

不同膳食纤维对鹰嘴豆方便面加工特性、营养特性和食用品质的改善作用

刘煜¹, 刘慧瑶¹, 陈洁¹, 汪磊^{1*}, 李超², 许飞¹, 赵丹³, 杨硕⁴

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001) (2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)
(3. 河南华测检测技术有限公司, 河南郑州 450001) (4. 郑州波特控制技术有限公司, 河南郑州 450007)

摘要: 为开发兼具优良品质与健康功效的功能性方便面产品, 该研究以高蛋白非油炸鹰嘴豆方便面为载体, 系统比较外源膳食纤维的营养强化和品质改善作用。通过在高蛋白复合粉体系中添加 β -葡聚糖、魔芋粉和菊粉三种可溶性膳食纤维, 重点分析其对产品加工特性、抗氧化能力及淀粉体外消化的影响规律。结果显示: 三种水溶性膳食纤维的添加均显著提升面团硬度、黏弹性, 其中2 wt.%魔芋粉使初始面团的平衡弹性系数(E_0)和衰变弹性系数(E_1)分别提高81.20%和32.80%, 通过促进面筋网络致密化使蛋白基质值提高至43.74%; 制得方便面复水时间缩短至283 s, 质构特性显著改善, 其中硬度、咀嚼度分别提升1 490.48、1 036.48 g。抗氧化指标方面, 多酚含量最高达4.19 mg GAE·g⁻¹, ABTS⁺自由基清除率提升至56.51%。综上所述, 当魔芋粉添加量为2 wt.%时, 产品综合品质最优: 感官评分达78.62, 体外消化预测血糖生成指数(GI)降至49.67, 达到低GI食品标准。该研究为开发兼具优良品质、抗氧化性与低血糖响应的功能性方便面提供理论依据。

关键词: 非油炸方便面; 膳食纤维; 面筋网络; 质构特性; 消化特性

文章编号: 1673-9078(2026)6-315-327

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.6.0402

Effects of Different Dietary Fibers on the Processing Characteristics, Nutritional Properties, and Eating Quality of Chickpea Instant Noodles

LIU Yu¹, LIU Huiyao¹, CHEN Jie¹, WANG Lei^{1*}, LI Chao², XU Fei¹, ZHAO Dan³, YANG Shuo⁴

(1.College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)
(2.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(3.Henan Huace Testing Technology Co. Ltd., Zhengzhou 450001, China)
(4.Zhengzhou Boter Control Technology Co. Ltd., Zhengzhou 450007, China)

Abstract: To develop functional instant noodle products with superior quality and health benefits, this study systematically investigated the nutritional enhancement and quality improvement effects of exogenous dietary fibers, using high-protein, non-fried chickpea instant noodles as the carrier. Three soluble dietary fibers- β -glucan, konjac flour, and inulin-were incorporated into

引文格式:

刘煜,刘慧瑶,陈洁,等.不同膳食纤维对鹰嘴豆方便面加工特性、营养特性和食用品质的改善作用[J].现代食品科技,2026,42(6):315-327.

LIU Yu, LIU Huiyao, CHEN Jie, et al. Effects of different dietary fibers on the processing characteristics, nutritional properties, and eating quality of chickpea instant noodles [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(6): 315-327.

收稿日期: 2025-03-21; 修回日期: 2025-05-28; 接受日期: 2025-06-03

基金项目: 河南工业大学“双一流”本科生科技创新能力提升专项项目(HN-HautFood IAEG-017); 河南省重点研发专项(231111111800); 郑州市优秀青年科技人才项目

作者简介: 刘煜(2003-), 女, 本科生, 研究方向: 食品加工与品质分析, E-mail: 19545628700@163.com

通讯作者: 汪磊(1989-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 面制主食品加工, E-mail: wlei0904@163.com

the high-protein composite flour system and their impacts on processing characteristics, antioxidant capacity, and *in vitro* starch digestion were analyzed. The results showed that adding water-soluble dietary fibers significantly increased dough hardness and viscoelasticity. In particular, including 2 wt.% konjac flour increased the initial equilibrium elastic coefficient (E_0) and decay elastic coefficient (E_1) by 81.20% and 32.80%, respectively, and promoted the densification of the gluten network, raising the protein matrix value to 43.74%. The resulting instant noodles demonstrated a reduced rehydration time (283 s) and significantly improved texture properties, with hardness and chewiness enhanced by 1 490.48 g and 1 036.48 g, respectively. In terms of antioxidant performance, the maximum polyphenol content reached 4.19 mg GAE·g⁻¹ and ABTS radical scavenging rate increased to 56.51%. In conclusion, the comprehensive quality of the product was optimized by adding 2 wt.% konjac flour, achieving a sensory score of 78.62 and a predicted glycemic index (GI) of 49.67 based on *in vitro* digestion-meeting the criteria for low-GI foods. This study provides the theoretical support for developing functional instant noodles with excellent quality, antioxidant activity, and low glycemic response.

Key words: non-fried instant noodles; dietary fiber; gluten network; textural properties; digestive properties

随着现代人健康意识的不断提升,低能量、低升糖指数(Glycemic Index, GI)以及具有调节代谢功能的食品日益受到消费者和研究者的关注。功能性面制品作为兼具传统主食属性与健康价值的食品载体,正逐步成为营养干预和慢病预防的重要研究方向。通过在面制品中引入高营养、高功能性的成分,可有效提升其保健作用,拓宽产品应用前景。近年来,杂豆类食材因其丰富的蛋白质、膳食纤维及多种生物活性物质,广泛用于功能食品开发。其中,鹰嘴豆作为一种兼具高蛋白、高膳食纤维的杂豆,不仅营养丰富,还具备良好的降糖、降脂等健康作用。张金叶^[1]通过体外血糖指数评价与糖尿病小鼠模型研究发现,鹰嘴豆粉、鹰嘴豆淀粉和蛋白质均可显著降低估算血糖指数,有效改善糖尿病小鼠的体重、血糖水平以及肝肾功能指标,并可降低胆固醇、低密度脂蛋白与高密度脂蛋白含量。此外,鹰嘴豆组分还能调节糖尿病小鼠的肠道微生物结构,提高肠道菌群多样性,从而增强代谢调节能力^[2]。

在杂豆基础上添加功能性膳食纤维,是进一步提升面制品营养价值和调控作用的重要策略。 β -葡聚糖、魔芋粉、菊粉三者均属于难以被人体消化吸收的碳水化合物,是优质的可溶性膳食纤维,不仅具有降血糖、降血脂、调节肠道菌群、改善葡萄糖代谢等功能特性^[3];此外,多种膳食纤维已被用于提高小麦粉的营养价值和面团性能。在小麦面团体系中,适当提高可溶性膳食纤维含量可有效改善面筋蛋白的稳定性、持水性、质地和结构特征。研究表明,高浓度膳食纤维通过抑制面筋二硫键的交换反应,能够保护面筋网络的功能特性。然而,学界对于膳食纤维与蛋白质的相互作用机制仍存在不同观点:部分研究证实膳食纤维无法直接与蛋白质形成交联结构,但可通过分子链缠绕

显著改变面团微观结构并降低宏观流变性,同时强烈抑制二硫键的形成^[4]。此外,膳食纤维对淀粉组分的改良作用同样关键,其不仅能优化淀粉糊化特性,还可通过延缓淀粉分子重结晶(老化回生)过程,从而维持面制产品的食用品质^[5]。然而现有文献中针对膳食纤维在加工体系中的动态行为及其作用机制,特别是其如何通过分子间相互作用调控面筋蛋白交联进程的深入探讨仍较为匮乏。

该研究探究三种可溶性膳食纤维(β -葡聚糖、魔芋粉、菊粉)的种类及添加量对面团的应力松弛和微观结构的影响,以及对非油炸方便面蒸煮特性、质构特性和感官评分的品质改善;分析非油炸方便面中蛋白质二级结构、巯基和二硫键含量;最后通过多酚含量、抗氧化能力及淀粉体外消化实验进一步分析三种可溶性膳食纤维对非油炸方便面营养特性的影响,从而评价可溶性膳食纤维对非油炸方便面的品质改善效果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

β -葡聚糖,安琪酵母股份有限公司;魔芋粉,浙江上方生物科技有限公司;菊粉(果聚糖含量90%,聚合度 $DP \leq 10$),比利时Beneo-orafiti;高筋小麦粉(淀粉73.00%、蛋白质12.20%、水分13.95%、脂肪1.80%和灰分0.51%),河北五得利;鹰嘴豆(淀粉64.10%、蛋白质24.53%、水分7.72%、脂肪5.30%和膳食纤维11.60%),新疆农科院;3,5-二硝基水杨酸、福林酚、没食子酸、甘氨酸、 α -淀粉酶、淀粉葡萄糖苷酶和胃蛋白酶等,均来自上海麦克林生化科技有限公司;溴化钾,美国PIKE公司;其他试剂均为分析纯;

ABTS、DPPH、异硫氰酸荧光素，上海麦克林试剂有限公司；罗丹明 B，天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

