不同粒径的豌豆中,淀粉的消化性也符合颗粒越大消化越慢的规律;同时豌豆中蛋白质的存在可以降低淀粉颗粒在研磨过程中的结构破坏,从而进一步抑制淀粉的消化性。另一方面,Zou 等^[5]以小麦的不同品种 Jandaroi、Caparoi 和 Yawa 为材料制作意大利面,通过除去或保留蛋白成分来研究蛋白质对淀粉消化性的影响,结果显示除去蛋白后,样品的消化性提高,这表明面筋蛋白对淀粉的物理性包裹作用可以有效降低淀粉的消化速率及消化程度。同时,Bhattarai 等^[6]也发现小麦淀粉中的面筋蛋白被水解后,淀粉的水解率也随之上升,一方面是由于淀粉-蛋白复合物的形成可减少淀粉与 α -淀粉酶接触面积,另一方面在于面筋蛋白可以与淀粉竞争性吸附 α -淀粉酶从而抑制了部分淀粉酶的活性。

面条是我国的传统主食,一般以小麦面粉为原料,经和面、揉面、醒面和压制成条等工艺制成^[7]。本研究以不同粒径小麦面粉为原料,添加 0%~10% 面筋蛋白制备出中式面条,研究了面条的粒径分布、形貌特征、热力学特性以及淀粉体外消化动力学,以期揭示面条中面粉及成品粒径和面筋蛋白含量对淀粉消化的影响规律。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

猪胰 α -淀粉酶、4-羟基苯甲酰肼(PAHBAH)、

面筋蛋白和磷酸盐缓冲盐溶液(PBS): 美国 Sigma-Aldrich 公司; 小麦面粉: 澳洲 Manildra Group 公司; 淀粉总量检测试剂盒: 爱尔兰 Megazyme 公司。

MR Silver 恒温磁力搅拌器: 德国 Heidolph 公司; DSC-8000 型差式扫描量热仪: 美国 Perkin-Elmer); MS2000 粒度仪: 英国 Malvern 仪器有限公司; EVO 18 扫描电子显微镜: 德国 Carl Zeiss 公司; HMJ-D3826 搅面机: 广东小熊电器有限公司。

1.2 面粉成分测定

总淀粉含量: 淀粉总量检测试剂盒进行测定; 蛋白质和含量: 参照 GB/T 5009.5—2003 凯氏定氮法;

粗脂肪含量: 参照 GB 5009.6—2016 索氏抽提法。

1.3 面条制备

将面粉依次通过 100 和 200 目筛, 收集未通过 200 目(大颗粒面粉, LF)以及通过 200 目(小颗粒面粉, SF)的部分。然后在大和小颗粒面粉中分别添加 0%(w/w), 5%(w/w)和 10%(w/w)的面筋蛋白(干基), 按 m (面粉和面筋蛋白的混合物) : m (水) = 2 : 1 的质量比进行面条的制作。面条制备工艺为: 揉面 20 min, 醒面 30 min, 最终制作成宽 0.8 cm, 厚 0.2 cm 的中式面条。将面条置于 40 °C 烘箱干燥 12 h 后粉碎, 依次过 40、60 和 100 目筛^[4], 收集未通过 60 目(大颗粒面条, LN)以及未通过 100 目的部分(小颗粒面条, SN)。样品编号、过筛及添加面筋蛋白计量如表 1 所示。

1.4 粒径测定

面粉或面条的颗粒粒径采用粒径分析仪测定。参数设定: 分散剂水的折射率为 1.33, 颗粒的折射率和吸收率分别设定为 1.52 和 0.1。将样品配制成 1% (w/w) 的悬浮液, 滴加到粒度仪测定装置中, 于转速 2 500 r/min 下使样品搅拌分散均匀, 测定颗粒的平均粒径及粒径分布情况^[8]。

