

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.01.014

柳先知, 战林洁, 李宏雁, 等. 脱支小麦淀粉对面条品质性能影响的研究[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(1): 138-146.

LIU X Z, ZHAN L J, LI H Y, et al. Research on the quality properties of wheat noodles by adding debranched wheat starch[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(1): 138-146.

脱支小麦淀粉对面条品质性能影响的研究

柳先知¹, 战林洁², 李宏雁³, 李彩富³, 李曼²,
徐同成⁴, 姬娜²✉, 徐龙朝¹

(1. 青岛海科佳智能科技股份有限公司, 山东 青岛 266112;

2. 青岛农业大学 食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109;

3. 菏泽华瑞面业有限公司, 山东 菏泽 274100;

4. 山东省农业科学院农产品加工与营养研究所, 山东 济南 250000)

摘要: 以高筋小麦粉、脱支小麦淀粉(脱支上清液和脱支沉淀)和谷朊粉为原料, 研究脱支小麦淀粉对压延小麦面条消化、蒸煮、热等特性的影响。结果表明, 添加脱支小麦淀粉能够降低小麦面条的硬度和咀嚼性。面条的相对结晶度从9.37%(对照)增加到18.25%(50%脱支上清)。与对照组相比, 添加50%脱支沉淀时, 面条热稳定性提高, 糊化起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、终值温度(T_c)和糊化焓值(ΔH)增加, 面条的抗性淀粉(RS)含量由11.37%增加至22.19%, 预估血糖生成指数(eGI)由87.71降低至78.57, 表现出较好的体外消化结果。因此, 添加脱支小麦淀粉可以降低面条的体外消化速率, 为慢性血糖性疾病患者主食产品的研制提供了思路和方法。

关键词: 脱支小麦淀粉; 面条; 蒸煮特性; 体外消化特性

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)01-0138-09

网络首发时间: 2024-12-25 11:41:31

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20241224.1618.008>

Research on the Quality Properties of Wheat Noodles by Adding Debranched Wheat Starch

LIU Xian-zhi¹, ZHAN Lin-jie², LI Hong-yan³, LI Cai-fu³, LI Man², XU Tong-cheng⁴, JI Na²✉, XU Long-zhao¹

(1. Qingdao Haikējia Intelligent Technology Co., LTD., Qingdao, Shandong China 266112;

2. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109,

China; 3. Heze Huarui Noodle Industry Co., LTD., Heze, Shandong 274100; 4. Institute of Agricultural

Processing and Nutrition, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong 250000, China)

Abstract: High-gluten wheat flour, debranched wheat starch (debranched supernatant and debranched

收稿日期: 2024-05-21; 修回日期: 2024-06-10; 录用日期: 2024-06-11

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目“小麦绿色生态关键技术创新与示范”(2021TZXD010)

Supported by: Key R&D Program of Shandong Province (Major Scientific and Technological Innovation Project) “Innovation and Demonstration of Key Green Ecological Technologies for Wheat” (No.2021TZXD010)

第一作者: 柳先知, 男, 1979年出生, 本科, 研究方向为机械制造自动化, E-mail: xingzheng@haikējia.com

通信作者: 姬娜, 女, 1987年出生, 博士, 教授, 研究方向为粮油精深加工, E-mail: jn87163@163.com

precipitate), and gluten were used as raw materials, the influence of debranched wheat starch on the digestion characteristics, cooking properties, and thermal properties of rolled wheat noodles was studied. The results showed that adding debranched wheat starch could reduce the hardness and chewiness of wheat noodles. Relative crystallinity of noodles increased from 9.37% (control) to 18.25% (50% debranched supernatant). Compared with the control group, when 50% debranched precipitate was added, the noodles' gelatinization onset temperature (T_0), peak temperature (T_p), final temperature (T_c), and gelatinization enthalpy (ΔH) all increased, indicating improved thermal stability, and the resistant starch (RS) content increased from 11.37% to 22.19%, while the estimated glycemic index (eGI) decreased from 87.71 to 78.57, demonstrating good *in vitro* digestion results. The above study proved that the addition of debranched wheat starch could reduce the digestion rate of rolled noodles *in vitro*, and provided ideas and methods for the development of staple food products for patients with chronic blood sugar diseases.

Key words: debranched wheat starch; noodles; cooking property; digestive characteristics *in vitro*

面条在我国主食发展史上有长达 4 000 多年的悠久历史,是我国最基本的传统主食之一,按照制作原料可分为小麦、玉米和杂粮三大类面条,其中小麦面条最为常见^[1]。但小麦面条消化速率较快,食用后短时间内会引起血糖的急剧升高。对于慢性血糖性疾病的患者来说,比如 2 型糖尿病患者,这会增加血糖负荷,导致慢性血糖代谢紊乱,危害身体健康和生命安全^[2]。定向开发较低消化速率的小麦面条对于调控血糖代谢疾病患者的饮食结构有重要意义^[3]。

现阶段,额外添加法是一种降低面条消化速率的方法,主要是通过向面条中额外添加添加剂来降低面条的消化速率。例如向面条中添加单宁酸等天然膳食多酚,通过单宁酸对消化酶的抑制作用来降低面条的消化速率;菊粉和大豆纤维是优质膳食纤维,热量低且具有降低血糖血脂等功能,将其作为原料引入面条中有助于面条消化速率的降低^[4-5]。通过对原料进行物理改性和化学改性也可以降低面条的消化速率,通常对苦荞全粉、红薯渣、荞麦粉等原料进行湿热、退火和微波处理等,这些方法破坏了淀粉颗粒的结构,淀粉分子发生重排和重新取向,形成了紧密堆积的淀粉,淀粉的热稳定性和抗酶解能力提高,用其制作面条能够降低其在消化道内的消化速率^[6-7]。当前降低面条消化速率的方法存在添加剂价格高、成分不安全、食用口感差、效率产出率低等缺点,因此要寻求一种绿色环保、产出率和利用率高的方