FV3000 激光共聚焦显微镜，奥林巴斯；TU-1810 紫外分光光度计，北京普析通用仪器有限公司；PHSJ-6L 型 pH 计，上海仪电科学仪器股份有限公司；L-8900 型氨基酸分析仪，株式会社日立制作所；M646290 凯式定氮仪，上海新嘉电子有限公司；PHS-25 TA-XT Plus 型质构仪，英国 STABLEMICRO SYSTEM 公司；IARffinity-1S 傅里叶变换红外光谱仪，日本 Shimadzu 有限公司；Quanta FEG250 扫描电子显微镜，荷兰 FEL 公司；MicroMR-CL-I 变温型核磁共振分析仪，上海纽迈电子科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 非油炸方便面的制作

选定鹰嘴豆添加量为 40 wt.%、谷朊粉 8 wt.%、蛋清蛋白 6 wt.%、大豆分离蛋白 2 wt.%，通过预实验得到高直链玉米淀粉添加量为 3 wt.%，并继续添加可溶性膳食纤维 β - 葡聚糖（1、2、3 wt.%）、魔芋粉（1、2、3 wt.%）、菊粉（1、2、3 wt.%），将上述配料与小麦粉充分混合，并加入 1 wt.% 的盐与适量蒸馏水。样品依次编号（表 1）为 CK（100 wt.% 高筋小麦粉）、CVE6（44 wt.% 高筋粉+40 wt.% 鹰嘴豆+8 wt.% 谷朊粉+6 wt.% 蛋清蛋白+2 wt.% 大豆分离蛋白）、H3

（CVE6+ 高直链玉米淀粉 3 wt.%）、HBG1（H3 配方 + β - 葡聚糖 1 wt.%）、HBG2（H3 配方 + β - 葡聚糖 2 wt.%）、HBG3（H3 配方 + β - 葡聚糖 3 wt.%）、HKF1（H3 配方 + 魔芋粉 1wt.%）、HKF2（H3 配方 + 魔芋粉 2 wt.%）、HKF3（H3 配方 + 魔芋粉 3 wt.%）、HI1（H3 配方 + 菊粉 1 wt.%）、HI2（H3 配方 + 菊粉 2 wt.%）、HI3（H3 配方 + 菊粉 3 wt.%）。

和面：将鹰嘴豆用超微粉碎机进行超微粉碎，并过 100 目筛，得到的鹰嘴豆粉、谷朊粉、蛋清蛋白、大豆分离蛋白与小麦粉充分混合倒入和面机中，并加入 1 wt.% 的盐与合适量蒸馏水混合，搅拌 10 min。

醒面：将和好的面团于醒发箱中室温醒发 20 min。

压面与切条：将熟化后的面团经压面机逐步压延，使其成为均匀的面带（厚度为 1.0 mm），并将其切条、叠花，切刀宽度设置为 1.0 mm。

蒸面：叠花后的面条均匀放在蒸制盘中，采用中试生产线，蒸制时间设定为 4 min。

热风干燥：将面条置于模具中进行热风干燥，设定温度为 90 ℃，时间为 25 min。

1.3.2 面团的应力松弛

参照米雪^[6]使用的方法并稍做修改，采用 P35 探头，对厚 3.50 mm、直径 25.00 mm 的面带进行应力松弛测试，测定参数为：测前速度 1.00 mm·s⁻¹，测试速度 0.20 mm·s⁻¹，测后速度 1.00 mm·s⁻¹，压缩变形 10.00%，持续时间 180 s，触发力 50.00 g。

表 1 不同物质组成的鹰嘴豆方便面配方(wt.%)

Table 1 Formulations of chickpea instant noodles with different ingredients (wt.%)

样品编号	高筋粉	鹰嘴豆	谷朊粉	蛋清蛋白	大豆分离蛋白	高直链玉米淀粉	β -葡聚糖	魔芋粉	菊粉
CK	100	—	—	—	—	—	—	—	—
H3	44	40	8	6	2	3	—	—	—
HBG1	44	40	8	6	2	3	1	—	—
HBG2	44	40	8	6	2	3	2	—	—
HBG3	44	40	8	6	2	3	3	—	—
HKF1	44	40	8	6	2	3	—	1	—
HKF2	44	40	8	6	2	3	—	2	—
HKF3	44	40	8	6	2	3	—	3	—
HI1	44	40	8	6	2	3	—	—	1
HI2	44	40	8	6	2	3	—	—	2
HI3	44	40	8	6	2	3	—	—	3

注：表中“—”符号表示配方中没有添加。

通过三要素 Maxwell 模型对面团应力松弛进行非线性拟合, 拟合方程为^[7]:

$$\sigma = \varepsilon_0 (E_0 + E_1 e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\eta}{E_0} \quad (2)$$

式中:

σ ——样品在 t 时承受的力, N;

ε_0 ——样品形变量, %;

E_0 ——平衡弹性系数, Pa;

E_1 ——衰变弹性系数, Pa;

t ——松弛实验的时间, s;

τ ——松弛时间, s;

η ——阻尼系数, Pa·s。

1.3.3 面团的微观结构

参照姜继凯等^[8]使用的方法, 将 1.3.1 制成的面团进行激光共聚焦显微镜观察, 其中面团应在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行冷冻包埋, 并用冷冻切片机切成厚度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的切片, 染色液为 $0.001\text{ wt.}\%$ 罗丹明 B 和 $0.01\text{ wt.}\%$ 异硫氰酸荧光素的溶液等体积混合。参照高建昌等^[9]使用的方法, 结合显微镜的成像图, 使用 Image J 软件对面筋蛋白的面积进行定量分析。

1.3.4 非油炸方便面蛋白质二级结构的测定

参照 Yang 等^[10]使用的方法, 将制得的样品在 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 的范围内以 4 cm^{-1} 的分辨率扫描 32 次。取 $1\,600\sim 1\,700\text{ cm}^{-1}$ 段图谱, 用 Peakfit v4.12 分峰分析软件对傅立叶变换红外光谱去卷积, 进行二阶导数拟合, 得到各峰百分比含量。

1.3.5 非油炸方便面游离巯基和二硫键的测定

参考 He 等^[11]使用的方法, 测定方便面中游离巯基和总巯基含量, 并按照公式计算游离巯基 (SH_1) 和二硫键 (S-S) 含量。

$$X = 73.53 \times (A_{412} - A) \times \frac{B}{c} \quad (3)$$

$$Y = \frac{X_0 - X}{2} \quad (4)$$

式中:

X ——游离巯基含量, $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$;

B ——稀释倍数;

c ——样品质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$;

A_{412} ——样品溶液吸光值;

A ——空白对照吸光值;

Y ——二硫键含量, $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$;

X_0 ——总巯基含量, $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.3.6 非油炸方便面蒸煮特性的测定

1.3.6.1 水分含量测定

参照 GB 5009.3-2016 中直接干燥法测定非油炸方便面的水分含量。

1.3.6.2 最佳复水时间测定

参照 GB/T 40772-2021 的方法测定非油炸方便面的最佳复水时间。

1.3.6.3 蒸煮损失率和熟断条率测定

参照 GB/T 40636-2021 的方法, 将非油炸方便面泡至最佳复水时间, 测定其蒸煮损失率及熟断条率。

1.3.6.4 吸水率测定

参照李彩霞等^[12]使用的方法对方便面的吸水率进行测定, 并按公式 5 进行计算。

$$X = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

X ——样品吸水率, %;

M_1 ——样品干重, g;

M_2 ——样品泡至最佳复水时间后湿重, g。

1.3.7 非油炸方便面质构特性的测定

参考黄丽^[13]使用的方法并稍做修改, 将煮好的方便面进行 TPA 测定。采用 P35 探头, 设定参数为: 测前速度 $2.00\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 测中速度 $1.00\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 测后速度 $5.00\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 应变 70.00% , 应变力 5.00 g 。

1.3.8 非油炸方便面的感官评价

参照 GB/T 25005-2010 中规定的方法并略做修改, 结合非油炸方便面的特点, 从视觉感官评价方便面的色泽和表观状态, 从嗅觉感官评价方便面的食味, 从口腔触感和味觉感官评价方便面的复水性、光滑性、软硬度、韧性、粘性和耐泡性, 制定了感官评分标准 (表 2), 筛选 11 位优选评价员组成评价小组, 所得结果取平均值。

1.3.9 非油炸方便面多酚含量和抗氧化能力的测定

1.3.9.1 多酚含量

参考牛新奎等^[14]使用的方法并稍做修改, 准确称取 2.50 g 样品粉末, 加入体积分数 60% 乙醇溶液 30 mL , 涡旋 5 min , 置于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中提取 90 min , $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min , 取上清液备用。吸取提取液 0.50 mL , 加入福林酚试剂 0.75 mL , 再加入质量分数 10% 的 Na_2CO_3 试剂 1.50 mL , 定容至 10.00 mL , 在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴中反应 30 min , 在 765 nm 处测定吸光度, 乙醇溶液代替提取液为空白对照。以没食子酸质量浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) 为横坐标, 吸光度为纵坐标, 得到线性回归方程为 $y=8.912\,9x+0.025\,5$ ($R^2=0.997\,3$)。按照标准曲线计算方便面的多酚含量 ($\text{mg GAE}\cdot\text{g}^{-1}$)。

1.3.9.2 DPPH 自由基清除率

参照 Guo 等^[15]使用的方法测定 DPPH 自由基清

除率, 设定 517 nm 测定吸光值, 按照下公式 6 计算 DPPH 自由基清除率:

$$C_1=(1-\frac{A_2-A_1}{A_0})\times 100\%$$
 (6)

