孙佳鹏, 刘艳香, 谭斌, 等. 不同地区糙米对方便面皮淀粉特性及品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 25−33. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020074

SUN Jiapeng, LIU Yanxiang, TAN Bin, et al. Effects of Brown Rice in Different Regions on Starch Characteristics and Quality of Instant Noodle Sheets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 25−33. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020074

·特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康（客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡）·

不同地区糙米对方便面皮淀粉特性及品质的影响

孙佳鹏[1,2], 刘艳香[1], 谭　斌[1], 贾书盈[1], 康子悦[1], 刘　明[1,*], 于国萍[2,3,*]

（1.国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037;
2.东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;
3.黑龙江东方学院食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150066）

摘　要: 为探究不同地区糙米对方便面皮（Instant Noodle Sheet，NS）淀粉特性及其食用品质的影响，本研究以精制小麦粉（refined wheat flour，FD）与 6 种不同地区糙米粉按 3:1 比例复配，经挤压加工制作方便面皮。利用傅里叶变换红外光谱（Fourier Transform Infrared Spectroscopy，FTIR）、差示扫描量热仪（Differential Scanning Calorimetry，DSC）和 X 射线衍射仪（X-ray Diffractometer，XRD）等分析淀粉的结构差异；利用扫描电子显微镜（scanning electron microscopy，SEM）观察 NS 的微观结构，通过测定 NS 的复水与消化特性对其品质进行分析。结果表明：糙米的添加使 NS 中膳食纤维含量显著（P<0.05）增加（1.26%~1.78%），而总淀粉、直链淀粉和蛋白质含量降低（61.50%~71.43%、8.64%~23.67%、8.73%~10.83%）。NS 淀粉呈 V 型晶体结构；吉林-面皮（Jilin-Instant Noodle Sheet，YZ-NS）和湖北-面皮（Hubei-Instant Noodle Sheet，HB-NS）因高直链淀粉（23.67%、19.90%）及适宜脂质结合能力，结晶度随之增大（26.16%、20.61%），其微观结构更加致密。江苏-面皮（Jiangsu-Instant Noodle Sheet，JS-NS）因膳食纤维含量最高（1.78%），淀粉凝胶结构较疏松，缩短了样品的复水时间（3.20 min），但断条率最高（19.50%）；而 YZ-NS 复水损失率为 8.17%、断条率为 13.75%，品质较好。消化结果显示，YZ-NS 因较高的结晶度（26.16%）和 V 型复合物的形成，体外消化率最低，而小麦粉-面皮（FD-NS）因高直链淀粉（37.72%）和低膳食纤维含量（0.67%），导致消化率最高（85%）。综上，糙米添加通过改变淀粉-脂质复合物及膳食纤维分布，从而影响淀粉特性及 NS 的食用品质。其中，YZ-NS 表现出较优的复水品质和低消化特性，为营养型方便面皮开发提供理论依据。

关键词: 方便面皮, 复配面粉, 淀粉特性, 食用品质
中图分类号: TS217.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0025−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020074
本文网刊:

Effects of Brown Rice in Different Regions on Starch Characteristics and Quality of Instant Noodle Sheets

SUN Jiapeng[1,2], LIU Yanxiang[1], TAN Bin[1], JIA Shuying[1], KANG Ziyue[1], LIU Ming[1,*], YU Guoping[2,3,*]

（1.Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;
2.College of Food, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
3.College of Food Engineering, Heilongjiang Oriental University, Harbin 150066, China）

收稿日期: 2025−02−12
基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目（2021YFD2100201）。
作者简介: 孙佳鹏（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 健康全谷物加工, E-mail: sjp192419@163.com。
*** 通信作者:** 刘明（1980−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粮食加工物理改性研究, E-mail: lm@ags.ac.cn。
于国萍（1963−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 粮食、油脂及蛋白质工程, E-mail: yuguopingneau@hotmail.com。