表 1 样品编号、过筛目数及原料配比情况

Table 1 Sample number, screen size and raw material ratio

样品编号	面粉过筛(目)	配比(w/w)	面条过筛(目)
LF-0%Glu-LN	100~200 之间	面粉+0%面筋蛋白	40~60 之间
LF-0%Glu-SN	100~200 之间	面粉+0%面筋蛋白	60~100 之间
LF-5%Glu-LN	100~200 之间	面粉+5%面筋蛋白	40~60 之间
LF-5%Glu-SN	100~200 之间	面粉+5%面筋蛋白	60~100 之间
LF-10%Glu-LN	100~200 之间	面粉+10%面筋蛋白	40~60 之间
LF-10%Glu-SN	100~200 之间	面粉+10%面筋蛋白	60~100 之间
SF-0%Glu-LN	通过 200	面粉+0%面筋蛋白	40~60 之间
SF-0%Glu-SN	通过 200	面粉+0%面筋蛋白	60~100 之间
SF-5%Glu-LN	通过 200	面粉+5%面筋蛋白	40~60 之间
SF-5%Glu-SN	通过 200	面粉+5%面筋蛋白	60~100 之间
SF-10%Glu-LN	通过 200	面粉+10%面筋蛋白	40~60 之间
SF-10%Glu-SN	通过 200	面粉+10%面筋蛋白	60~100 之间

注: L 表示大颗粒 (Large, L); S 表示小颗粒 (Small, S); F 表示面粉 (Flour, F); Glu 表示添加的面筋蛋白 (Gluten, Glu); N 表示面条 (Noodle, N)。

Note: L, Large; S, Small; F, Flour; Glu, Gluten; N, Noodle.

1.5 显微结构观察

1.5.1 扫描电子显微镜观察

采用扫描电子显微镜对大颗粒面条 (带有“LN”字符的样品) 进行颗粒形貌的观察^[9]。用导电双面胶将处理好的样品固定在样品台上, 置于离子溅射仪中喷金, 选择具有代表性的样品, 在扫描电镜下放大一定倍数观察面条样品, 扫描电压为 10 kV。

1.5.2 激光共聚焦观察

将大颗粒面条样品置于 100 °C 蒸煮 10 min, 冷却至室温, 加入罗丹明 B (0.05% w/w) 1 mL 作用 30 min, 用 0.01 M PBS 清洗 3 遍。取少量样品于载玻片上, 用盖玻片紧压制备。采用 40×/1.25 oil 物镜观察区域与层面, 选择 488 nm 的 Ar 离子激发波长与 543 nm He/Ne 离子激发波长扫描, 扫描密度为 1 024×1 024, 采集并保存荧光图像^[10]。

1.6 热力学性质分析

准确称量面条样品 (淀粉干基 3 mg), 加入去离子水 7 mg, 于室温密闭条件下平衡 12 h。以空皿为参比对照, 然后以 10 °C/min 的速率升温, 温度扫描范围为 30~120 °C^[11]。用 Pyris 软件分别计算出起始温度 (T_0), 峰值温度 (T_p), 终止温度 (T_c) 及焓值 (ΔH) 的变化。

1.7 淀粉体外消化动力学

准确称量面条样品 (淀粉干基 50 mg), 加入

15 mL 0.01 M PBS。将所有样品放置于 100 °C 水浴下蒸煮 10 min。冷却至 37 °C 后, 加入猪胰 α -淀粉酶 (3 U/50 mg 干基淀粉), 在 0、5、10、15、20、30、40、60、80、100 和 120 min 时, 分别取出 300 μ L 反应液, 10 000×g 离心 5 min。上清液中的麦芽糖当量用对羟基苯甲酸酰肼法测定, 于 410 nm 波长下测得吸光值。用下式计算麦芽糖当量释放量并作为样品中淀粉消化率^[12]。

$$\text{麦芽糖释放当量} = \frac{\text{上清液中麦芽糖总当量}}{\text{淀粉干基}} \times 100\%$$

对消化速率曲线采用斜率对数 (LOS) 拟合以得到消化速率系数 (k, min^{-1})。公式如下:

$$\ln\left(\frac{dC}{dt}\right) = \ln(C_{\infty}k) - kt$$

式中: t , 反应时间 (min); C , 在反应时间 t 时反应物浓度; C_{∞} , 反应结束时反应物浓度; k , 速率常数 (min^{-1})。

1.8 数据统计与分析

各组实验数据均重复 3 次, 用 SPSS 18.0 进行统计分析, 用 EXCEL 2019 进行图表制作。

2 结果与讨论

2.1 粒径分布

经测定, 面粉的总淀粉、蛋白质和脂肪含量分别为 $(76.7 \pm 0.5)\%$ 、 $(9.0 \pm 0.2)\%$ 和 $(1.3 \pm 0.1)\%$ (湿基)。蛋白含量显示本实验所用面粉为中筋面粉。制作面条一般选用高筋面粉, 但为探究面筋蛋白含量对面条中淀粉消化性的影响, 将分别添加 0%、5% 和 10% 的面筋蛋白于面粉中进行面条制作, 因此选用中筋面粉作为实验原料。