法来制备并调控面条的抗性淀粉(Resistant starch, RS)含量。

脱支淀粉(Debranched starch, DBS)是通过脱支酶(异淀粉酶或普鲁兰酶)的水解作用,水解淀粉的 α -1,6糖苷键,形成低分子量的线性短链分子所得。酶解是一种常见的淀粉生物改性的方法,酶解重结晶制备的脱支淀粉具有新的性质和功能,扩大了其在食品及医药领域的应用范围^[8]。酶解和重结晶作用使脱支淀粉具有高结晶度,有利于降低消化酶对淀粉的水解,增加淀粉的RS含量,降低淀粉的水解速率。Boonna等对木薯淀粉进行普鲁兰酶脱支并结合温度循环进行处理,与原木薯淀粉相比,脱支木薯淀粉有较低的消化速率^[9]。Cervini等将脱支糯米淀粉添加到意大利面中,显著降低了面条的消化速率^[10]。

因此,本文旨在探究脱支小麦淀粉的添加对小麦面条综合品质特性的影响,通过测定体外消化、蒸煮、热、质构等特性对小麦面条的综合品质特性进行表征。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

高筋小麦粉:金沙河集团有限公司;小麦淀粉:诸城市兴茂玉米开发有限公司;谷朊粉:新乡市新都粉业有限公司;硫酸钠、冰醋酸,均为分析纯:国药集团化学试剂有限公司;普鲁兰酶、淀粉葡萄糖苷酶、胰酶,均为分析纯:美国Sigma

公司; D-葡萄糖检测试剂盒: 爱尔兰 Megazyme 公司。

Kitchen Aid 试验型和面机: 美国 Kitchen Aid 公司; JMTD-168/140 试验型面条机: 北京孚德有限公司; UV-6000 紫外分光光度计: 北京普析通用仪器有限责任公司; DSC-204F1 差示扫描量热仪: 瑞士 METERLE 仪器有限公司; AxSD8 X-射线衍射仪: 德国布鲁克 AXS 有限公司; S-3400N 扫描电镜显微镜: 日本日立仪器有限公司; TA.XT Plus 质构仪: 英国 Stable Micro Systems Ltd 公司。

1.2 脱支小麦淀粉的制备

脱支小麦淀粉根据 Wang 等概述的方法进行制备并做了少量修改^[11]。称取小麦淀粉 600 g, 用 6 L 蒸馏水混合成均匀的糊状后加入到双层玻璃发酵罐中, 升温到 100 °C, 计时 30 min, 待淀粉完全糊化后通过循环水系统冷却至 58 °C, 加入淀粉质量 10% (60 mL) 的普鲁兰酶进行脱支, 12 h 后 100 °C 进行灭酶处理, 得到的溶液在 4 000 rpm 下离心 3 min 得到脱支上清液和脱支沉淀, 并将上清液和沉淀 55 °C 烘干并磨粉, 过 100 目筛备用。

1.3 含有脱支小麦淀粉压延面条的制备

根据不同原料配比制备面条 (表 1)。称取 100 g 混合面粉放入和面机中, 将所用的干粉混合搅拌 3 min, 保证原料之间混合均匀, 再以 85 rpm 搅拌 2 min, 135 rpm 搅拌 5 min 获得面条面团 (面絮), 将面絮醒发 20 min 用于面条的制作。用试验型面条机依次以 1.5 (对折复合 3 次)、1.3、1.1、0.9 mm 的辊缝压延, 最后, 将面片切成 0.9 mm 厚的面条鲜样 (20 cm), 将鲜样自然晾干, 置于干燥器保存。

表 1 压延面条样品配方表

Table 1 Sample recipe table of five kinds of noodles

样品	高筋小麦粉/g	脱支上清液/g	脱支沉淀/g	谷朊粉/g	加水量/mL
对照	95	0	0	5	34
25%脱支上清	70	25	0	5	35
25%脱支沉淀	70	0	25	5	36
50%脱支上清	45	50	0	5	38
50%脱支沉淀	45	0	50	5	40

1.4 面条蒸煮特性的测定

最佳蒸煮时间的测定参照 Zou 等的方法并做了少量修改^[12], 将制备的 5 种面条用恒温电磁炉进行蒸煮, 每隔 15 s 取出一根面条, 切成 1 cm 的短条, 在透明玻璃板上进行挤压, 通过观察面条中心白芯消失的时间来确定每个样品的最佳蒸煮时间。吸水率测定: 将 25 根面条放入 300 mL 煮沸的蒸馏水中至最佳蒸煮时间, 用蒸馏水冲洗 1 min 后用滤纸吸取表面水分。吸水率计算如下:

$$\text{吸水率} \% = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad \text{式 (1)}$$

式中 m_1 和 m_2 分别表示面条蒸煮前后的重量, g。蒸煮损失率参考蒲华寅^[13]的方法做了少量修改, 取 25 根面条并记录重量, 在最佳蒸煮时间的条件下煮熟并取出, 待煮面条的水冷却至室温后定容到 500 mL 的容量瓶中。取 100 mL 溶液于已恒重的烧杯中, 105 °C 的烘箱中烘干至恒重。面条的蒸煮损失率计算公式为:

$$\text{蒸煮损失率} \% = 5 \times \frac{M_1 - M_0}{M_2 \times (1 - W)} \times 100\% \quad \text{式 (2)}$$