Abstract: To explore the effects of brown rice from different regions on starch properties and eating quality of instant noodle sheets (NS), refined wheat flour (FD) was blended with six types of brown rice flour from different regions at a ratio of 25%, and the mixtures were processed into instant noodle sheets by extrusion. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), and X-ray diffraction (XRD) were used to analyze the structural differences in starch. Microstructure of NS was observed using scanning electron microscopy (SEM), and quality of NS was evaluated by measuring its rehydration and digestion properties. The results showed that brown rice addition significantly increased the dietary fiber content in NS (1.26%~1.78%), while reducing the contents of total starch, amylose, and protein (61.50%~71.43%, 8.64%~23.67%, and 8.73%~10.83%, respectively). Starch in NS exhibited a V-type crystal structure. Owing to the high amylose content (23.67% and 19.90%) and suitable lipid-binding abilities, the Jilin-Instant Noodle Sheets (YZ-NS) and Hubei - Instant Noodle Sheets (HB-NS) had increased crystallinity (26.16% and 20.61%, respectively) and denser microstructures. The Jiangsu-Instant Noodle Sheet (JS–NS) had the highest dietary fiber content (1.78%), resulting in a looser starch gel structure, which shortened the sample rehydration time (3.20 min), but it resulted in the highest broken noodle rate (19.50%). In contrast, YZ-NS had a rehydration loss rate of 8.17% and broken noodle rate of 13.75%, indicating better quality. The digestion results showed that YZ-NS had the lowest *in vitro* digestibility due to its high crystallinity (26.16%) and V-type complexes formation, whereas wheat flour-Instant Noodle Sheet (FD–NS) had the highest digestibility (85%) owing to its high amylose content (37.72%) and low dietary fiber content (0.67%). In conclusion, the addition of brown rice affects the starch properties and eating quality of NS by changing the distribution of starch-lipid complexes and dietary fiber. Among them, YZ-NS exhibited the best rehydration quality and lowest digestibility, providing a theoretical basis for the development of nutritious instant noodle sheets.

Key words: instant noodle sheet; compound flour; starch properties; food quality

随着现代生活节奏的加快，方便食品因其便捷性和长保质期成为消费者日常饮食的重要组成部分。方便面皮凭借其便捷性占据了一定的市场份额，但其原料主要依赖于精制的小麦粉，其在加工过程中损失了大量膳食纤维、维生素及矿物质，长期摄入可能导致营养失衡和增加慢性疾病的风险[1]。随着人们对营养健康的进一步需求，全谷物原料因其天然的营养优势备受关注，其中糙米作为典型的全谷物，富含膳食纤维、γ-氨基丁酸及抗氧化成分，具有调节血糖、改善肠道健康等潜在功能[2]。将糙米粉和小麦粉进行复配加工方便面皮，不仅能提升产品的营养价值，满足人们对营养的需求，还能提升方便面皮产品的丰富度，目前已经成为研究的热点。

挤压加工技术由于其具有节能高效的优点，而被广泛利用于方便食品的加工与生产。其通过高温、高压和高剪切力的作用，淀粉发生糊化、蛋白质变性及分子重组，并赋予产品新的特性[3−4]。研究表明，糙米的添加会显著改变复配面粉的理化性质和加工特性，糙米中高含量的膳食纤维会破坏面筋网络结构，影响产品的食用品质[5]。糙米淀粉与脂质的相互作用会形成抗消化的淀粉-脂质复合物，从而改变产品的消化特性和人们肠道菌群的丰富度[6]。不同产地的糙米因遗传背景及生长环境差异，其淀粉组成、蛋白质含量及脂质特性存在显著区别[7]，这可能导致最终产品品质参差不齐。目前，研究大多集中于传统鲜面皮的制作和改良，而对不同来源糙米制作的方便面皮淀粉特性和食用品质尚缺乏系统研究。

因此，本研究为探究不同地区糙米的添加对方便面皮淀粉特性和食用品质的影响，采用傅里叶变换红外光谱（FTIR）、差示扫描量热仪（DSC）和 X-射线衍射（XRD）对不同方便面皮的淀粉特性进行表征。采用复水特性、消化特性等指标，系统分析不同样品的食用品质，并探讨其与淀粉结构变化的关联，为提高方便面皮品质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