对大颗粒和小颗粒面粉以及大颗粒和小颗粒面条这 4 个样品进行粒径分布测定, 结果如图 1 所示。所有样品均呈现单峰分布, 且大颗粒面粉、小颗粒面粉、大颗粒面条和小颗粒面条的平均粒径 ($D[4,3]$) 分别为 $(146.6 \pm 1.8) \mu\text{m}$ 、 $(55.0 \pm 0.9) \mu\text{m}$ 、 $(577.3 \pm 2.1) \mu\text{m}$ 和 $(340.6 \pm 1.5) \mu\text{m}$ 。这 4 个样品的粒度分布有明显差异, 可进一步探究不同粒径分布对淀粉结构特性及体外消化动力学的影响。

2.2 颗粒形貌

为探究不同面筋蛋白含量及面粉粒径对面条样品表现形貌的影响, 选择具有代表性且易观察

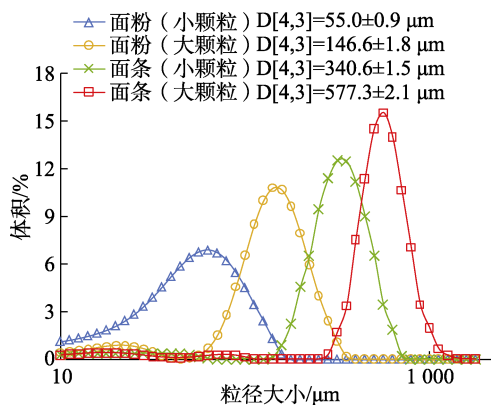


图 1 面粉与面条的粒径分布

Fig.1 The particle size distribution of wheat flour and noodles

的大颗粒面条 (LN) 样品进行扫描电子显微镜观测。不同面筋蛋白添加量及不同粒径面粉下制备的大颗粒面条样品的扫描电子显微图如图 2 所示。在大颗粒面粉制备的面条中, 淀粉颗粒凸起呈球形或者圆盘形, 且面筋蛋白网络结构包裹着淀粉颗粒。同时可明显观察到, 随着面筋蛋白含量的增多, 面条样品中凸起的淀粉颗粒数量逐渐减少, 表面的平滑度增大 (A2, B2 和 C2)。这可能是由于随着面条样品中面筋蛋白含量的增加, 面筋蛋白网络面积增大, 淀粉颗粒被面筋网络包裹得也就越紧实, 因而面条表面也越平整光滑。

同一面筋蛋白添加量下, 与大颗粒面粉相比, 小颗粒面粉制备的面条样品凸起的淀粉数量较少, 表面更平整光滑, 这可能是由于小颗粒面粉粒径小, 比表面积更大^[13], 与面筋蛋白相互作用时接触面积更多, 因而被面筋蛋白包裹的效果更好。同样, 随着样品中面筋蛋白含量的增多, 小颗粒面粉制备的面条表面光滑度增大 (D2, E2 和 F2)。陈旭^[9]将淀粉、脂质和蛋白进行低温复合后用扫描电子显微镜观测, 也发现脂质与蛋白的加入使淀粉颗粒粘连在一起, 并形成了一种类似微胶囊的表观形态。

为观测面条糊化后面筋网络的变化, 用罗丹明 B 对蒸煮后不同面筋蛋白添加量及不同粒径面粉下制备的大颗粒面条 (LN) 样品的面筋蛋白染色后进行激光共聚焦观测, 如图 3 所示。所有样品中均无淀粉颗粒的存在, 这可能是由于面条中的淀粉经 100 °C 蒸煮 10 min 后, 已完全糊化。然而, Zou 等^[14]利用 FITC 与罗丹明 B 对蒸煮后的意大利面进行染色观测, 发现意大利面蒸煮 10 min 后仍存在较多的淀粉颗粒。这可能是由于意大利面由硬质小麦所制, 品质较硬, 本就难于蒸煮透彻, 而本实验中所制的面条为中式面条, 易于蒸煮, 所以两者在原料与工艺上有很多不同