式中 M_0 为空烧杯烘至恒重后的质量, g; M_1 为烘干后烧杯和其内干物质的质量, g; M_2 为鲜湿面条的质量, g; W 为鲜湿面条的含水量, %。断条率的测定: 取 25 根面条, 将面条煮至最佳蒸煮时间后, 捞出, 并冷水浸泡, 观察面条的断条情况, 数出断条数 (记为 n), 断条率计算公式如下:

$$\text{断条率} \% = \frac{n}{25} \times 100\% \quad \text{式 (3)}$$

1.5 面条质构特性的测定

质构特性的测定参考 Zhang 的方法^[14], 将 30 根新鲜面条放入 500 mL 煮沸的蒸馏水中至最佳蒸煮时间, 常温蒸馏水冲洗 1 min。用滤纸吸收表面多余的水分后用保鲜膜覆盖, 用直尺量出等长的 3 根面条平行放置在测试台上并保证间隔距离相同。使用 P/36R 探头以 1.0 mm/s 的速度下降, 0.8 mm/s 的速度测量, 1.0 mm/s 的速度返回, 弹性压缩比设置为 75%, 间隔时间为 2 s, 每个样品测试 6 次取平均值。

1.6 脱支淀粉和面条热特性的测定

采用差示扫描量热仪 (Differential scanning

calorimeter, DSC) 测定脱支淀粉和煮熟的样品面条的热性能。在密封铝锅中, 用多余的水 (1:2) 调节脱支淀粉和样品面条的粉末 (3.0~6.0 mg)。将制备好的小铝锅平衡 12 h 后, 在氮气条件下以 10 °C/min 的加热速率从 25 °C 升温至 135 °C, 加热结束后冷却至 25 °C。记录起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、结束温度 (T_c) 和吸热焓变 (ΔH)。样品重量以淀粉 (干基) 计算。

1.7 脱支淀粉和面条 X 衍射的测定

X 衍射的测定参照 Liu 的方法^[15], 采用配备发散狭缝的 X 射线衍射仪测定了脱支淀粉和面条的结晶度, 在 40 kV 和 40 mA 条件下运行。所有样品在 4°~40° (2θ) 范围内以 2°/min 的速度进行扫描, 步长 0.02°。用 MDI Jade 6.5 软件分析衍射图, 计算相对结晶度。用结晶区和非晶态区的百分比比值计算相对结晶度, 公式如下:

$$RC(\%) = \frac{100A_c}{A_c + A_a} \quad \text{式 (4)}$$

其中 RC 表示相对结晶度, A_c 表示结晶峰的面积, A_a 表示非晶态峰的面积

1.8 扫描电子显微镜分析

用扫描电镜 (Scanning electron microscope, SEM) 观察煮熟的面条的表面和横切面, 将煮熟的样品在液氮中快速冻干后, 经过 3 次喷金处理, 使金颗粒均匀地覆盖在面条表面上。根据实际情况调整电流与电压大小。

1.9 面条淀粉含量的测定

参照 QIN 等的方法并稍作修改^[16]: 称重并研磨约 2 g 的样品面条, 通过 60 目筛。所得粉末中的脂肪用 30 mL 乙醚洗涤 3 次, 残渣用 150 mL 85%乙醇洗涤 3 次, 去除可溶性糖。用 100 mL 水溶解残渣, 加入 6 mol/L 盐酸至 30 mL 回流 2 h, 用流水冷却。用 40% NaOH 溶液和 6 mol/L 盐酸加入甲基红指示剂中和样品水解液。加入 20 mL 20% 中性醋酸铅溶液, 沉淀蛋白质、果胶和其他杂质。加入 20 mL 10% 的 Na_2SO_4 溶液去除多余的铅。用葡萄糖氧化酶法测定溶液中总葡萄糖含量, 用下式计算总淀粉含量:

$$TS(\%) = \frac{\Delta A \times F \times FV \times 0.9}{W} \quad \text{式 (5)}$$

$$F = \frac{100(\mu\text{g of } D\text{-glucose})}{\text{absorbance for } 100 \mu\text{g of glucose}} \quad \text{式 (6)}$$

其中 ΔA 是对试剂空白的吸光度 (反应), FV 是测试溶液的最终体积, mL; W 是用于分析的样品的重量, mg。

1.10 面条模拟体外消化的测定

脱支淀粉和样品面条体外消化率的测定是在 Englyst 等^[17]方法的基础上进行的。将样品面条 (含 200 mg 淀粉, 干重为基础) 在最佳蒸煮时间下煮熟冻干备用。将 3 g 胰蛋白酶分散于 20 mL 去离子水中涡旋 10 min, 将 15 mL 上清转移至离心管, 加入 1.1 mL 淀粉葡萄糖苷酶涡旋备用。将 200 mg 面条样品和 18 mL 醋酸缓冲液 (pH 5.20) 加入离心管中, 每个离心管中加入 6 个玻璃微球和 2 mL 酶混合物。试管在 37 °C 振荡水浴中消化水解。在 0、20、60、90、120 和 180 min, 从每个离心管中取出水解产物样品 (0.1 mL), 与 0.9 mL 90%乙醇溶液混合。离心后, 用葡萄糖氧化酶 (K-GLUC) 试剂测定上清液中水解葡萄糖的量。