精制小麦面粉（发达 FD） 发达面粉集团股份有限公司；不同地区的糙米（江西 ZX、湖南 NM、黑龙江 CL、吉林 YZ、江苏 JS、湖北 HB） 北京斯恩赛尔生物科技有限公司；淀粉试剂盒、直链淀粉试剂盒、总膳食纤维试剂盒 爱尔兰 Megazyme 公司；葡萄糖含量检测试剂盒 北京盒子生工科技有限公司；淀粉葡糖苷酶（10 万 U/mL）、α-淀粉酶（30 U/mg） 上海麦克林生化科技有限公司；所有其他化学品均为分析纯。

DLG-100 单螺杆挤压机 济南赛百诺；DSC214 差示扫描量热仪 德国耐驰公司；Rapid N cxccod 蛋白分析仪 德国 Elementar 公司；FOSS 1023 膳食纤维测定仪 丹麦 FOSS 公司；JSM-IT700HR 扫描电子显微镜 日本电子株式会社；Nicolet iN10-iZ10 傅里叶变换红外光谱仪 美国赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 复配面粉的制备 糙米由旋风式磨粉机研磨并通过 80 目筛网，将 FD 与 6 种不同地区糙米粉按 3∶1 的比例混合复配，形成 6 种复配面粉（江西复配粉 ZX-F、湖南复配粉 NM-F、黑龙江复配粉 CL-F、吉林复配粉 YZ-F、江苏复配粉 JS-F、湖北复配粉 HB-F）。

1.2.2 复配面粉的基本组分 淀粉含量：采用 Megazyme 试剂盒测定；蛋白含量：采用 GB 5009.5-2016

第三法测定；直链淀粉含量：采用 Megazyme 试剂盒测定；总膳食纤维：采用 Megazyme 膳食纤维试剂盒测定。

1.2.3　方便面皮的制备　参考 LS/T 3272-2023《面皮》和张淑仪等[8] 方法并适当修改。将对照组精制小麦面粉 FD 和 6 种复配面粉水分含量调节到 30%，采用单螺杆挤压机制作挤压方便面皮。螺杆长度（L）300 cm，螺杆直径（D）10 cm，得到 30∶1 的 L/D 比。挤压机的筒体由三个加热/冷却部分构成，筒体的温度设置为 110、140、120 ℃。复配面粉进入挤压机的喂料速率为 400 g/min，螺杆转速为 20 r/min。修剪和挂杆晾晒 12 h 后，得到 7 种方便面皮（江西-面皮 ZX-NS、湖南-面皮 NM-NS、黑龙江-面皮 CL-NS、吉林-面皮 YZ-NS、江苏-面皮 JS-NS、湖北-面皮 HB-NS）。取出一部分方便面皮（NS）密封保存，剩下部分磨粉并过 80 目筛，4 ℃ 保存备用。

1.2.4　方便面皮淀粉特性的测定

1.2.4.1　糊化度和热特性的测定　参考 Mu 等[9] 的方法对方便面皮的糊化度及热特性进行测定。每 3 mg 样品与 9 μL 去离子水混合，包封在铝锅中。测试时使用一个空白的铝制 DSC 坩埚作为对照，扫描温度从 25 ℃ 上升到 120 ℃，升温速度为 10 ℃/min。保护气为氮气，流速为 20 mL/min，每个样品平行测定三次。记录凝胶化焓（ΔH）和峰值温度（Tp），糊化度的计算公式如下。

$$\text{糊化度(DG,\%)} = 1 - \frac{\Delta H_c}{\Delta H_0}$$

其中，ΔH_c 为不同方便面皮的糊化焓；ΔH_0 为不同复配面粉的糊化焓。

1.2.4.2　XRD 的测定　利用 X 射线衍射仪研究方便面皮中淀粉的晶体结构[10]。将方便面皮研磨过 80 目筛。随后，在 5°~40°（2θ）范围内以 5°/min 的扫描速率进行 X 射线衍射扫描。使用 MDI Jade 6.5 软件分析相对结晶度。

1.2.4.3　FTIR 的测定　按照 Hong 等[11] 的方法，采用 FTIR 测定方便面皮的短程有序性。将样品粉末与 KBr 按 1∶100 质量比例进行混匀，压制成圆片状半透明薄片。在 4000~400 cm^{-1} 波长、分辨率 4 cm^{-1}、扫描频率 32 次的条件下进行实验。采用 Omnic 软件分析。