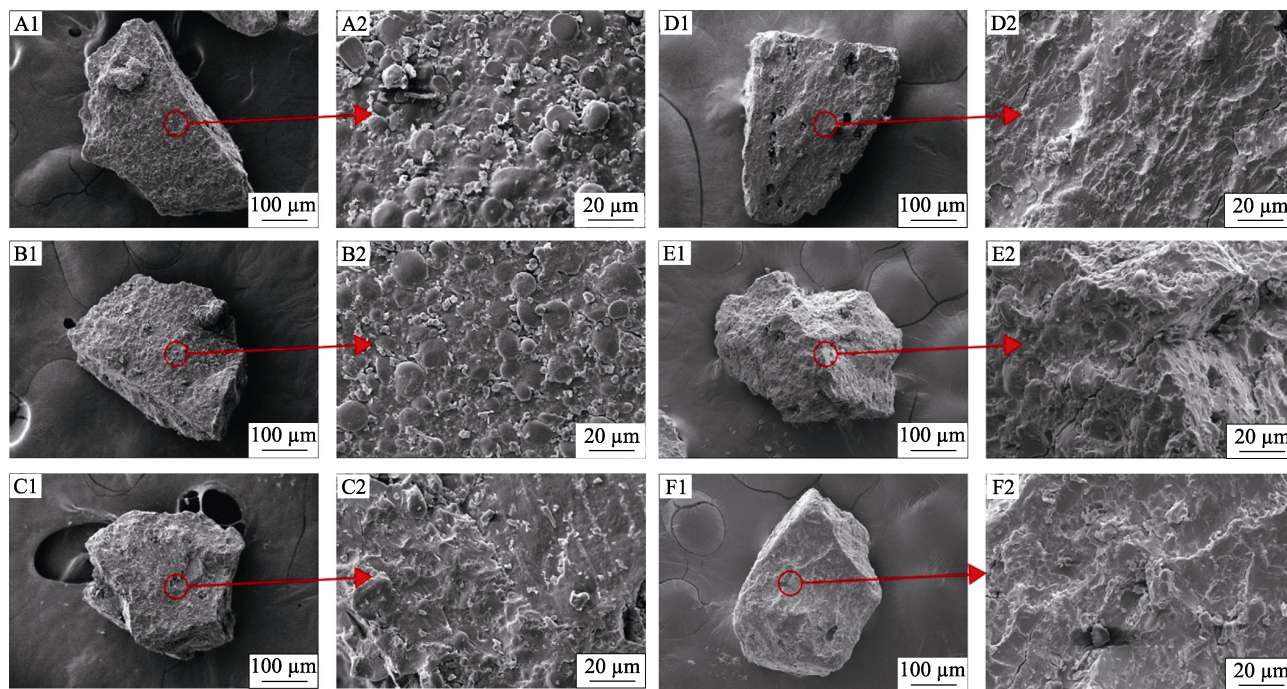


图 2 大颗粒面条样品的扫描电子显微镜图 (A1 与 A2、B1 与 B2、C1 与 C2、D1 与 D2、E1 与 E2、F1 与 F2 分别代表样品 LF-0%Glu-LN、LF-5%Glu-LN、LF-10%Glu-LN、SF-0%Glu-LN、SF-5%Glu-LN、SF-10%Glu-LN 颗粒及颗粒表面形态)

Fig.2 Scanning electron microscopy of noodles samples with large particles (A1 and A2, B1 and B2, C1 and C2, D1 and D2, E1 and E2 and F1 and F2 represent LF-0%Glu-LN, LF-5%Glu-LN, LF-10%Glu-LN, SF-0%Glu-LN, SF-5%Glu-LN and SF-10%Glu-LN, respectively)