式中:
 A_0 ——空白组溶液测定的吸光值;
 A_1 ——对照组溶液测得的吸光值;
 A_2 ——样品组溶液测得的吸光值;
 C_1 ——DPPH 自由基清除率, %。

表 2 非油炸方便面感官评分标准

Table 2 Sensory scoring criteria for non-fried instant noodles		
评价指标	评价标准	分值
色泽 (10 分)	颜色较暗	1~3
	颜色较不均匀, 亮度适中	4~6
	具有鹰嘴豆的豆黄色, 颜色光亮	7~10
食味 (10 分)	无鹰嘴豆特殊的香味、有异味	1~3
	略有鹰嘴豆的香味、略有异味	4~6
	具有鹰嘴豆的香气, 无异味	7~10
复水性 (20 分)	复水性差	1~7
	复水性一般	8~14
	复水性好	15~20
外观状态 (10 分)	表面起泡, 变形严重	1~3
	有起泡或分层	4~6
	表面结构均匀光滑	7~10
软硬度 (10 分)	太硬或太软	1~3
	稍硬或稍软	4~6
	口感软硬适中	7~10
粘性 (10 分)	不爽口, 黏牙或夹生	1~3
	较爽口, 稍黏牙或稍夹生	4~6
	爽口, 不黏牙, 无夹生	7~10
韧性 (10 分)	嚼劲差, 弹性不足	1~3
	嚼劲一般, 较有弹性	4~6
	有嚼劲, 富有弹性	7~10
光滑性 (10 分)	很不光滑	1~3
	不光滑	4~6
	光滑适中	7~10
耐泡性 (10 分)	不耐泡	1~3
	耐泡性较差	4~6
	耐泡性适中	7~10

1.3.9.3 ABTS⁺ 自由基清除率

参照 Mei 等^[16]使用的方法测定 ABTS⁺ 自由基清除率, 设定 734 nm 测定吸光值。按照公式 7 计算 ABTS⁺ 自由基清除率:

$$C_2=(1-\frac{B_2-B_1}{B_0})\times 100\%$$
 (7)

式中:
 B_0 ——空白组溶液测得的吸光值;

B_1 ——对照组溶液测得的吸光值;
 B_2 ——样品组溶液测得的吸光值;
 C_2 ——ABTS⁺ 自由基清除率, %。

1.3.10 淀粉体外消化实验

参照刘慧瑶等^[17]使用的方法对方便面进行体外消化, 按公式 8 计算水解率:

$$S=\frac{(P_1-P_2)\times 0.9}{500\times (1-W)\times H}\times 100\%$$
 (8)

式中:
 S ——淀粉水解率, %;
 P_1 ——样品葡萄糖含量, mg;
 P_2 ——空白样葡萄糖含量, mg;
 W ——样品水分含量, %;
 H ——样品碳水化合物含量, %。

采用非线性一级速率方程对淀粉消化曲线进行拟合, 并计算曲线下面积 AUC, 消化终点时淀粉水解的量, 一阶动力学常数 k , 样品的水解指数 HI 和体外预测血糖生成指数 eGI。

1.3.11 数据处理

数据采用 SPSS 16.0 进行显著性分析 ($P<0.05$); Origin 2021 绘制图表; OMNIC 软件对傅里叶变换红外光谱图进行去卷积分析, Peakfit 软件进行定量分析; Image J 软件对激光共聚焦显微镜成像进行定量分析。

2 结果与分析

2.1 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆面团应力松弛的影响

应力松弛是测试面团内部粘弹性状态常用的一种方法。从图 1 中可以看出, 通过对面带进行施压, 达到设定值后停止加压, 此阶段为压缩段, 对应的是初始应力; 之后应力随时间的增加发生骤降后趋于平缓, 此阶段为松弛段, 面带内部的应力也逐渐趋于平缓, 达到永久变形^[6]。

通过对应力松弛曲线进行非线性拟合得到应力松弛特性参数见表 3, 拟合后的决定系数 $R^2>0.99$, 说明曲线拟合程度较好。表中 E_0 为平衡弹性系数, 反映了面团的弹性, 其值越大, 说明面团的刚性强度越显著。与 CK 相比, 其余所有样品的 E_0 值均有所升高, 这可能与直链淀粉的含量有关, 有研究表明, 直链淀粉含量越高, 面团的 E_0 值越大^[18]。而可溶性膳食纤维的种类和添加量不同, E_0 增加的程度也不同。与 H3 相比, β -葡聚糖的添加对面团 E_0 值的影响不存在显著性差异; 添加 1 wt.% 菊粉的面团 (HI1) 相较于 H3 增加了 0.36×10^4 Pa, 之后呈降低趋势; 与 β -葡聚糖和菊

粉相比，魔芋粉的添加对其影响较明显，当添加量为 1 wt.%~2 wt.% 时（HKF1 与 HKF2），面团的 E_0 值呈上升趋势，之后 E_0 开始降低。结果表明，三种可溶性膳食纤维的添加均可提高面团的硬度。

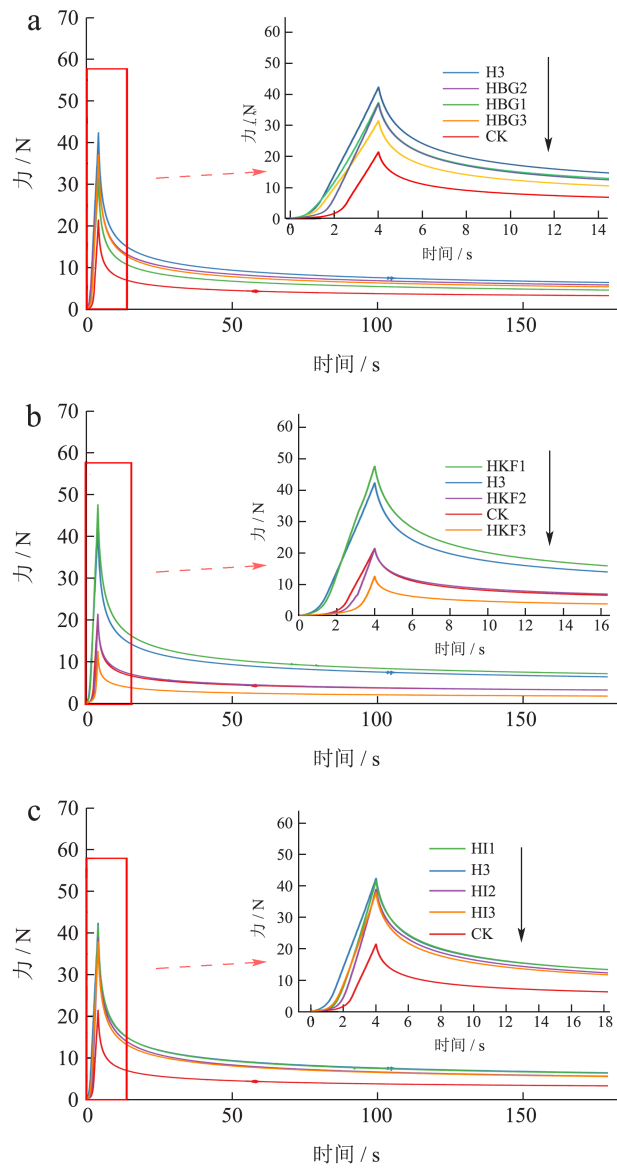


图 1 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆面团应力松弛曲线的影响
Fig.1 Effect of soluble dietary fiber on the stress relaxation curve of chickpea dough

注：图中 a~c 分别为 β -葡聚糖、魔芋粉和菊粉在 0~3 wt% 添加量下的面团应力松弛曲线，图中箭头方向表示样品曲线从上到下的排列顺序。

E_1 为衰变弹性系数，面团的初始应力与其在松弛阶段逐渐衰减至平衡应力的差值即为衰变弹性系数，反映了物质的黏弹性^[7]。不同可溶性膳食纤维对面团 E_1 的影响并不相同。与 H3 相比， β -葡聚糖的添加对面团的 E_1 值变化并不存在显著性差异；菊粉添加量为 1 wt.% 时（HI1）， E_1 值显著增加，之后与添加量成反

比；而魔芋粉加入使得面团的 E_1 值出现了先上升后降低的趋势，当添加量为 3 wt.% 时（HKF3）， E_1 开始降低。说明可溶性膳食纤维的加入在一定程度上不仅可以增加面团的硬度，还能增加面团的弹性。

表 3 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆面团应力松弛特性的影响
Table 3 Effect of soluble dietary fiber on the stress relaxation characteristics of chickpea dough