1.2.4.4　微观结构的测定　使用 SEM 观察方便面皮截面结构。将方便面皮用导电胶固定到载物台上，喷金 90 s，在扫描电镜下用 5 kV 的加速电压，放大 600 倍观察面皮截面结构。

1.2.5　方便面皮品质特性的测定

1.2.5.1　复水特性的测定　根据 Yu 等[12] 的方法对方便面皮的复水特性进行测定并略作修改。取 20 根方便面皮（m_1）在 400 mL 的沸水中浸泡。方便面皮白色硬核消失的时间为最佳的浸泡时间。并在此时将方便面皮取出吸水后称重（m_2），并记录断条数（N）。然后将方便面皮置于 105 ℃ 的烤箱中，直到达到恒重（m_3）。复水率、复水损失率和断条率计算公式如下：

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

$$\text{复水损失率(\%)} = \frac{m_1(1-w) - m_3}{m_1(1-w)} \times 100$$

$$\text{断条率(\%)} = \frac{N}{20} \times 100$$

式中：w为方便面皮的水分含量，%。

1.2.5.2　消化特性的测定　方便面皮的体外消化率参考 Dhital 等[13] 提出的方法为基础稍作修改。消化酶溶液配制：6 g α-淀粉酶加入到 40 mL 去离子水中，磁力搅拌 10 min，之后 10000×g 下离心 10 min。取 30 mL 上清液，加入 2 mL 淀粉葡糖苷酶和 3 mL 去离子水，混匀备用（即配即用）。

将方便面皮研磨并过 100 目筛。取 25 mg，加入 6 mL KOH 溶液（2 mol/L），于 25 ℃ 振荡 30 min。然后分别加入 1 mL 醋酸（98%）、3 mL 醋酸钠缓冲溶液（0.4 mol/L，pH=4.75）和 60 μL 淀粉葡糖苷酶，摇匀后于 60 ℃ 水浴中磁力搅拌 45 min。溶液中葡萄糖含量使用葡萄糖含量检测试剂盒测定，根据 0.9 的转化因子转换成总淀粉的含量[14]。

取研磨后的粉末样品 500 mg 并加入 14 mL 去离子水，沸水浴加热 5 min，之后冰水浴快速冷却至 37 ℃。温度降至 37 ℃ 后，溶液中加入 1 mL 消化酶溶液，摇匀，在 37 ℃ 恒温水浴条件下保持磁力搅拌。在消化 20、60、120、180、240 min 时分别取 0.2 mL 溶液，加入到 5 mL 80% 乙醇，混匀。混合溶液的葡萄糖含量使用葡萄糖含量检测试剂盒测定，根据 0.9 的转化因子转换成已消化淀粉的含量。淀粉含量（g/kg）及消化率计算公式如下：

$$\text{淀粉含量} = \text{葡萄糖含量} \times 0.9$$

$$\text{淀粉消化率(\%)} = \frac{\text{已消化的淀粉含量}}{\text{总淀粉含量}} \times 100$$

1.3　数据处理

所有实验均重复 3 次。使用 Origin2024 软件绘图，使用 SPSS27 软件进行方差分析处理实验数据。实验结果以 $\bar{x}\pm s$ 表示，$P<0.05$ 表示样品结果之间存在显著差异。

2　结果与分析

2.1　复配面粉的基本组分

淀粉、蛋白、膳食纤维等含量直接决定了复配面粉的理化特性，进而影响方便面皮的食用品质[15]。不同复配面粉的基本组分如表 1 所示，除膳食纤维含量显著增加外（$P<0.05$），其他组分都有不同程度的下降。淀粉含量方面，FD 的淀粉含量最高，达到 73.35%±6.22%，JS-F 淀粉的含量最低，为 61.50%±