$$\%RDS = (G_{20} - G_0) \times 0.9 \times 100 / S \quad \text{式 (7)}$$

$$\%SDS = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9 \times 100 / S \quad \text{式 (8)}$$

$$\%RS = [TS - (RDS + SDS)] \times 100 / S \quad \text{式 (9)}$$

式中, RDS 指快速消化淀粉、SDS 指慢性淀粉、RS 指抗性淀粉; G_0 、 G_{20} 、 G_{120} 分别为样品面条经淀粉葡萄糖苷酶和胰酶水解 0、20、120 min 后水解产物中葡萄糖含量, mg; S 为面条中总淀粉含量, mg。根据公式计算 180 min 下的水解曲线下的面积, 水解指数 (Hydrolysis index, HI) 由样品与参考样品 (白面包) 的面积比值得到。eGI 的计算采用 Granfeldt 等的公式^[18]:

$$eGI = 0.862 \times HI + 8.198 \quad \text{式 (10)}$$

1.11 数据处理

各组实验至少重复 3 次, 采用 SPSS18.0 进行统计分析, Origin 9.0 软件进行作图处理。

2 结果与分析

2.1 脱支小麦淀粉的性能表征

2.1.1 小麦淀粉和脱支小麦淀粉的热特性

由表 2 可知, 小麦淀粉的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 为

63.38 °C、76.25 °C、85.11 °C 和 3.26 J/g，与小麦淀粉相比，脱支上清液的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 为 94.76 °C、103.25 °C、111.09 °C 和 7.89 J/g；脱支沉淀的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 为 107.21 °C、115.16 °C、121.76 °C 和 19.87 J/g，脱支后能够显著改善淀粉的热特性，表明小麦淀粉在脱支重结晶过程中能够形成致密的晶体结构。Cai 等测定了脱支蜡质玉米淀粉的 DSC，发现糊化温度范围在 92 °C~141 °C，这主要是由于脱支淀粉能够在 25 °C 的回生形成有序稳定的晶体结构，所以脱支后有较高的糊化温度范围^[19]。脱支沉淀的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 比脱支上清液高，这主要是由于脱支沉淀包括未被普鲁兰酶酶解的直链淀粉、脱支后的长直链淀粉和部分支链淀粉，而链长较长的直链淀粉较难糊化，所以导致重结晶获得的脱支沉淀淀粉具有更高的糊化温度和糊化焓值^[20]。

表 2 小麦淀粉和脱支小麦淀粉的热特性

Table 2 Thermal characteristics of wheat starch and debranched wheat starch

样品	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
小麦淀粉	63.38±0.67 ^c	76.25±0.19 ^c	85.11±0.62 ^c	3.26±0.25 ^c
脱支上清液	94.76±0.52 ^b	103.25±0.33 ^b	111.09±0.37 ^b	7.89±0.27 ^b
脱支沉淀	107.21±0.22 ^a	115.16±0.69 ^a	121.76±1.02 ^a	19.87±0.45 ^a

注：表中标有不同小写字母的数据之间有显著性差异 ($P<0.05$)，下同。

Note: Data marked with different lowercase letters in the table have significant differences ($P<0.05$), the same applies below.

2.1.2 小麦淀粉和脱支小麦淀粉的 X 衍射

由图 1 所示，小麦淀粉在 2θ 值为 15°，17°，18°和 23°处有特征峰，为典型的 A 型结构，脱支淀粉在 5.5°，14.4°，17.2°，22.2°，24.0°有明显的特征峰，为典型的 B 型结构。小麦淀粉的相对结晶度为 13.16%，脱支上清液的相对结晶度为 72.81%，高于脱支沉淀的相对结晶度（53.67%）。脱支淀粉相对结晶度增加的原因是普鲁兰酶酶解小麦淀粉并在烘箱中重结晶。Wang 等进行了类似的研究，发现在淀粉脱支干燥重结晶过程中脱支淀粉更有规律地重新结合，结晶度比原淀粉升高^[11]。而脱支上清比脱支沉淀相对结晶度高的原因主要是由于脱支上清主要包含大量短直链淀粉，脱支沉淀主要由长直链淀粉和少量支链淀粉组成，与长链直链淀粉和支链淀粉相比，短链直链淀粉具

有更高的流动性，有利于脱支上清的重结晶，更容易形成紧密有序的晶体结构^[21]。

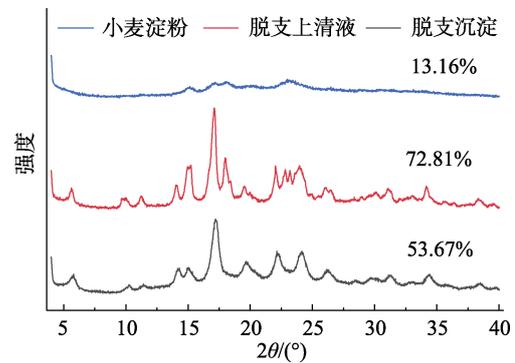


图 1 小麦淀粉和脱支小麦淀粉的 X 衍射图

Fig.1 X-ray diffraction of wheat starch and debranched wheat starch

2.1.3 小麦淀粉和脱支小麦淀粉的体外消化特性

由表 3 可知，小麦淀粉的 RS 含量为 7.41%，相较于小麦淀粉，脱支上清和脱支沉淀具有更高的抗消化性，其 RS 含量分别为 28.34%和 36.26%，且脱支沉淀的 RS 含量显著高于脱支上清液。脱支淀粉 RS 含量的增加主要是由于直链淀粉和线性短链的重新排列形成的晶体结构区域更强，增强了结晶区的氢键相互作用，从而提高了抵抗消化酶水解能力^[22]。Ozturk 等研究发现了类似的结果，对高直链玉米淀粉进行普鲁兰酶脱支，脱支重结晶后的淀粉最高 RS 含量达到 40%左右，这主要是由于短链重排增强了结晶区的相互作用和抗酶解性^[23]。脱支沉淀具有较高的 RS 含量的原因是脱支沉淀中的长直链淀粉与脱支上清中的短链直链淀粉相比更难在人体消化道中消化，具有更强的抗消化性^[11]，这也是脱支沉淀相对结晶度较低而抗性淀粉含量高的原因。