样品 编号	$E_0/(\times 10^4 \text{ Pa})$	$E_1/(\times 10^4 \text{ Pa})$	$\eta/(\times 10^4 \text{ Pa})$	τ/s
CK	$0.99 \pm 0.14^{\text{d}}$	$5.62 \pm 0.75^{\text{d}}$	$1.76 \pm 0.29^{\text{e}}$	$1.77 \pm 0.04^{\text{d}}$
H3	$1.01 \pm 0.18^{\text{d}}$	$5.91 \pm 0.89^{\text{cd}}$	$1.79 \pm 0.37^{\text{de}}$	$1.77 \pm 0.06^{\text{d}}$
HBG1	$1.16 \pm 0.11^{\text{bcd}}$	$6.57 \pm 0.81^{\text{bcd}}$	$2.37 \pm 0.28^{\text{bc}}$	$2.04 \pm 0.05^{\text{a}}$
HBG2	$1.13 \pm 0.13^{\text{cd}}$	$6.50 \pm 0.81^{\text{bcd}}$	$2.08 \pm 0.33^{\text{cde}}$	$1.84 \pm 0.08^{\text{cd}}$
HBG3	$1.10 \pm 0.11^{\text{cd}}$	$6.59 \pm 0.63^{\text{bcd}}$	$2.09 \pm 0.27^{\text{cde}}$	$1.90 \pm 0.06^{\text{bc}}$
HKF1	$1.35 \pm 0.17^{\text{b}}$	$7.49 \pm 0.94^{\text{ab}}$	$2.78 \pm 0.48^{\text{b}}$	$2.05 \pm 0.10^{\text{a}}$
HKF2	$1.83 \pm 0.09^{\text{a}}$	$7.85 \pm 0.61^{\text{a}}$	$3.62 \pm 0.15^{\text{a}}$	$1.98 \pm 0.06^{\text{ab}}$
HKF3	$1.30 \pm 0.20^{\text{bc}}$	$7.32 \pm 1.01^{\text{ab}}$	$2.58 \pm 0.51^{\text{bc}}$	$1.98 \pm 0.09^{\text{ab}}$
HI1	$1.35 \pm 0.16^{\text{b}}$	$7.07 \pm 1.17^{\text{abc}}$	$2.81 \pm 0.42^{\text{ab}}$	$2.08 \pm 0.11^{\text{a}}$
HI2	$1.11 \pm 0.05^{\text{cd}}$	$6.24 \pm 0.39^{\text{bcd}}$	$2.25 \pm 0.09^{\text{cde}}$	$2.02 \pm 0.03^{\text{a}}$
HI3	$1.15 \pm 0.10^{\text{bcd}}$	$5.66 \pm 0.04^{\text{d}}$	$2.29 \pm 0.27^{\text{bcd}}$	$2.00 \pm 0.06^{\text{ab}}$

注：同列小写字母不同表示差异显著（ $P < 0.05$ ），a 表示最大值。下表同。

阻尼系数 η 是由于分子链之间的相互移动摩擦引起的，代表了样品的初始黏度。与 H3 相比，可溶性膳食纤维的加入， η 均出现了先增加后降低的趋势。阻尼系数 η 的增加可能是因为可溶性膳食纤维在吸水后能形成具有一定黏弹性的凝胶结构，使得样品的初始黏度增加。与 β -葡聚糖和菊粉相比，添加魔芋粉的面团 η 值变化较为明显，当添加量为 2 wt.% 时（HKF2）， η 值是 H3 的 2.02 倍，说明此时面团的凝胶强度较大。有研究表明，魔芋粉的分子结构中含有较多的羟基，面团中的水分会通过氢键与羟基结合，从而形成更强的面筋网络结构^[19]。贺子婕^[20]在苦荞无麸质面团中添加 0.25 wt.%~0.50 wt.% 魔芋胶显著提升面团的残余应力和阻尼系数，通过增强黏弹性参数使面团形成更坚实的结构。

松弛时间 τ 是面团弹性行为与黏性行为共同作用的结果。与 H3 相比，可溶性膳食纤维的加入均增加了面团的松弛时间，当添加量为 1 wt.% 时（HBG1、HKF1 与 HI1），均表现出较高的 τ 值（三种面团之间不存在显著性差异），说明此时面团内部的结合力较强，面团的弹性行为较为明显^[21]。魔芋粉在不同添加量之间，面团的松弛时间差异不显著，与添加菊粉的面团 τ 值结果一致；而随着 β -葡聚糖添加量的增加， τ 值呈降低趋势。

综上所述，随着可溶性膳食纤维的加入，面团的黏弹性和硬度增加，面团内部结合力增强，改善了混合粉面团的流变学特性，其中魔芋粉对面团的影响最大。

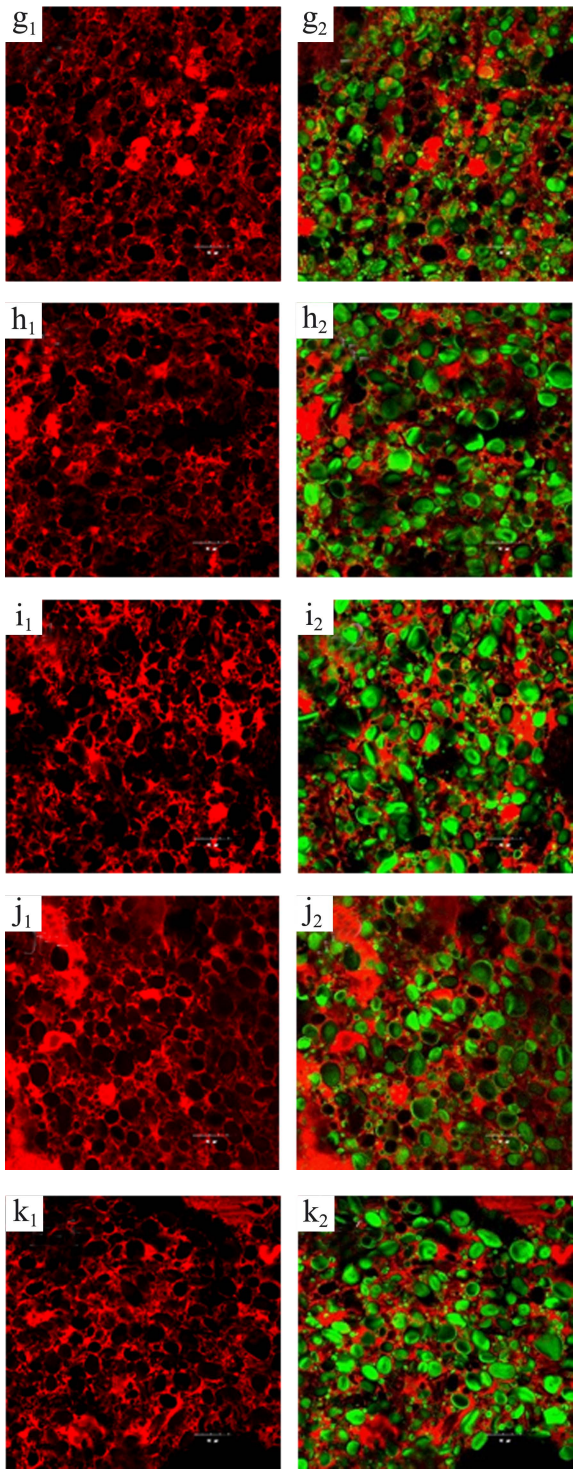
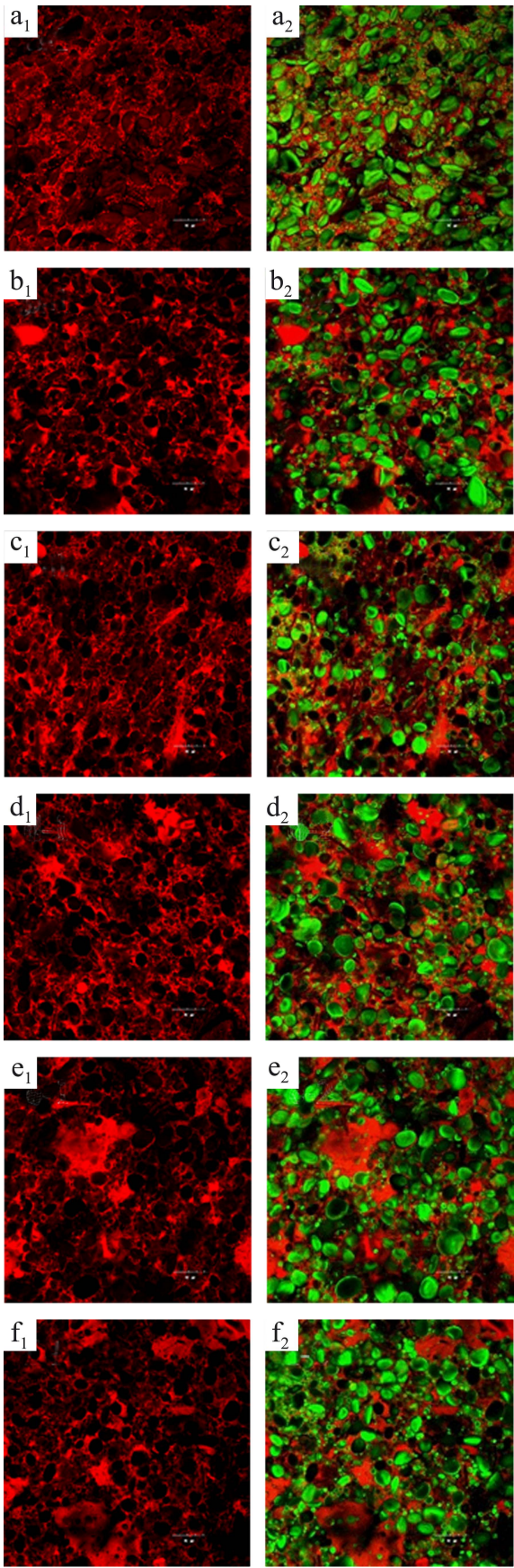


图 2 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆面团微观结构的影响
Fig.2 Effect of soluble dietary fiber on the microstructure of chickpea dough by confocal laser scanning microscope