表 1 不同复配面粉基本组分

Table 1 Different compound flour basic components

种类	淀粉含量（%）	直链淀粉含量（%）	蛋白含量（%）	膳食纤维含量（%）
FD	73.35±6.22^{a}	37.72±1.02^{a}	12.06±0.09^{a}	0.67±0.02^{d}
ZX-F	68.81±0.17^{b}	22.01±1.84^{bc}	9.17±0.40^{de}	1.67±0.33^{abc}
NM-F	71.43±0.10^{b}	8.64±1.68^{e}	9.87±0.06^{cd}	1.41±0.02^{abc}
CL-F	69.01±0.35^{b}	21.64±1.86^{bc}	9.22±0.03^{de}	1.26±0.16^{c}
YZ-F	70.70±0.6^{b}	23.67±0.38^{b}	10.83±1.28^{b}	1.45±0.10^{abc}
JS-F	61.50±0.08^{d}	14.96±0.64^{d}	10.42±0.04^{bc}	1.78±0.05^{abc}
HB-F	65.07±2.45^{c}	19.90±1.98^{c}	8.73±0.13^{e}	1.34±0.17^{bc}

注：同列不同字母表示数据有显著性差异（P<0.05）；表2~表6同。

0.08%。糙米的添加降低了复配面粉的总淀粉含量，直链淀粉含量也有显著降低（P<0.05），品种和种植环境都会对糙米淀粉的组成有影响[16]。例如 NM-F 直链淀粉含量为 8.64%±1.68%。这表明糙米的添加不仅影响了淀粉的总量，还改变了淀粉的结构，降低了直链淀粉的比例。直链淀粉含量降低会影响面粉的特性，从而改变其加工性能[17]。在蛋白含量方面，FD 的蛋白含量最高，为 12.06%±0.09%，而复配面粉的蛋白含量则有所下降，这是由于品种和种植环境不同造成的[16]。膳食纤维含量在复配面粉中有所增加，表明糙米作为一种全谷物原料，能显著提高面粉的膳食纤维含量（P<0.05）。总体来说，添加糙米后，引起膳食纤维含量的上升，淀粉、直链淀粉和蛋白含量的下降。

2.2 方便面皮淀粉特性的测定

2.2.1 糊化度和热特性的测定 淀粉糊化温度的改变意味着淀粉颗粒结晶结构发生了变化，糊化焓可以用来描述破坏淀粉双螺旋结构所需要的能量。一般地，淀粉颗粒的结晶度越高，糊化温度就越高[18]。如表 2 所示，复配面粉的焓值范围在 2.55~4.38 J/g，且添加了糙米后复配面粉的焓值有不同程度的下降，对照组 FD-F 的焓值显著（P<0.05）高于实验组，这是因为糙米粉的加入稀释了小麦粉中面筋蛋白的含量，导致糊化过程中的能量需求减少，从而使糊化焓值下降[5]。复配面粉（F）的焓值普遍高于方便面皮（NS），这是因为挤压过程可能会促进淀粉与脂质形成复合物，淀粉-脂质复合物的形成降低了挤出物的糊化焓[19]。

表 2 不同复配面粉及方便面皮的热特性

Table 2 Different combinations of flours and instant noodle sheet properties

种类	F的糊化焓（J/g）	NS的糊化焓（J/g）	NS的糊化度（%）	NS的峰值温度（℃）
FD	4.38±0.02^{a}	1.13±0.26^{a}	74.14±5.91^{ab}	92.67±0.47^{b}
ZX	2.55±0.05^{f}	0.61±0.12^{c}	76.32±4.13^{ab}	96.00±0.50^{a}
NM	2.92±0.08^{e}	0.57±0.13^{c}	81.52±4.80^{a}	95.53±1.76^{a}
CL	3.27±0.14^{c}	1.19±0.06^{a}	64.72±3.09^{c}	93.00±0.75^{b}
YZ	3.46±0.06^{b}	0.69±0.11^{bc}	80.07±2.93^{a}	95.93±0.21^{a}
JS	3.05±0.02^{d}	0.97±0.20^{ab}	68.23±6.27^{bc}	92.57±1.40^{b}
HB	3.06±0.02^{d}	0.70±0.12^{bc}	77.26±4.21^{a}	96.30±0.17^{a}