表 3 小麦淀粉和脱支小麦淀粉消化特性

Table 3 Digestion characteristics of wheat starch and debranched wheat starch

样品	RDS	SDS	RS
小麦淀粉	89.28±0.78 ^a	3.31±0.39 ^a	7.41±0.46 ^c
脱支上清液	68.77±0.81 ^b	2.89±0.65 ^a	28.34±0.58 ^b
脱支沉淀	60.86±0.41 ^c	2.88±0.29 ^a	36.26±0.52 ^a

2.2 不同添加量脱支小麦淀粉面条的蒸煮特性

面条的最佳蒸煮时间、吸水率和蒸煮损失是评定面条蒸煮品质的重要指标。如表 4 所示，纯

高筋小麦面条的最佳蒸煮时间为 4.50 min、蒸煮损失为 8.34%。与纯高筋小麦面条相比,随着脱支淀粉添加量的增加,面条的最佳蒸煮时间逐渐缩短,蒸煮损失逐渐增加。当脱支小麦沉淀添加量为 50%时,面条的最佳蒸煮时间为 4.20 min,蒸煮损失为 15.11%。添加脱支小麦淀粉“稀释”了面粉中面筋蛋白的含量,导致形成较弱的面筋蛋白网络结构,从而加快了水分子的流动,缩短了面条的蒸煮时间。

表 4 不同添加量的脱支小麦上清液和脱支小麦沉淀面条的蒸煮特性

Table 4 Cooking characteristics of debranched wheat supernatant and debranched wheat precipitate noodles with different additive levels

样品	蒸煮时间/min	断条率/%	吸水率/%	蒸煮损失/%
对照组	4.50±0.10 ^a	0	90.13±5.01 ^a	8.34±1.31 ^d
25%上清	4.40±0.10 ^{ab}	0	94.33±4.23 ^a	11.15±1.12 ^{cd}
25%沉淀	4.30±0.20 ^{ab}	0	95.28±4.16 ^a	12.27±2.21 ^{bc}
50%上清	4.25±0.10 ^{ab}	0	96.77±6.22 ^a	15.07±1.01 ^{ab}
50%沉淀	4.20±0.10 ^b	0	96.21±5.11 ^a	15.11±1.10 ^a

表 5 不同添加量的脱支小麦上清液和脱支小麦沉淀面条的质构特性

Table 5 Textural characterization of debranched wheat supernatant and debranched wheat precipitate noodles with different additive amounts

样品	硬度/g	粘性/g·s	弹性	粘聚性	咀嚼性/g	回复性
对照组	4 595.34±5.33 ^a	27.84±1.66 ^a	0.79±0.02 ^a	0.87±0.01 ^a	3 220.76±3.99 ^a	0.79±0.02 ^a
25%上清	4 390.53±0.97 ^b	34.58±0.13 ^b	0.74±0.02 ^b	0.74±0.00 ^b	2 933.13±2.70 ^b	0.68±0.03 ^b
25%沉淀	4 135.80±4.12 ^c	33.38±0.98 ^b	0.73±0.02 ^b	0.69±0.01 ^c	2 779.23±3.17 ^c	0.66±0.01 ^b
50%上清	3 877.92±5.05 ^d	32.74±0.78 ^b	0.70±0.01 ^c	0.67±0.02 ^{cd}	2 170.61±6.22 ^d	0.63±0.01 ^c
50%沉淀	3 680.41±4.69 ^e	34.41±1.12 ^b	0.67±0.00 ^c	0.66±0.01 ^d	2 164.55±5.49 ^d	0.62±0.01 ^c

2.4 不同添加量脱支小麦淀粉面条的热特性

由表 6 可知,纯高筋小麦面条的 T_0 为 82.32 °C、 T_p 为 94.67 °C、 T_c 为 100.30 °C、 ΔH 为 1.04 J/g。当添加 50%脱支上清时,面条的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 为 99.88 °C、110.17 °C、118.63 °C、2.33 J/g;而当添加 50%脱支沉淀时,面条的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 为 110.51 °C、116.17 °C、121.11 °C、2.87 J/g。这说明脱支淀粉的添加能够提高面条的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH ,且添加脱支沉淀面条的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 比添加脱支上清液的高。加入脱支淀粉后面条热稳定性更强的原因是脱支淀粉经过脱支重结晶后表现出良好的热稳定性,因此加入面条后面条的热稳定性更强^[24]。添加脱支