注：图中 a~k 分别为 CK、H3、HBG1、HBG2、HBG3、HKF1、HKF2、HKF3、HI1、HI2 和 HI3，1 为蛋白质网络微观图，2 为蛋白质和淀粉微观图。

2.2 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆面团微观结构的影响

图 2 为添加可溶性膳食纤维后的面团微观结构，

图中红色部分为蛋白质网络结构呈现典型三维连续结构,红色区域显示均匀分布的纤维状谷蛋白骨架,形成致密的蜂窝状拓扑。这种结构源于麦谷蛋白的硫醇-二硫键交换反应,形成长链交联,而醇溶蛋白提供粘弹性基质。绿色淀粉颗粒被均匀包裹在面筋网络中,说明蛋白质相与淀粉相形成良好共连续体系。由图可知,空白组面团(CK)的蛋白质(图2a)表现为密集且连续的纤维网状结构,分布均匀,包裹着淀粉颗粒;而H3的蛋白分布松散(如图2b),交联性较差,网络结构并不连续,这主要是因为加入了大量的鹰嘴豆粉和直链淀粉破坏蛋白交联,激光共聚焦图像显示蛋白网络断裂长度增加,节点密度下降。在H3中继续添加可溶性膳食纤维,可以观察到,蛋白质出现不同程度的聚集,并伴随有较大的孔洞生成;其中HKF2(图2g)和HI3(图2k)表现出较为连续的蛋白质网络结构,淀粉颗粒被紧密地包裹着,这可能是因为适宜浓度魔芋葡甘露聚糖与低聚合度果糖水合形成的凝胶作为物理交联剂,与谷蛋白交联形成氢键网络,提升淀粉包裹率;而HBG1(图2f)和HBG3(图2h)观察到较大的孔洞,呈现出部分聚集状态,这可能是因为 β -葡聚糖高持水性导致自由水缺乏,面筋水化度下降,形成面筋蛋白和淀粉颗粒界面微相分离结构。

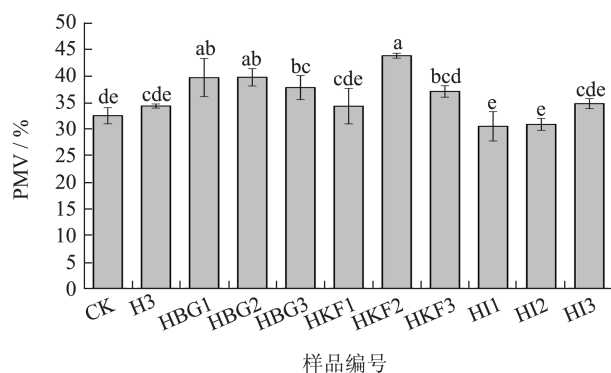


图3 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆面团 PMV 的影响

Fig.3 Effect of soluble dietary fiber on PMV of chickpea dough

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),a表示最大值。

下图同。

使用 Image J 软件对微观图像中蛋白质网络(红色区域)进行定量分析,计算其在总面积中的面积占比,得到蛋白基质值(Protein Matrix Value, PMV)。如图3所示,空白样品的 PMV 为 32.48%。在 H3 基础上添加可溶性膳食纤维后,HI1、HI2 的 PMV 达到最低,分别为 30.49%、30.84%,除此之外,其余样品的 PMV 均高于 CK 和 H3, HKF2 的 PMV 值最高为 43.74%。上述结果表明,特别在添加 2% 魔芋粉作用下,面团中的蛋白总面积增加最显著,连接点增加,网络

长度增加,蛋白网络的数量终点数量增加,这说明 2% 魔芋粉的处理下蛋白网络发生新的交联并延展。尽管所有可溶性膳食纤维的添加均能有效强化蛋白质网络结构并提升淀粉包埋效率,但其中魔芋粉对面筋蛋白的交联促进作用最为显著。

2.3 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面蛋白质二级结构的影响

图4为膳食纤维对非油炸方便面蛋白质二级结构的影响。结果表明,与CK相比,其余样品的 α -螺旋结构均显著增加($P<0.05$)。与H3相比, β -葡聚糖和菊粉的加入对蛋白质二级结构的影响并不明显,但与CK相比, β -转角结构有所降低。而魔芋粉的添加显著增加了方便面中的 β -折叠,同时显著降低了无规则卷曲结构($P<0.05$),其中,当魔芋粉添加量为 2 wt.% 时(HKF2),蛋白质二级结构中 β -折叠含量最高,高于 H3 样品 7.13%,高于 CK 样品 6.37%。娄雪琪^[22]将天然菊粉添加到冷冻面团中,发现菊粉抑制冰晶对蛋白质二级结构的破坏,增强其稳定性。曹蕊^[23]在面条中添加魔芋精粉后,同样增加了面条中面筋蛋白的 α -螺旋等有序结构比例。以上结果表明,可溶性膳食纤维的加入可以促使蛋白质中的无序结构向有序结构转化,进一步说明了可溶性膳食纤维可以改善面筋网络结构,其中魔芋粉的效果较为明显。

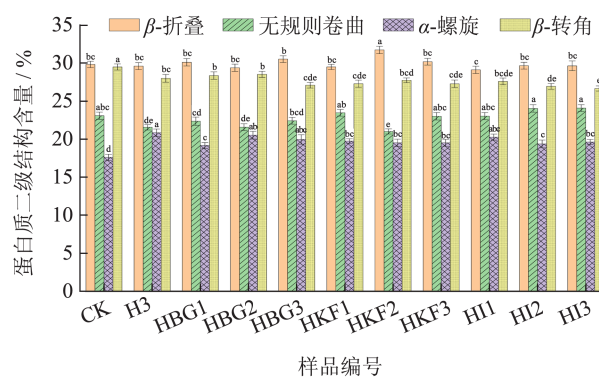


图4 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面蛋白质二级结构的影响

Fig.4 Effect of soluble dietary fiber on the secondary structure of protein in chickpea instant noodles

2.4 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面游离巯基和二硫键的影响

图5为可溶性膳食纤维对非油炸方便面游离巯基和二硫键的影响。从图可知,与CK相比,H3的游离巯基含量和二硫键含量分别增加了 2.41、4.94 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在图5a中,与H3相比, β -葡聚糖的添加量在 1 wt.%~2 wt.% 的范围内,二硫键含量显著增加,当添加量为 3 wt.% (HBG3) 时,反而降低了二硫键含量,但仍高

于空白样品 (CK)。在图 5c 中, 菊粉的添加使得方便面中二硫键含量逐渐降低、游离巯基含量逐渐升高。在图 5b 中, 魔芋粉的加入使得方便面中游离巯基含量呈先增后减的趋势, 二硫键含量有所增加, 但不存在显著性差异。这与他人的研究结果相似, Liu 等^[24]在面团中加入菊粉后, 面团中二硫键含量显著降低; 汪磊^[25]在面团中添加燕麦 β -葡聚糖, 其含量为 5 wt.% 时, 面团中的游离巯基、总巯基和二硫键含量显著降低; 冯佳^[26]将魔芋葡甘露聚糖添加到小麦面团中, 二硫键含量与添加量呈正比。值得注意的是, 与 CK 相比, 其余样品的游离巯基含量均显著增加, 这可能是因为样品中添加了蛋清蛋白, 这种蛋白本身含有较高的巯基含量。综上, 在三种可溶性膳食纤维中, 魔芋粉可以更好地抑制二硫键的断裂, 使非油炸方便面的品质得到改善。

2.5 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面蒸煮特性的影响

表 4 为三种可溶性膳食纤维对非油炸方便面蒸煮特性和感官品质的影响。由图可知, 与 CK 相比, H3 的干燥后水分含量和吸水率显著降低 ($P < 0.05$), 这可能是由于 H3 中直链淀粉含量较高, 而面条的吸水率与直链淀粉含量呈反比^[27]; 同时 H3 的蒸煮损失率与复水时间增加, 感官评分有所降低。与 H3 相比, 虽然三种可溶性膳食纤维的加入使干燥后水分含量无显著变化, 但使方便面的吸水率再次降低, 这是由于可溶性膳食纤维形成的凝胶结构与面筋网络结构相互作用, 抑制了淀粉的吸水, 从而降低了方便面的吸水率, 这一水分竞争机制在其它亲水胶体改良面制品的研究中已被揭示^[28]。

与 H3 相比, 三种可溶性膳食纤维的添加均对方便面的蒸煮损失率有降低的效果, 说明可溶性膳食纤维会与蛋白相互作用, 增强面筋蛋白网络结构, 使得淀粉分子不易溶出, 从而降低了蒸煮损失率。值得注意的是, 当 β -葡聚糖和菊粉添加量为 3 wt.% 时 (HBG3 与 HI3), 方便面的蒸煮损失率增加, 可能是此时方便面中的蛋白质与淀粉相互作用较弱, 淀粉溶出较多。同时可溶性膳食纤维的加入均显著降低了方便面的最佳复水时间。

以上结果表明, 可溶性膳食纤维的加入可以降低非油炸方便面的吸水率、蒸煮损失率及最佳复水时间, 增强面筋蛋白网络结构, 从而改善非油炸方便面的蒸煮品质, 其中魔芋粉的效果最为明显。

2.6 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面质构特性的影响

图 6 为可溶性膳食纤维对非油炸方便面质构特性的影响。从表中可以看出, 与 CK 相比, H3 样品的硬度显著增加, 而咀嚼性、弹性和回复性不存在显著性差异。方便面硬度的增加, 可能是因为 H3 中直链淀粉含量较高, 淀粉形成的凝胶强度增大, 从而提高了方便面的硬度。