糊化度方面，YZ-NS、NM-NS 较高，在加工中表现出良好的水化能力，而 CL-NS 的糊化度最低，可能由于 CL 品种糙米中较高的非淀粉成分（如蛋白质和脂肪）与淀粉分子形成了复合物，阻碍了水化过程[20]，进而导致糊化度降低。方便面皮的峰值温度集中在 92.57~96.30 ℃，但陈季旺等[21] 研究挤压生产燕麦方便面的焓值低于本研究结果，这是因为样品的峰值温度会随着挤压温度的升高而升高[22]。CL-NS 和 JS-NS 的峰值温度没有显著区别，而其他实验组均显著高于 FD-NS，这可能是由于添加不同的糙米后，改变了复配面粉的吸水性，进而影响了峰值温度。

2.2.2 淀粉短程有序性分析 XRD 谱图可以反映淀粉糊化后分子排列的有序程度[23]。相对结晶度（R_C）越大，有序程度越高[24]。图 1 显示，添加不同地区糙米的方便面皮在 2θ=12.9°和 19.8°处存在明显的吸收峰，这表明样品中形成了典型的 V 型晶体结构。该结构的形成主要归因于直链淀粉与脂质分子间的相互作用，生成了稳定的淀粉-脂质复合物[12]。结合表 1 中原料的基本组成数据分析，不同样品 R_C 差异与直链淀粉含量、膳食纤维及蛋白质的综合作用有密切的关系，直链淀粉作为 V 型晶体形成的基础，其含量直接决定了晶体区域的比例[25−27]。如表 3 所示，YZ-NS 和 HB-NS 样品的直链淀粉含量较高（23.67%、19.90%），且米糠中的脂质更适宜结合[28]，表现出较高的 R_C（26.16%、20.61%）。此外，可能 YZ-NS 和 HB-NS 的脂质饱和程度较高，碳链较短，减少了位阻效应，从而促进了淀粉与脂质的有效结合[20]。相较之下，JS-NS 样品的 R_C 较低（14.32%），

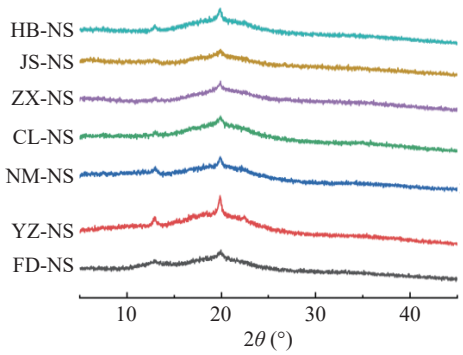


图 1 不同方便面皮的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of different instant noodle sheet

表 3 不同方便面皮的结晶度

Table 3 Crystallinity of different instant noodle sheets

种类	结晶度（%）
FD-NS	14.43±0.84^{e}
YZ-NS	26.16±0.61^{a}
NM-NS	17.26±0.63^{c}
CL-NS	16.19±0.72^{cd}
ZX-NS	15.66±0.03^{d}
JS-NS	14.32±0.43^{e}
HB-NS	20.61±0.73^{b}

可能是由于支链淀粉的高度分支结构限制了直链淀粉的有序排列[29]，同时其高膳食纤维含量（1.78%）增加了体系中的非晶区比例，进一步削弱了晶体结构的有序性[30]。同样，ZX-NS、NM-NS 和 CL-NS 样品较低的 R_C 也与脂质不饱和键含量较高有关，不饱和键的存在导致脂质与淀粉络合作用下降[31]。虽然 FD 样品中直链淀粉含量最高（37.72%），但其蛋白质含量也显著偏高（12.06%），蛋白质可能通过与淀粉分子竞争和脂质结合的位点，从而干扰了晶体结构的形成[32]。Li 等[33] 在以大米淀粉-脂质复合物为对象的研究中也发现了相同的现象。

2.2.3　FTIR 分析　红外光谱吸收峰的强度与分子中相应化学键或基团的含量、振动的偶极矩变化等因素有关[34]。不同方便面皮的红外图谱如图 2 所示，所有的特征峰出现相似的光谱没有生成新的特征峰。表明不同地区糙米的添加不会导致方便面皮的化学变化，仅涉及氢键淀粉链的重新组装，此过程中没有形成新的官能团[35]。特征峰分别在 3395 cm^{-1} 和 2932 cm^{-1} 处，对应于 O-H 和 C-H 键的振动[36]。这表明淀粉和脂质之间的结合机制可能归因于氢键和/或疏水相互作用[37]。