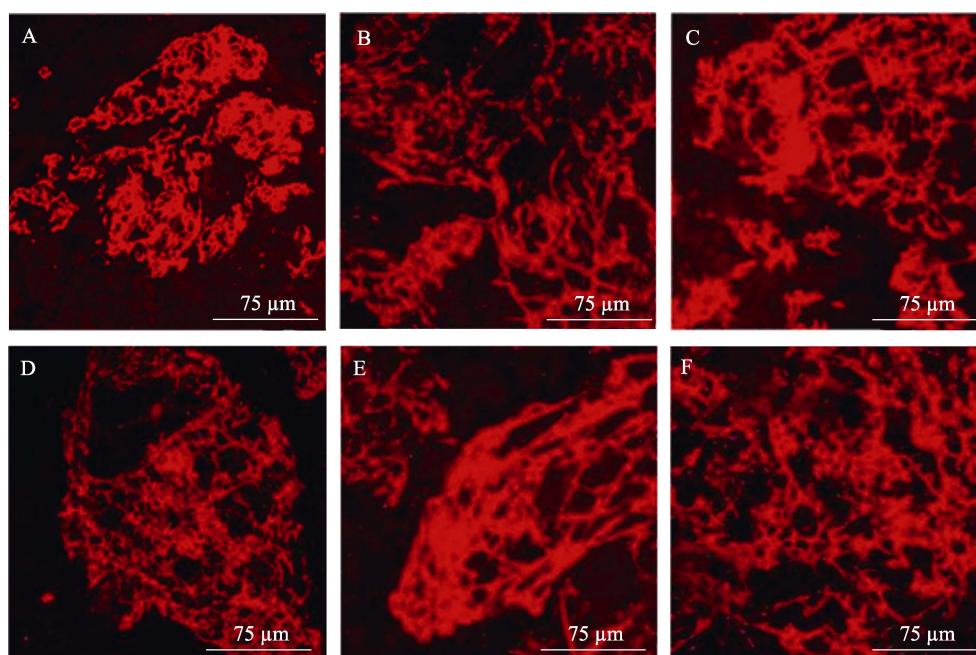


图 3 蒸煮后大颗粒面条样品的激光共聚焦显微镜图 (A、B、C、D、E 和 F 分别代表 LF-0%Glu-LN、LF-5%Glu-LN、LF-10%Glu-LN、SF-0%Glu-LN、SF-5%Glu-LN 和 SF-10%Glu-LN 样品)
Fig.3 CLSM micrographs of cooked noodles samples with large particles (A, B, C, D, E and F represent LF-0%Glu-LN, LF-5%Glu-LN, LF-10%Glu-LN, SF-0%Glu-LN, SF-5%Glu-LN and SF-10%Glu-LN, respectively)

之处导致不同的观测结果。另外，在大颗粒和小颗粒面粉制备的面条中，随着面筋蛋白含量的增加，其所形成的面筋网络结构面积均呈现扩大的趋势，与扫描电子显微镜图片结果（图 2）一致。

2.3 热力学特性

面条样品的热力学特性如表 2 所示。糊化温

表 2 面条样品的热力学特性
Table 2 Thermal properties of noodle samples

样品编号	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
LF-0%Glu-LN	60.4±0.2 ^d	66.4±0.6 ^c	73.7±0.2 ^{abcd}	9.7±0.6 ^a
LF-0%Glu-SN	61.6±0.4 ^{abcd}	67.5±1.0 ^{abc}	74.3±1.2 ^{abcd}	8.3±0.2 ^b
LF-5%Glu-LN	60.7±0.8 ^{bcd}	67.0±1.1 ^{abc}	73.4±0.7 ^{bcd}	6.2±0.8 ^c
LF-5%Glu-SN	61.8±1.0 ^{ab}	68.3±0.7 ^a	74.8±1.0 ^{ab}	6.2±0.8 ^c
LF-10%Glu-LN	61.6±0.4 ^{abcd}	68.3±0.1 ^a	74.6±0.8 ^{abc}	6.4±0.6 ^c
LF-10%Glu-SN	62.2±0.3 ^a	68.0±0.2 ^{abc}	75.0±0.8 ^a	5.5±0.2 ^c
SF-0%Glu-LN	60.2±0.1 ^d	66.2±0.8 ^c	73.3±0.9 ^{bcd}	8.9±0.7 ^{ab}
SF-0%Glu-SN	60.8±0.5 ^{bcd}	67.2±0.5 ^{bc}	72.8±0.6 ^d	7.8±0.6 ^b
SF-5%Glu-LN	60.4±0.3 ^{cd}	66.6±0.1 ^{abc}	73.1±0.3 ^{cd}	6.2±0.8 ^c
SF-5%Glu-SN	61.6±0.4 ^{abc}	68.0±0.8 ^{ab}	74.9±0.3 ^a	5.8±0.7 ^c
SF-10%Glu-LN	61.1±0.5 ^{bcd}	67.3±0.5 ^{abc}	73.8±0.8 ^{abcd}	6.2±0.7 ^c
SF-10%Glu-SN	61.2±0.6 ^{bcd}	68.1±0.2 ^{ab}	74.9±0.6 ^a	5.5±0.5 ^c

注：采用 SPSS 19.0 软件进行 Duncan 检验方法分析，并以平均值±标准差形式表示，同一列中不同小写字母表示差异性显著 ($P < 0.05$)。

Note: SPSS 19.0 software was used for Duncan test analysis, and values are means ± SD. Values with different letters in the same column are significantly different at $P < 0.05$.