同时,相对较弱的面筋网络导致面条的结构不够紧密,在蒸煮过程中游离出的淀粉和可溶性蛋白等物质增多,从而使其蒸煮损失增加。

2.3 不同添加量脱支小麦淀粉面条的质构特性

一般来说,质构特性包括硬度、粘弹性、咀嚼性等,是评价面条品质的重要指标。如表 5 所示,纯高筋小麦面条的硬度和咀嚼性分别为 4 595.34 g 和 3 220.76 g。与纯高筋小麦面条相比,随着脱支淀粉添加量的增加,硬度和咀嚼性逐渐减小。当添加 50%脱支沉淀时,硬度值降低至 3 680.41 g,咀嚼性降低至 2 164.55 g。面条的硬度代表面筋网络的强度,面条的结构越致密,面筋网络越强,则面条的硬度越大。由于脱支小麦淀粉中没有面筋蛋白也不产生粘性,加入后使得面条中面筋网络和淀粉凝胶网络致密性降低,所以导致硬度降低。咀嚼性通常与硬度呈正相关。面筋强度大,网络的硬度高,咀嚼性也高。反之,硬度较低的咀嚼性也较低。

沉淀面条的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 比添加脱支上清面条高的原因是脱支沉淀中链直链淀粉与短链直链淀粉相比难以糊化,具有更高的糊化温度和糊化焓值。

表 6 不同添加量的脱支小麦上清液和脱支小麦沉淀面条的热特性

Table 6 Thermal characteristics of debranched wheat supernatant and debranched wheat precipitate noodles with different additive levels

样品	T_0 /°C	T_p /°C	T_c /°C	ΔH /(J·g ⁻¹)
对照组	82.32±0.43 ^c	94.67±0.03 ^c	100.30±0.28 ^c	1.04±0.03 ^d
25%上清	91.55±0.05 ^d	97.5±0.22 ^d	103.98±0.17 ^d	1.8±0.12 ^c
25%沉淀	108.71±0.21 ^b	107.67±0.27 ^c	113.03±0.03 ^c	2.11±0.07 ^b
50%上清	99.88±0.75 ^c	110.17±0.13 ^b	118.63±0.04 ^b	2.33±0.10 ^b
50%沉淀	110.51±0.49 ^a	116.17±0.27 ^a	121.11±0.06 ^a	2.87±0.12 ^a

2.5 不同添加量脱支小麦淀粉面条的 X 衍射

如图 2 所示, 纯高筋小麦面条的相对结晶度为 9.37%, 添加 50%脱支沉淀的面条和添加 50%脱支上清的面条相对结晶度分别为 17.76%和 18.25%。对照组纯高筋小麦面条在 2θ 约 15° 、 17° 、 18° 和 23° 有较强的峰, 呈现典型的 A 型谷物淀粉晶体形态 XRD 图谱^[15], 17° 下的峰值强度随着脱支淀粉添加量的增加逐渐变强。这表明脱支淀粉的加入能够提高面条的相对结晶度, 且添加脱支

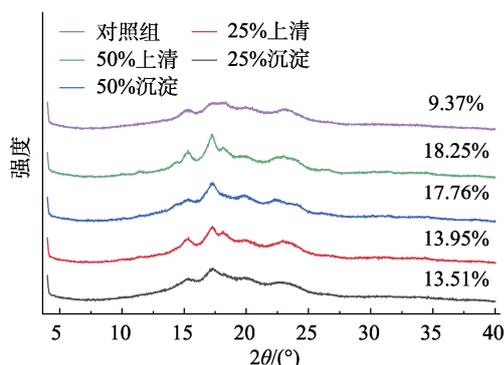


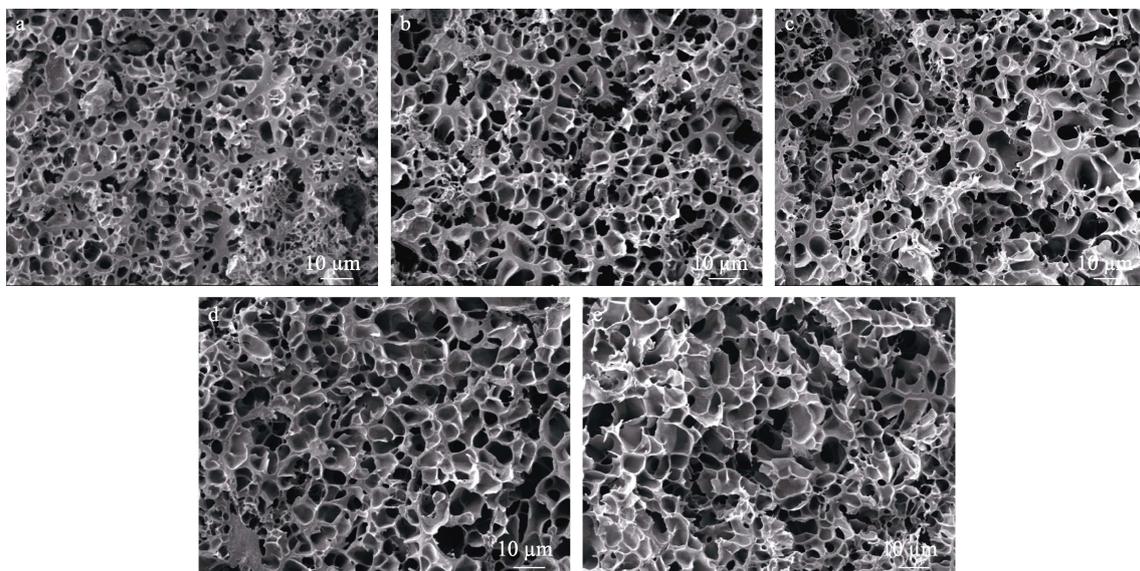
图 2 不同添加量的脱支小麦上清液和脱支小麦沉淀面条的 X 衍射图

Fig.2 X-ray diffraction pattern of debranched wheat supernatant and debranched wheat precipitate noodles with different additions