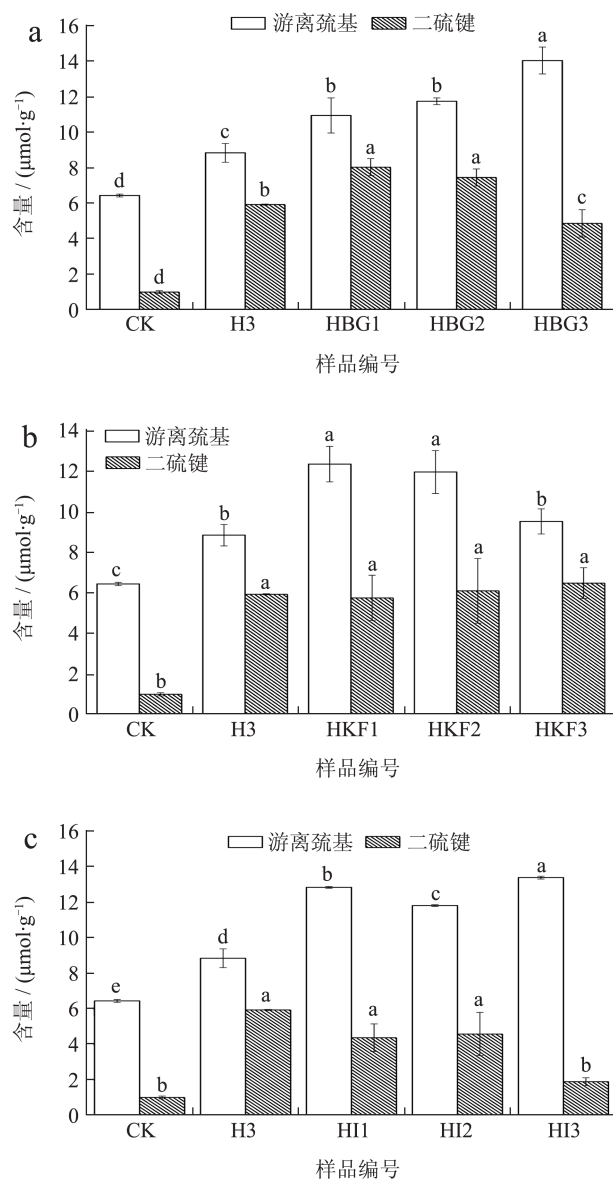


图 5 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面游离巯基和二硫键含量的影响

Fig.5 Effect of soluble dietary fiber on the content of free thiol groups and disulfide bonds in chickpea instant noodles

注: 图 a~c 分别为 β -葡聚糖、魔芋粉和菊粉在 0~3 wt% 添加量范围内对鹰嘴豆方便面中游离巯基及二硫键含量的影响规律。

表 4 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面蒸煮特性的影响

Table 4 Effect of soluble dietary fiber on the cooking characteristics of chickpea instant noodles				
样品编号	水分含量/%	吸水率/%	蒸煮损失率/%	最佳复水时间/s
CK	8.38 ± 0.17 ^a	163.24 ± 1.18 ^a	8.55 ± 0.99 ^{cde}	271.50 ± 3.54 ^f
H3	6.04 ± 0.11 ^{bc}	132.92 ± 0.12 ^c	9.12 ± 0.09 ^{bc}	291.00 ± 1.41 ^a
HBG1	5.84 ± 0.13 ^{bc}	122.93 ± 2.51 ^f	8.33 ± 0.1 ^{de}	277.00 ± 1.41 ^{cd}
HBG2	5.96 ± 0.21 ^{bc}	136.95 ± 0.36 ^b	9.04 ± 0.26 ^{bcd}	266.50 ± 4.95 ^e
HBG3	5.80 ± 0.08 ^{bc}	128.27 ± 0.77 ^{de}	9.60 ± 0.05 ^{ab}	273.50 ± 2.12 ^d
HKF1	6.13 ± 0.11 ^{bc}	129.36 ± 3.16 ^d	8.89 ± 0.02 ^{cd}	280.50 ± 0.71 ^{bc}
HKF2	5.93 ± 0.14 ^b	124.83 ± 1.51 ^{ef}	8.43 ± 0.07 ^{cde}	283.00 ± 1.41 ^b
HKF3	6.05 ± 0.08 ^{bc}	126.89 ± 0.28 ^{de}	8.62 ± 0.04 ^{cde}	280.50 ± 0.71 ^{bc}
HI1	5.87 ± 0.18 ^{bc}	126.01 ± 0.48 ^{def}	8.37 ± 0.11 ^{de}	282.50 ± 0.71 ^b
HI2	5.76 ± 0.14 ^c	133.90 ± 1.17 ^{bc}	8.38 ± 0.11 ^{de}	281.50 ± 2.12 ^{bc}
HI3	5.90 ± 0.07 ^{bc}	115.78 ± 1.02 ^g	10.01 ± 0.04 ^a	261.00 ± 1.41 ^f

在图 6a、6b 中，当三种可溶性膳食纤维的添加量超过 1 wt.% 时，方便面的硬度和咀嚼性均出现降低的趋势，这可能是因为，当添加量较高时，可溶性膳食纤维的吸水性较强，与淀粉凝胶竞争水分，从而对面筋网络结构造成破坏，导致方便面的硬度降低，但仍高于 H3 和 CK。其中，相较于另外两种可溶性膳食纤维，添加魔芋粉的方便面表现出较高的硬度和咀嚼性，其添加量为 2 wt.% 时（HKF2），方便面的硬度和咀嚼性分别高于 H3 样品 1 490.48、1 036.48 g。研究表明，面筋蛋白中 β -折叠等有序构象的比例升高可显著提升面制品硬度^[29]，而该研究中魔芋粉与菊粉的添加通过调控 β -折叠结构含量进一步验证了这一增效路径。

在图 6c、6d 中，当三种可溶性膳食纤维添加量为 1 wt.% 时（HBG1、HKF1 和 HI1），与 H3 相比，方便面的弹性变化并不存在显著性差异，但当 β -葡聚糖添加量超过 2 wt.%、菊粉添加量超过 1 wt.% 时，弹性和回复性显著降低（ $P<0.05$ ），而魔芋粉的添加对方便面的弹性和回复性影响较小。Zhang 等^[30]在面条中加入银耳多糖后，面条的硬度和咀嚼性显著提高，当添加量超过 3 wt.% 时，反而呈降低趋势，此规律与 β -葡聚糖、菊粉展现的品质调控作用相似。

以上结果表明，可溶性膳食纤维通过增强面筋网络的三维交联密度，显著提升了方便面的硬度、咀嚼性及其他质构特性，这一现象与面团应力松弛实验中面团网络结构强化趋势共同揭示了膳食纤维的增效机制。

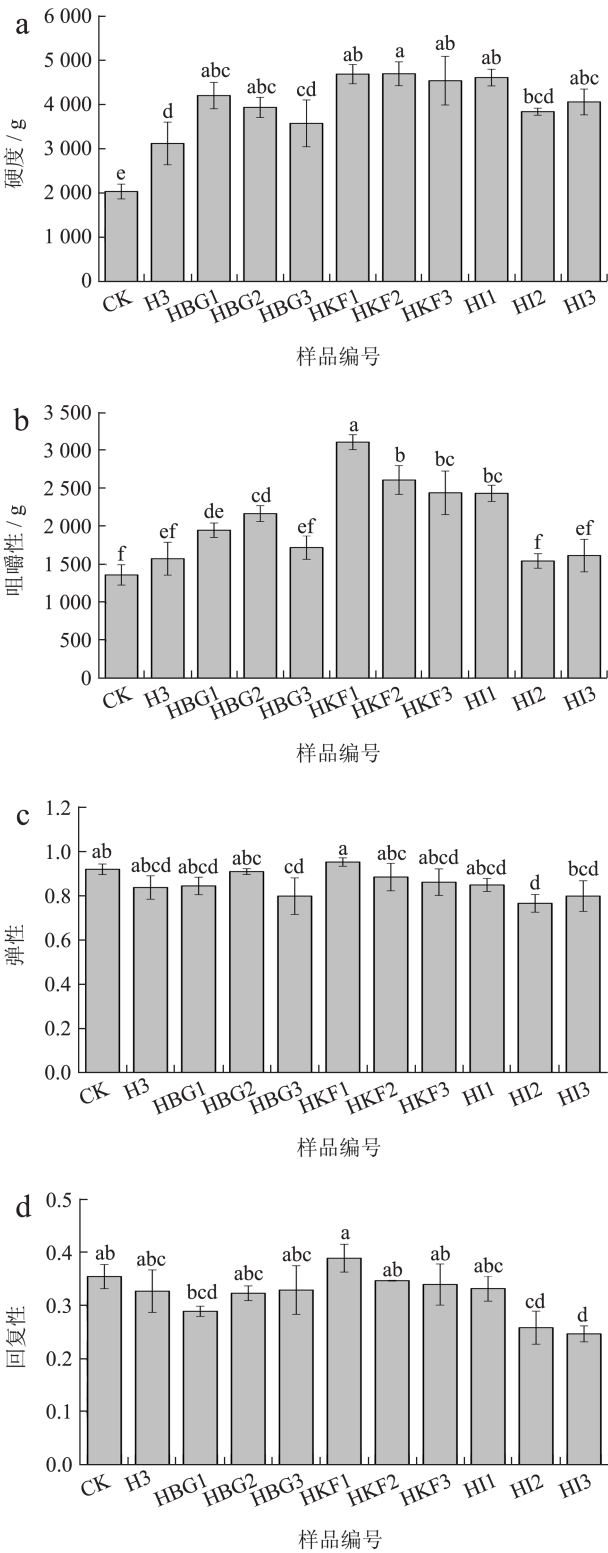


图 6 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面质构特性的影响

Table 6 Effect of soluble dietary fiber on the textural properties of chickpea instant noodles