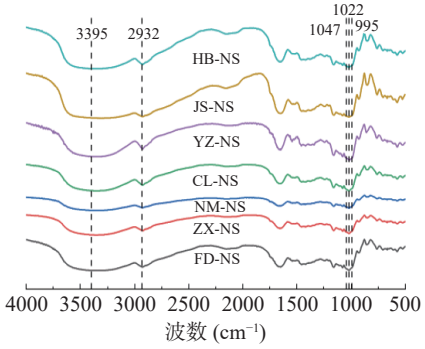


图 2　不同方便面皮的红外光谱图

Fig.2　Infrared spectra of different instant noodle sheet

为揭示不同方便面皮中淀粉分子结构的短程有序性和双螺旋结构的特性，对红外结果进行去卷积处理，995 cm^{-1} 和 1047 cm^{-1} 处的吸收带被证明与淀粉聚合物的分子有序性和结晶度有关，1022 cm^{-1} 处的吸收带与无定形结构有关，$R_{1047/1022}$ 和 $R_{995/1022}$ 分别代表淀粉分子的有序度（Degree of Order，DO）和双螺旋度（Degree of Duplexity，DD）[38−39]。不同淀粉样品的短程有序性结果如表 4 所示。所有样品 DO 值分布在 0.92~1.23 之间，其中有序度最高的为 YZ-NS，最低的为 JS-NS。这一现象可归因于 YZ-NS 直链淀粉与脂质分子强烈的相互作用，形成了稳定的 V 型复合物，导致淀粉分子晶体区域显著高于其他样品（P<0.05）[40]。这与 Aleixandre 等[41] 研究中脂质促进淀粉短程有序结构形成的机制一致。所有样品 DD 值分布在 0.95~1.08 之间，其中 DD 值最高的为 ZX-NS，最低的为 YZ-NS，这可能是由于 YZ-NS 中脂质不饱和键存在较多，增加了分子位阻效应，抑制了淀粉与脂质的进一步络合作用，从而限制了晶体区域的形成[42]。

表 4　不同方便面皮的去卷积结果

Table 4　Deconvolution results of different instant noodle sheet

种类	$R_{1047/1022}$	$R_{1022/995}$
FD-NS	0.94±0.00^{e}	1.06±0.00^{b}
ZX-NS	0.95±0.00^{d}	1.08±0.00^{a}
NM-NS	0.97±0.00^{c}	1.06±0.00^{b}
CL-NS	0.95±0.00^{d}	1.06±0.00^{b}
YZ-NS	1.23±0.00^{a}	0.95±0.00^{e}
JS-NS	0.92±0.00^{f}	1.05±0.00^{d}
HB-NS	0.98±0.00^{b}	1.06±0.00^{c}

2.2.4　SEM 分析　方便面皮的微观结构可以直观的反应淀粉凝胶的状态[41]。采用 SEM 在 600 倍下观察方便面皮的截面微观结构。由图 3 所示，FD-NS、YZ-NS、HB-NS 样品较为光滑和致密。其中，对照组样品由于未受到膳食纤维的破坏，其结构最为致密[43]。除 FD 外，YZ-NS 和 HB-NS 样品的截面显示出更加致密和光滑的结构，这与其较高的直链淀粉含量（23.67% 和 19.90%）和结晶度（26.16% 和 20.61%）有关。Obadi 等[44] 在以高直链玉米淀粉为研究对象时发现，随着直链淀粉含量增加，淀粉凝胶的结晶度提高，凝胶网络结构更加致密。直链淀粉在加工过程中与脂质形成稳定的 V 型复合物，增强了分子间的相互作用，使面皮具有更好的结构完整性。致密的微观结构有助于提高样品的热稳定性和复水性能。JS-NS 样品的微观结构显示出更多的孔洞和裂纹，可能是其膳食纤维含量较高（1.78%），可能破坏了淀粉凝胶的均匀性，限制了 V 型复合物的形成。这种疏松的微观结构不仅影响复水性能，还可能导致较低的质构硬度。ZX-NS 和 CL-NS 样品的结构处于中间状态，显示一定程度的致密性但存在局部裂纹。这可能与其中等的直链淀粉含量（22.01% 和 21.64%）和脂质结合能力有关。不饱和脂质的存在增加了位阻效应，抑制了淀粉与脂质的复合，导致结构完整性下降[45]。