上清液的面条具有更高的相对结晶度。面条相对结晶度的增加主要是小麦淀粉经过脱支重结晶形成了有序的晶体结构, 加入面条中后导致结晶度的增加, 且脱支上清液中大量的短直链淀粉更容易诱导重结晶, 因此添加脱支上清液的面条具有更高的相对结晶度。 17° 下的峰值强度增强的原因主要是由于脱支小麦淀粉呈现出典型的 B 型晶体结构 (图 1), 随着脱支淀粉添加量的增加, 使面条呈现出 B+A 型晶体结构, 且 B 型晶体结构强度逐渐增强, 导致 17° 的峰值强度变强。

2.6 不同添加量脱支小麦淀粉面条的扫描电镜

如图 3 所示, 对照组纯高筋小麦面条横截面的孔洞小且密, 孔洞与孔洞之间的壁较厚, 添加 25%脱支淀粉的面条与对照组比, 内部网络疏松, 随着脱支淀粉添加量从 25%增加至 50%, 内部孔洞变大, 孔洞与孔洞之间的壁变薄, 凝胶网络疏松, 这是由于纯高筋小麦面条可凝胶化淀粉和蛋白含量较高, 形成的网络结构更为致密。而脱支小麦淀粉在面条蒸煮过程中不产生粘性, 不能形成网络, 加入脱支淀粉后稀释了面粉中的淀粉和面筋蛋白的密度。



注: (a) 纯高筋小麦粉面条横截面; (b) 添加 25%脱支上清面条横截面; (c) 添加 25%脱支沉淀面条横截面; (d) 添加 50%脱支上清面条横截面; (e) 添加 50%脱支沉淀面条横截面。

Note: (a) cross-section of pure high-gluten wheat flour noodles; (b) cross-section of noodles with 25% debranched supernatant added; (c) cross-section of noodles with 25% debranched precipitate noodles added; (d) cross-section of noodles with 50% debranched supernatant added; (e) cross-section of noodles with 50% debranched precipitate noodles added.

图 3 不同添加量的脱支小麦上清液和脱支小麦沉淀面条的横截面 SEM 图像

Fig.3 Cross-sectional SEM images of debranched wheat supernatant and debranched wheat precipitate noodles with different additions

2.7 不同添加量脱支小麦淀粉面条的模拟体外消化

由图 4 可知, 对照组纯高筋小麦面条在 180 min 内有较高的水解速率, 随着脱支淀粉的加入, 面条在 180 min 内的水解率均低于对照组, 水解速率表现为对照组面条>添加 25%脱支上清面条>添加 25%脱支沉淀面条>添加 50%脱支上清面条>添加 50%脱支沉淀面条。由表 7 可知, 对照组面条的 RS 含量为 11.37%, eGI 值为 87.71。随着脱支淀粉添加量从 25%增加到 50%, RS 增加、eGI 值降低, 当添加 50%脱支上清和添加 50%脱支沉淀时, 面条的 RS 值和 eGI 值分别为 19.71% 和 79.94, 22.19%和 78.57。这表明在模拟体外消化过程中, 脱支淀粉的加入可以降低面条的水解速率, 增加 RS 含量并降低面条的 eGI 值, 且对比脱支上清来说, 添加脱支沉淀的面条具有更好的抗消化性。此外, 脱支沉淀具有更高的 RS 含量, 因此, 添加了脱支沉淀的面条比添加了脱支上清液的面条具有更高的 RS 值和更低的 eGI 值。

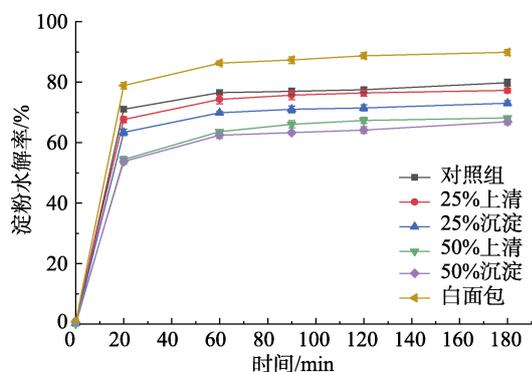


图 4 不同添加量的脱支小麦上清液和脱支小麦沉淀面条的消化水解曲线

Fig.4 Digestion and hydrolysis curves of debranched wheat supernatant and debranched wheat precipitate noodles with different additions

表 7 不同添加量的脱支小麦上清液和脱支小麦沉淀面条的 RDS、SDS、RS 及 eGI 值

Table 7 RDS, SDS, RS and eGI values of debranched wheat supernatant and debranched wheat precipitate noodles with different additive levels

样品	RDS/%	SDS/%	RS/%	eGI
对照组	86.62±1.01 ^a	2.01±0.83 ^c	11.37±1.13 ^c	87.71±0.51 ^a
25%上清	82.58±0.77 ^b	3.33±0.36 ^{cd}	14.09±0.79 ^d	86.44±0.26 ^b
25%沉淀	80.54±0.51 ^c	2.31±0.38 ^{bc}	17.15±0.33 ^c	83.53±0.33 ^c
50%上清	76.14±0.37 ^d	4.15±0.92 ^{ab}	19.71±0.57 ^b	79.94±0.13 ^d
50%沉淀	73.16±0.28 ^e	4.65±0.55 ^a	22.19±0.67 ^a	78.57±0.18 ^e