度 (T_o , T_p , T_c) 反映淀粉结晶的热稳定性，而糊化焓值 (ΔH) 与淀粉熔融的双螺旋数目有关^[15]。大颗粒或小颗粒面粉制备的面条样品中，随着面筋蛋白添加量的增大， T_o 、 T_p 和 T_c 均呈现升高的趋势，而 ΔH 显著降低，表明面筋蛋白网络可抑制淀粉颗粒的糊化膨胀。由扫描电子显微镜及激光共聚焦图片结果可知，面筋蛋白含量越高，面筋蛋白形成的网状结构面积越大，淀粉颗粒被包裹的紧实程度越高，因而需要较高温度才能将淀粉糊化。同时， ΔH 的降低主要归因于面筋蛋白的吸水性。随着面筋蛋白的增多，体系中被面筋蛋白消耗的水分增多，淀粉所吸取的水分随之减少，致使 DSC 测试过程中淀粉无法完全糊化膨胀，且面筋蛋白含量越多则此现象越显著，致使淀粉颗粒糊化不完全^[9]。然而，面粉或面条的粒径大小对其热力学特性影响不显著，这与 Mahasukhonthachat 等^[16]的研究结果一致。这可能是由于大颗粒与小颗粒面粉或面条之间粒径差别较小，故没有导致显著的热力学性质差异。

2.4 淀粉体外消化性

采用猪胰 α -淀粉酶在 3 U/50mg 的酶浓度下研究蒸煮后面条样品中淀粉的体外消化动力学（图 4）^[17]。斜率对数 (LOS) 模型能很好地拟

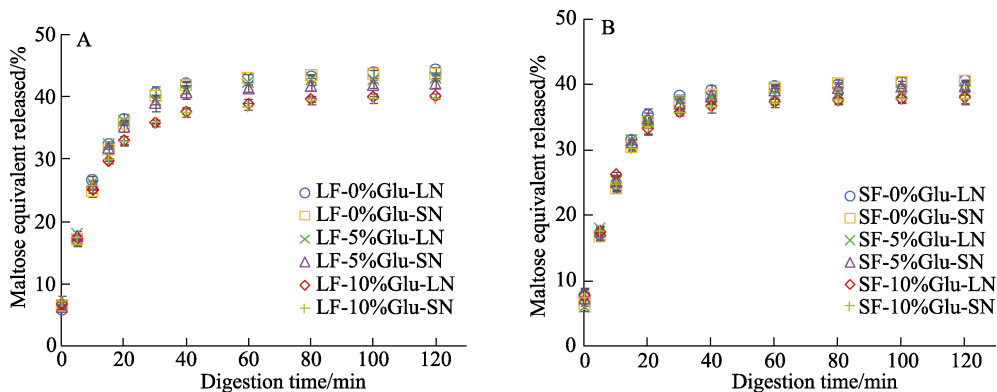


图 4 大颗粒 (A) 或小颗粒 (B) 面粉制备的面条蒸煮后淀粉的消化速率曲线图

Fig.4 Digestion kinetic profiles of the cooked noodle samples prepared from flour with large (A) or small (B) particle size

合淀粉基食品材料的消化动力学曲线，并因其对消化速率常数变化的高敏感性和对最终产品浓度的准确预测性而被广泛应用^[18]。采用 LOS 模型得出的消化速率 (k , min^{-1}) 和 120 min 时的消化程度 (C_{120} , %) 见表 3。所有面条样品均呈现两相消化动力学：快相 (k_1) 和慢相 (k_2)。面条消化前期速率比后期快，这是由于蒸煮过程中，面筋蛋白网络结构对内部淀粉颗粒包裹的较紧实，保护作用较大，而外部淀粉颗粒受到的破坏作用大，且 α -淀粉酶是从外部开始接触样品的，所以面条消化的第一阶段速率快，而第二阶段速率慢^[19]。

表 3 面条中淀粉的消化速率 (k , min^{-1}) 与消化程度 (C_{120} , %)
 Table 3 The digestion rate (k , min^{-1}) and extent C_{120} , (%) of starch in noodles