注：图 a~d 分别对应添加量 0~3 wt% 范围内， β -葡聚糖、魔芋粉和菊粉对鹰嘴豆方便面硬度、咀嚼性、弹性及回复性四项关键质构特性的变化规律。

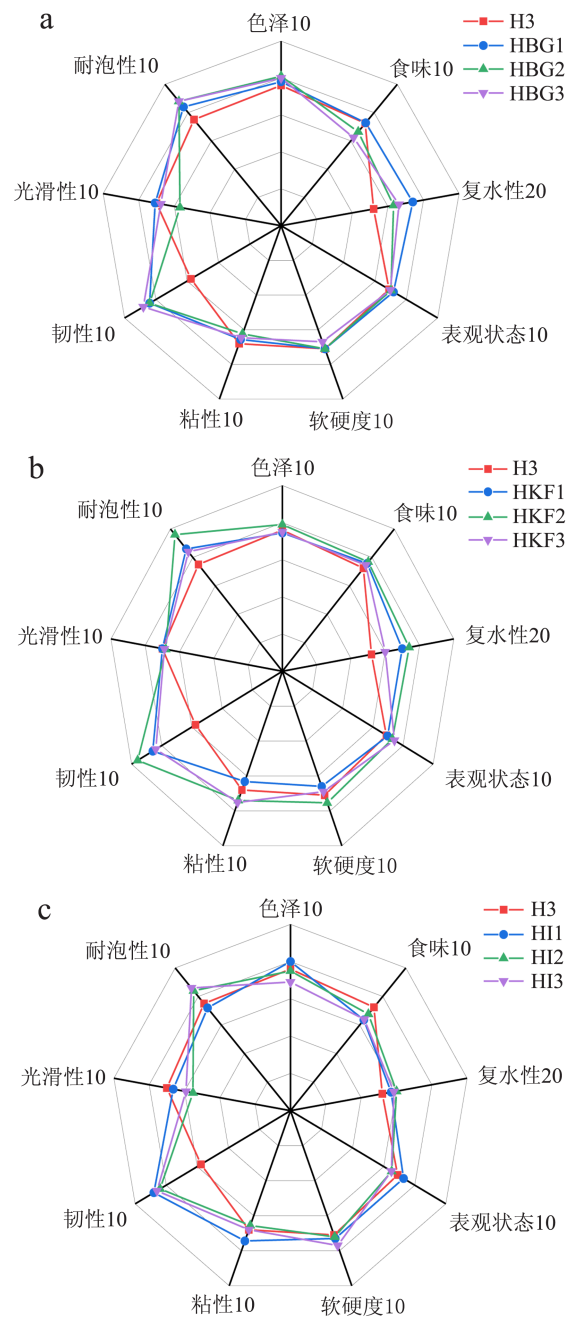


图 7 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面感官评分的影响
Fig.7 Effect of soluble dietary fiber on the sensory evaluation of chickpea instant noodles

注：图 a~c 分别为 β -葡聚糖、魔芋粉和菊粉在 0~3 wt% 添加量范围内对鹰嘴豆方便面感官评分的影响规律。

2.7 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面感官评分的影响

图 7 中 a、b、c 分别为 β -葡聚糖、魔芋粉和菊粉对非油炸方便面感官特性的影响。由于非油炸方便面中的鹰嘴豆添加量较高为 40 wt%，赋予了方便面特殊的鹰嘴豆风味和色泽。图中 H3、HBG1、HBG2、HBG3、HKF1、HKF2、HKF3、HI1、HI2 和 HI3 的

感官总分分别为 63.54、66.30、74.60、70.62、71.99、73.11、78.62、72.50、70.42、68.88 和 69.12。由图可知，与 H3 相比，三种可溶性膳食纤维的加入均增加了非油炸方便面的韧性、耐泡性和复水性，感官评分得到提高，其中魔芋粉的加入使得方便面表现出较高的韧性，这与方便面的咀嚼性增加有关。当魔芋粉添加量为 2 wt.% 时（HKF2），方便面的感官评分最高为 78.62，是 H3 的 1.19 倍，说明此时方便面的口感最好，有嚼劲，且弹性较好，可以改善非油炸方便面的感官品质。胡志远等^[31]通过向发酵空心挂面中分别添加五种多糖（瓜尔豆胶、黄原胶、海藻酸钠、羧甲基纤维素钠和魔芋粉），挂面的感官评分均有所提高，同样印证了可溶性胶体对面制品食用品质的改善作用。

表 5 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面多酚含量和抗氧化能力的影响

Table 5 Effect of soluble dietary fiber on the polyphenol content and antioxidant capacity of chickpea instant noodles			
样品编号	多酚含量/ (mg·g ⁻¹)	DPPH 自由基清除率/%	ABTS ⁺ 自由基清除率/%
CK	2.45 ± 0.09 ^c	8.25 ± 0.76 ^c	6.58 ± 2.14 ^c
H3	3.38 ± 0.05 ^d	32.16 ± 4.60 ^{bc}	37.11 ± 6.84 ^c
HBG1	3.42 ± 0.09 ^d	49.35 ± 6.62 ^a	54.43 ± 6.01 ^b
HBG2	4.08 ± 0.15 ^b	52.87 ± 1.51 ^a	51.56 ± 3.42 ^b
HBG3	4.35 ± 0.17 ^a	47.32 ± 0.37 ^a	67.71 ± 0.74 ^a
HKF1	4.02 ± 0.02 ^b	31.30 ± 5.86 ^{bc}	55.21 ± 6.57 ^b
HKF2	4.19 ± 1.67 ^{ab}	31.55 ± 1.49 ^{bc}	56.51 ± 3.77 ^b
HKF3	4.20 ± 0.22 ^{ab}	30.75 ± 3.74 ^{bc}	52.21 ± 10.08 ^b
HI1	3.70 ± 0.12 ^c	37.40 ± 1.40 ^b	49.67 ± 3.25 ^b
HI2	4.07 ± 0.07 ^b	28.16 ± 4.90 ^c	52.47 ± 1.63 ^b
HI3	4.33 ± 0.11 ^a	28.53 ± 7.58 ^c	66.60 ± 1.37 ^a

2.8 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面多酚含量和抗氧化能力的影响

从表 5 中可以看出，与 CK 相比，H3 的多酚含量增加了 37.96%，DPPH 自由基清除率由 8.25% 升至 32.16%，ABTS⁺ 自由基清除率由 6.85% 升至 37.11%。与 H3 相比，可溶性膳食纤维的加入对方便面的多酚含量均有所增加，且多酚含量的增加与可溶性膳食纤维的添加量呈正比，这主要归因于膳食纤维结合酚的存在。这类酚类物质通过物理吸附或化学键与膳食纤维紧密结合，在常规加工过程中难以被有效去除，同时因其稳定的结合形态，保留了较强的抗氧化活性，从而显著提升了体系的综合酚类含量与功能特性；与魔芋粉和菊粉相比， β -葡聚糖的添加显著提高了 DPPH 自由基的清除率，同时，相较于 CK 和 H3，三

种可溶性膳食纤维对 ABTS⁺ 自由基的清除率均显著提高。这说明可溶性膳食纤维的添加可以增强非油炸方便面的抗氧化能力,除了膳食纤维结合酚自身的抗氧化活性,而且也与可溶性膳食纤维组成及结构密切相关,如单糖组成、分子量及糖苷键类型等关键因素^[32]。Sinthusamran 等^[33]的研究结果表明,β-葡聚糖的添加以剂量依赖性方式显著增强了明胶凝胶的抗氧化活性,具体表现为 ABTS⁺ 自由基清除率、铁离子还原抗氧化能力 (FRAP) 及还原力的同步提升。Esmacili 等^[34]的研究同样得到了菊粉对 DPPH 自由基具有清除能力,且与浓度呈正相关。

2.9 可溶性膳食纤维对鹰嘴豆方便面体外淀粉消化的影响

表 6 可溶性膳食纤维对非油炸鹰嘴豆方便面eGI值的影响
Table 6 Effect of soluble dietary fiber on the eGI value of non-fried chickpea instant noodles