3 结论

本文研究了脱支小麦淀粉对小麦面条综合品质特性的影响。结果表明, 添加脱支小麦淀粉能够降低面条的蒸煮时间、硬度和咀嚼性, 提高面条的热稳定性 (T_0 、 T_p 、 T_c 均增加), 其相对结晶度也从 9.37% (对照) 增加到 18.25% (50%脱支上清液)。脱支上清液和脱支沉淀的 RS 含量分别为 28.34%和 36.26%, 添加 50%脱支小麦沉淀后, 面条的 RS 含量增加到 22.19%、eGI 值降低至 78.57, 具有较好的体外消化性能。该研究为抗消化面条的发展提供了思路和方法。

参考文献:

- [1] 马先红, 刘景圣, 张文露, 等. 中国杂粮面条主食化的研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(20): 181-184.
MA X H, LIU J S, ZHANG W L, et al. Study on staple food of multigrain noodles in China[J]. Food Research and Development, 2015, 36(20): 181-184.
- [2] SAGILI V S, CHAKRABARTI P, JAYANTY S, et al. The glycemic index and human health with an emphasis on potatoes[J]. Foods, 2022, 11(15): 2302.
- [3] 田宝明. 低血糖指数挂面的研制及其对糖尿病大鼠糖脂代谢影响的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
TIAN B M. Study on the development of low glycemic index noodle and its effect on glucose and lipid metabolism in diabetic rats[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [4] 何俊成, 曾丽荣, 刘雄, 等. 单宁酸对小麦淀粉消化特性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(05): 205-212.
HE J C, ZENG L R, LIU X, et al. Effect of tannic acid on digestion characteristics of wheat starch[J]. Food science and technology, 2021, 46(05): 205-212.
- [5] OH I K, BAE I Y, LEE H G. *In vitro* starch digestion and cake quality: Impact of the ratio of soluble and insoluble dietary fiber[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 63: 98-103.
- [6] LI Y, CHEN W, LI H, et al. Effects of heat-moisture treatment whole tartary buckwheat flour on processing characteristics, organoleptic quality, and flavor of noodles[J]. Foods, 2022, 11(23): 3822.
- [7] SUN Q, ZHANG W, HUANG Q, et al. Evaluation of physicochemical properties and *in vitro* starch digestion of noodles enriched with thermally assisted potassium carbonate treated sweet potato residue[J]. LWT, 2023, 182: 114837.
- [8] LIU G, HONG Y, GU Z, et al. Preparation and characterization of pullulanase debranched starches and their properties for drug controlled-release[J]. RSC Advances, 2015, 5(117): 9766-9775.

- [9] BOONNA S, TONGTA S. Structural transformation of crystallized debranched cassava starch during dual hydrothermal treatment in relation to enzyme digestibility[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 191: 1-7.
- [10] CERVINI M, GABRIELLI M, SPIGNO G, et al. Characterization of durum-wheat pasta containing resistant starch from debranched waxy rice starch[J]. Foods, 2023, 12(2): 327.
- [11] WANG D, ZHENG X, LIU W, et al. Preparation and characterization of debranched starches: Influence of botanical source and debranching time[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135141.
- [12] ZOU S, WANG L, WANG A, et al. Effect of moisture distribution changes induced by different cooking temperature on cooking quality and texture properties of noodles made from whole tartary buckwheat[J]. Foods, 2021, 10(11): 2543.
- [13] 蒲华寅, 尹志慧, 呼矿矿, 等. 预制面条制作过程中品质变化研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(03): 76-83.
- PU H Y, YIN Z H, HU K K, et al. Study on the quality change in the process of preparing noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(03): 76-83.
- [14] ZHANG M, ZHANG L, LI M, et al. Inhibitory effects of sorbitol on the collapse and deterioration of gluten network in fresh noodles during storage[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128638.
- [15] LIU F Y, GUO X N, XING J J, et al. Effect of thermal treatments on *in vitro* starch digestibility of sorghum dried noodles[J]. Food Funct, 2020, 11(4): 3420-3431.
- [16] QIN K, ZHANG R, QIN W, et al. Construction and *in vitro* digestibility of recrystallized starch encapsulated in calcium alginate beads[J]. Foods, 2023, 12(12): 2379.
- [17] ENGLYST H N, HUDSON G J. The classification and measurement of dietary carbohydrates[J]. Food Chemistry, 1996, 57(1): 15-21.
- [18] GRANFELDT, I BJÖRK, et al. An *in vitro* procedure based on chewing to predict metabolic response to starch in cereal and legume products[J]. Am J Clin Nut, 1994, 59: 777.
- [19] CAI L, SHI Y, RONG L, et al. Debranching and crystallization of waxy maize starch in relation to enzyme digestibility[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(2): 385-393.
- [20] LI C, GONG B. Insights into chain-length distributions of amylopectin and amylose molecules on the gelatinization property of rice starches[J]. Int. J. Biol. Macromol, 2020, 155: 721-729.
- [21] LI C, HU Y. Combination of parallel and sequential digestion kinetics reveals the nature of digestive characteristics of short-term retrograded rice starches[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106071.
- [22] MIAO M, JIANG B, ZHANG T. Effect of pullulanase debranching and recrystallization on structure and digestibility of waxy maize starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 76(2): 214-221.
- [23] OZTURK S, KOKSEL H, KAHRAMAN K, et al. Effect of debranching and heat treatments on formation and functional properties of resistant starch from high-amylose corn starches[J]. European Food Research & Technology, 2009, 229(1): 115-125.
- [24] ALHAMBRA C M, DE GUZMAN M K, DHITAL S, et al. Long glucan chains reduce *in vitro* starch digestibility of freshly cooked and retrograded milled rice[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 86: 108-116. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。