样品	消化程度(C_{120} ,%)	$k_1/(\text{min}^{-1})$	$k_2/(\text{min}^{-1})$
LF-0%Glu-LN	44.2±0.6 ^a	0.076 5	0.063 2
LF-0%Glu-SN	43.7±0.3 ^{ab}	0.069 7	0.055 3
LF-5%Glu-LN	42.9±0.1 ^{bc}	0.083 7	0.041 9
LF-5%Glu-SN	42.0±0.5 ^c	0.081 3	0.052 7
LF-10%Glu-LN	40.1±0.4 ^{de}	0.089 0	0.037 7
LF-10%Glu-SN	39.8±0.1 ^{de}	0.087 6	0.036 2
SF-0%Glu-LN	40.5±0.1 ^d	0.082 7	0.059 8
SF-0%Glu-SN	40.6±0.2 ^d	0.083 4	0.040 3
SF-5%Glu-LN	39.1±0.1 ^f	0.094 0	0.057 0
SF-5%Glu-SN	39.7±0.1 ^{de}	0.095 5	0.050 5
SF-10%Glu-LN	38.1±0.6 ^{fg}	0.097 5	0.038 7
SF-10%Glu-SN	37.9±0.6 ^g	0.097 0	0.034 8

注：采用 SPSS 19.0 软件进行 Duncan 检验方法分析，并以平均值±标准差形式表示，同一列中不同小写字母表示差异性显著 ($P < 0.05$)。

Note: SPSS 19.0 software was used for Duncan test analysis, and values are means ± SD. Values with different letters in the same column are significantly different at $P < 0.05$.

2.4.1 面粉颗粒大小的影响

在相同面条颗粒大小及面筋蛋白添加量下，大颗粒面粉 (LF) 制备面条的消化速率 (k_1) 低于小颗粒面粉 (SF)，与 Al-Rabadi 等^[3]报道的大颗粒比小颗粒消化缓慢结果一致。这是由于与 α -淀粉酶作用时，小颗粒面粉的比表面积更大，受到酶的作用面积会较大，因而水解的速率较快^[4,20]。然而，大颗粒面粉的 k_2 值高于小颗粒面粉，这归因于在面条蒸煮过程中，由于小颗粒面粉的比表面积大，面筋蛋白对面条内部小颗粒面粉包裹的致密程度比大颗粒面粉的高，致使大颗粒面粉的 k_2 值比小颗粒面粉的大^[21]。最后，大颗粒面粉的最终消化程度显著高于小颗粒面粉。

2.4.2 面条颗粒大小的影响

在相同面粉颗粒大小及面筋蛋白添加量下，面条颗粒大小对样品中淀粉消化速率与消化程度无显著性影响，与样品热力学性质结果 (表 2) 相符。然而，Zou 等^[5]发现相比于意大利面块状物，意大利面粉的淀粉消化速率更快。这可能是由于本实验中样品的制备为不同面条颗粒大小的粉末，颗粒大小的差异小于粉末与块状物，因而不能导致显著的消化性差异。

2.4.3 面筋蛋白添加量的影响

在相同颗粒条件下，随着面筋蛋白含量的增加，样品的消化速率与消化程度都呈现降低的趋势。这是由于随着面筋蛋白的增加，面筋蛋白网络对淀粉颗粒的物理包裹作用增强 (如图 2)，限制了淀粉酶对淀粉底物的可及度。Jenkins 等^[22]发现淀粉与蛋白之间可以形成复合物，减少淀粉与 α -淀粉酶的接触面积。同时，López-Barón 等^[23]

指出蛋白在高温处理后和淀粉的作用效果优于未蒸煮的作用效果,表明随着面筋蛋白含量的增多,蒸煮后淀粉-面筋蛋白复合物相互作用效果越强。陈旭^[9]也证实面筋蛋白是可以有效吸附 α -淀粉酶,即面筋蛋白可以限制部分 α -淀粉酶的活动,从而减少酶与淀粉的作用。综上所述,面筋蛋白包裹淀粉颗粒的物理性“保护作用”、淀粉-面筋蛋白的复合物作用以及蛋白对于 α -淀粉酶的吸附作用,导致淀粉的消化性随着面筋蛋白含量的增多而降低。

3 结论

本文通过构建面条成品体系,研究了颗粒大小和面筋蛋白含量对面条中淀粉体外消化性的影响。结果表明,随着面筋蛋白含量的增加,面条颗粒表面平滑度提高,蒸煮后面筋网络面积增大。热力学性质表明,随着面筋蛋白的增加,面条的糊化温度升高,焓值降低,而面粉粒对面条热力学性质无显著影响。消化过程中,面条前期的消化速率比后期的快,且随着面筋蛋白含量的增多,淀粉的消化性呈现下降的趋势,而面条颗粒大小对淀粉的消化速率和程度无显著性影响。

参考文献:

- [1] BARCLAY A W, PETOCZ P, MCMILLAN-PRICE J, et al. Glycemic index, glycemic load, and chronic disease risk—A meta-analysis of observational studies[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2008, 87(3): 627-637.
- [2] LIVESEY G, TAYLOR R, HULSHOF T, et al. Glycemic response and health—A systematic review and meta-analysis: Relations between dietary glycemic properties and health outcomes[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2008, 87(1): 258-268.
- [3] AL-RABADI G J S, GILBERT R G, GIDLEY M J. Effect of particle size on kinetics of starch digestion in milled barley and sorghum grains by porcine α -amylase[J]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 50(2): 198-204.
- [4] NGUYEN G T, GIDLEY M J, SOPADE P A. Dependence of in-vitro starch and protein digestions on particle size of field peas (*Pisum sativum* L.)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(1): 541-549.
- [5] ZOU W, SISSONS M, GIDLEY M J, et al. Combined techniques for characterising pasta structure reveals how the gluten network slows enzymic digestion rate[J]. *Food Chemistry*, 2015, 188: 559-568.
- [6] BHATTARAI R R, DHITAL S, GIDLEY M J. Interactions among macronutrients in wheat flour determine their enzymic susceptibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 61: 415-425.
- [7] 孙耀军. 藜麦全粉对面条品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(7): 47-51.
SUN Y J. Effect of quinoa flour on quality of noodles[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(7): 47-51.
- [8] 杨银洲. 淀粉球晶的制备及其在 Pickering 乳液中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [9] YANG Y Z. Preparation of starch spherulites and its application in Pickering emulsions[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [10] 陈旭. 蛋白与脂质对淀粉消化特性的影响机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [11] CHEN X. Mechanism for the digestion properties of starch influenced by lipid and protein[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [12] PEIGHAMBARDUST S H, VAN DER GOOT A J, VAN VLIET T, et al. Microstructure formation and rheological behaviour of dough under simple shear flow[J]. *Journal of Cereal Science*, 2006, 43(2): 183-97.
- [13] ZHU F, CAI Y, SUN M, et al. Effect of phytochemical extracts on the pasting, thermal, and gelling properties of wheat starch[J]. *Food Chemistry*, 2009, 112(4): 919-923.
- [14] ZHANG B, DHITAL S, FLANAGAN B M, et al. Extrusion induced low-order starch matrices: Enzymic hydrolysis and structure[J]. *Carbohydrate polymers*, 2015, 134(485-496).
- [15] DHITAL S, SHRESTHA A K, GIDLEY M J. Relationship between granule size and *in vitro* digestibility of maize and potato starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 82(2): 480-488.
- [16] ZOU W, SISSONS M, WARREN F J, et al. Compact structure and proteins of pasta retard *in vitro* digestive evolution of branched starch molecular structure[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 152(5): 441-449.
- [17] 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(9): 5312-5322.
- [18] MAHASUKHONTHACHAT K, SOPADE P A, GIDLEY M J. Kinetics of starch digestion in sorghum as affected by particle size[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 96(1): 18-28.
- [19] WARREN F J, ZHANG B, WALTZER G, et al. The interplay of α -amylase and amyloglucosidase activities on the digestion of starch in *in vitro* enzymic systems[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117: 192-200.
- [20] EDWARDS C H, WARREN F J, MILLIGAN P J, et al. A novel method for classifying starch digestion by modelling the amylolysis of plant foods using first-order enzyme kinetic principles[J]. *Food Function*, 2014, 5(11): 2751-2758.
- [21] ZOU W, SISSONS M, WARREN F J, et al. Compact structure and proteins of pasta retard *in vitro* digestive evolution of branched starch molecular structure[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 152(5): 441-449.
- [22] AL-RABADI G J, TORLEY P J, WILLIAMS B A, et al. Particle size heterogeneity in milled barley and sorghum grains: Effects on physico-chemical properties and starch digestibility[J]. *Journal of Cereal Science*, 2012, 56(2): 396-403.
- [23] 谢芳. 面筋蛋白、物料粒径和茶多酚对淀粉消化性的影响机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [24] XIE F. The effect of gluten, different particle size and tea polyphenols on the digestion of starch[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [25] JENKINS D J, THORNE M J, WOLEVER T M, et al. The effect of starch-protein interaction in wheat on the glycemic response and rate of *in vitro* digestion[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1987, 45(5): 946-951.
- [26] LÓPEZ-BARÓN N, GU Y, VASANTHAN T, et al. Plant proteins mitigate *in vitro* wheat starch digestibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 69: 19-27. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。