样品编号	C _∞ /%	HI	eGI
CK	56.83 ± 0.24 ^a	57.31 ± 4.42 ^a	71.17 ± 2.12 ^a
CVE6	25.58 ± 0.68 ^b	31.02 ± 0.06 ^b	56.74 ± 0.03 ^b
H3	19.43 ± 0.16 ^c	18.28 ± 0.36 ^c	49.74 ± 0.20 ^c
HBG1	17.92 ± 0.02 ^d	17.76 ± 0.83 ^c	49.46 ± 0.46 ^c
HBG2	14.59 ± 0.53 ^f	17.12 ± 1.08 ^{cd}	49.11 ± 0.59 ^{cd}
HBG3	13.30 ± 0.72 ^{gh}	15.35 ± 0.27 ^{cd}	48.14 ± 0.15 ^{cd}
HKF1	16.97 ± 0.06 ^e	16.85 ± 0.39 ^{cd}	48.96 ± 0.22 ^{cd}
HKF2	11.77 ± 0.06 ⁱ	14.33 ± 0.09 ^d	47.58 ± 0.05 ^d
HKF3	13.64 ± 0.09 ^{gh}	15.93 ± 0.02 ^{cd}	48.45 ± 0.01 ^{cd}
HI1	17.75 ± 0.07 ^d	17.59 ± 0.38 ^{cd}	49.37 ± 0.21 ^{cd}
HI2	13.13 ± 0.01 ^h	15.60 ± 0.43 ^{cd}	48.27 ± 0.24 ^{cd}
HI3	14.06 ± 0.06 ^{fg}	16.35 ± 0.44 ^{cd}	48.69 ± 0.24 ^{cd}

注:表中 CVE6 为添加 44% 高筋粉、40% 鹰嘴豆、8% 谷朊粉、6% 蛋清蛋白和 2% 大豆分离蛋白的非油炸方便面。

表 6 为可溶性膳食纤维对非油炸方便面淀粉消化特性的影响。从表中可以看出,与 CK 和 CVE6 相比,H3 样品的 C_∞、HI 和 GI 值显著降低 (P<0.05),此时方便面的 GI 值达到 49.74,符合低 GI 食物的标准。与 H3 相比,三种可溶性膳食纤维的添加对方便面的 GI 值不存在显著性差异,从数值来看,HKF2 样品的 GI 值最低为 47.58,与 CK 相比,降低了 33.15%,与 CVE6 相比降低了 16.14%。方便面 GI 值的下降可能是因为混粉体系中添加的高直链玉米淀粉大部分为抗性淀粉,不易消化^[35],同时可溶性膳食纤维在水中可形成黏稠的胶状物质,包裹淀粉颗粒,减少其与消化酶(如 α-淀粉酶)的直接接触,这种物理屏障作用延

缓了淀粉的水解速率,从而降低葡萄糖的释放速度。此外,可溶性膳食纤维还可通过吸附或空间位阻效应抑制 α-淀粉酶的活性。

3 结论

该研究系统揭示 β-葡聚糖、魔芋粉与菊粉三种可溶性膳食纤维对高蛋白低升糖指数非油炸鹰嘴豆方便面加工特性及食用品质的调控机制。三种可溶性膳食纤维通过提高面团的硬度和弹性,均显著改善面团加工适性,同时诱导面筋蛋白二硫键的形成,表明其可通过分子间作用优化蛋白构象有序性;其中,添加 2 wt.% 魔芋粉对非油炸方便面质构特性与蒸煮特性提升最显著,且多酚含量(最高 4.19 mg GAE·g⁻¹)及 ABTS⁺ 自由基清除率(56.51%)显著增强,证实膳食纤维兼具质构改良与抗氧化协同增效作用;基于综合品质评价,魔芋粉添加量为 2 wt.% 的 HKF2 配方表现最优,其感官评分为 78.62,体外消化证实达到国际低 GI 食品标准。最终确定 HKF2 最佳配方组成为:鹰嘴豆粉 40 wt.%、高筋粉 39 wt.%、谷朊粉 8 wt.%、蛋清蛋白 6 wt.%、高直链玉米淀粉 3 wt.%、大豆分离蛋白 2 wt.% 及魔芋粉 2 wt.%。该研究为高蛋白低 GI 功能性方便面的开发提供了理论依据,揭示了膳食纤维在改善加工性能、营养特性与代谢调控方面的多重价值。

参考文献

[1] 张金叶.鹰嘴豆组分降糖效果的研究[D].郑州:河南工业大学,2022.

[2] MONK J M, LEPP D, WU W, et al. Chickpea-supplemented diet alters the gut microbiome and enhances gut barrier integrity in C57Bl/6 male mice [J]. Journal of Functional Foods, 2017, 38: 663-674.

[3] TANG W, LIN X, WALAYAT N, et al. Dietary fiber modification: structure, physicochemical properties, bioactivities, and application-a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(22): 7895-7915.

[4] LI S, QU Z, FENG J, et al. Improved physicochemical and structural properties of wheat gluten with konjac glucomannan [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103050.

[5] LI W, XU R, QIN S, et al. Cereal dietary fiber regulates the quality of whole grain products: Interaction between composition, modification and processing adaptability [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 274: 133223.

[6] 米雪.多糖对马铃薯全粉品质特性的影响及无麸质面包的研发[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.

[7] DEL NOBILE M A, CHILLO S, MENTANA A, et al. Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3): 978-983.

- [8] 姜继凯,张影全,郭波莉,等.激光共聚焦显微法测定面团面筋网络结构的影响因素[J].中国农业科学,2023,56(14):2787-2797.
- [9] 高建昌,郭广君,国艳梅,等.平台扫描仪结合ImageJ软件测定番茄叶面积[J].中国蔬菜,2011,2:73-77.
- [10] YANG H, LI Y, ZHAO J, et al. Regulating the composition and secondary structure of wheat protein through canopy shading to improve dough performance and nutritional index [J]. Food Research International, 2023, 173: 113399.
- [11] HE N, PAN Z, LI L, et al. Improving the microstructural and rheological properties of frozen unfermented wheat dough with laccase and ferulic acid [J]. Foods, 2023, 12(14): 2772.
- [12] 李彩霞,刘玉环,焦扬,等.35%马铃薯全粉方便面生产工艺优化[J].食品科技,2019,44(11):192-200.
- [13] 黄丽.绿豆-小麦混合粉的物性及绿豆方便面的研发[D].武汉:华中农业大学,2013.
- [14] 牛新奎,韩小贤,郑学玲.黑小麦粉的抗氧化成分及活性[J].现代食品科技,2022,38(9):292-297.
- [15] GUO W, FAN L, WANG Y, et al. Effect of three natural antioxidants on the structure and physicochemical properties of sweet potato starch noodles [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1020281.
- [16] MEI Y, GAN C, CHEN F, et al. Study on the impact of chitin derivatives on the quality of pre-cooked wet alkaline noodles and antioxidant browning [J]. LWT, 2024, 204: 116440.
- [17] 刘慧瑶,陈洁,汪磊,等.鹰嘴豆粉对非油炸方便面的品质及消化特性的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2024,45(2):74-82.
- [18] 陈芸,李江涛,赵思明,等.籼米凝胶的应力松弛特性研究[J].中国粮油学报,2014,29(12):1-4,11.
- [19] 王丽霞.魔芋葡甘聚糖分子修饰与功能相关性研究[D].福州:福建农林大学,2013.
- [20] 贺子婕.添加亲水性胶体对荞麦无麸质面团流变学特性的影响[D].西安:西北农林科技大学,2022.
- [21] BHATTACHARYA S. Stress relaxation behaviour of moth bean flour dough: product characteristics and suitability of model [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(4): 539-546.
- [22] 娄雪琪.天然菊粉对冷冻面团及馒头品质的影响[D].洛阳:河南科技大学,2022.
- [23] 曹莼.常用改良剂对鲜湿面品质的影响[D].郑州:河南工业大学,2019.
- [24] LIU J, LUO D, LI X, et al. Effects of inulin on the structure and emulsifying properties of protein components in dough [J]. Food Chemistry, 2016, 210: 235-241.
- [25] 汪磊.燕麦 β -葡聚糖对面粉、面团特性及馒头品质的影响和机制[D].重庆:西南大学,2018.
- [26] 冯佳.魔芋葡甘聚糖对小麦面团性质和结构的影响[D].天津:天津科技大学,2019.
- [27] 张淑仪,许祥,张林华,等.高直链玉米淀粉添加对挤压荞麦面条结构、蒸煮品质及消化特性的影响[J].食品科学,2023,44(6):116-124.
- [28] 薛超强.低升糖指数苦荞挂面的研制及品质改良[D].无锡:江南大学,2023.
- [29] 高文倩.大麦 β -葡聚糖对发酵面制品品质影响机制的研究[D].郑州:河南农业大学,2019.
- [30] ZHANG L, CHEN J, XU F, et al. Effect of tremella fuciformis and different hydrocolloids on the quality characteristics of wheat noodles [J]. Foods, 2022, 11(17): 2617.
- [31] 胡志远,刘翀,郑学玲.不同多糖对发酵空心挂面品质的影响[J].现代食品科技,2022,38(5):226-234.
- [32] LI C, HUANG Q, FU X, et al. Characterization, antioxidant and immunomodulatory activities of polysaccharides from *Prunella vulgaris* Linn [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 75: 298-305.
- [33] SINTHUSAMRAN S, BENJAKUL S. Physical, rheological and antioxidant properties of gelatin gel as affected by the incorporation of β -glucan [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 409-415.
- [34] ESMAEILI F, HASHEMIRAVAN M, ESHAGHI M R, et al. Optimization of aqueous extraction conditions of inulin from the *Arctium lappa* L. roots using ultrasonic irradiation frequency [J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021(1): 5520996.
- [35] SRIKAEK K, ARRANZ-MARTÍNEZ P. Formulating low glycaemic index rice flour to be used as a functional ingredient [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 61: 33-40.