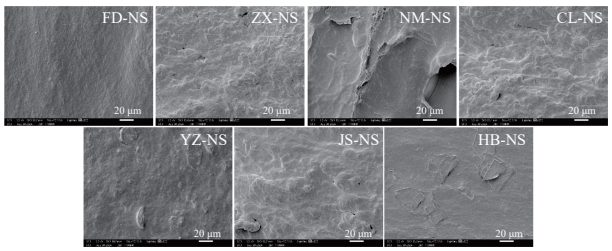


图 3　不同方便面皮截面微观结构图（600×）

Fig.3　Microstructure of different instant noodle sheet sections (600×)

2.3　方便面皮品质特性的测定

2.3.1　复水特性的测定　复水时间和吸水率是方便面皮复水性能的重要指标[46]。由表 5 可知，不同样品的复水时间存在显著差异（P<0.05），其范围为 3.20±

表 5 不同方便面皮的复水特性

Table 5 Rehydration characteristics of different instant noodle sheet

种类	最佳复水时间(min)	吸水率(%)	复水损失率(%)	断条率(%)
FD-NS	4.00±0.03^{e}	160.23±0.76^{a}	7.41±0.38^{c}	11.50±2.12^{c}
ZX-NS	4.41±0.02^{c}	149.05±4.50^{ab}	9.87±0.95^{abc}	15.50±1.41^{abc}
NM-NS	3.61±0.02^{f}	141.02±6.69^{bc}	11.39±0.88^{a}	17.25±1.06^{ab}
CL-NS	4.22±0.01^{d}	138.99±4.33^{bc}	10.38±0.48^{ab}	16.50±0.00^{ab}
YZ-NS	5.21±0.02^{a}	156.00±5.83^{ab}	8.17±0.30^{bc}	13.75±1.06^{bc}
JS-NS	3.20±0.01^{g}	123.59±4.63^{c}	12.25±0.91^{a}	19.50±0.00^{a}
HB-NS	4.80±0.02^{b}	144.12±6.23^{ab}	8.59±0.78^{bc}	13.75±1.06^{bc}

0.01 min(JS-NS)~5.21±0.02 min(YZ-NS)。YZ-NS 样品的复水时间最长,其吸水率也较高(156.00%),表明其复水过程中水分渗透缓慢但吸水能力较强。这可能与其高直链淀粉含量和较致密的晶体结构有关。高直链淀粉含量促进淀粉与脂质形成稳定的 V 型复合物,从而增强晶体区比例,延缓水分扩散速度[47]。JS-NS 样品的复水时间最短(3.2 min),吸水率也最低(123.59%),低吸水率可能源于其高膳食纤维和支链淀粉含量,高纤维含量增加了非晶区比例并破坏分子间的氢键,从而降低了吸水能力[48]。此外,支链淀粉的高度分支结构限制了淀粉与水分子的结合能力,进一步加剧了复水性能的下降[49]。

不同样品的复水损失在 7.41%~12.25% 之间。FD-NS 样品的复水损失率最低,表明其在复水过程中结构最为稳定。这可能由于其为纯小麦面粉组成以及较低的膳食纤维含量(无糙米添加),使得淀粉分子间结合较强,抗溶胀能力较高。相反,JS-NS 样品的复水损失率最高,显示出复水过程中结构松散,可能由于高膳食纤维和较弱的短程有序结构(低 $R_{1047/1022}$ 比值)导致分子间结合力不足[50]。此外,YZ-NS 和 HB-NS 样品的复水损失率分别为 8.17% 和 8.59%,均较低。这与其微观结构的致密性相关,表明高直链淀粉与脂质结合形成的复合物不仅延长了复水时间,还降低了淀粉溶出,与 2.2.3 中其淀粉短程有序度(1.23、0.98)结果相一致[51]。

JS-NS 样品断条率最高(19.50%),而 FD-NS 样品最低(11.50%)。这表明复配糙米后样品的结构完整性有所下降,尤其是 JS-NS,由于高膳食纤维含量和低短程有序结构,其在复水过程中机械性能较差,容易发生断裂。相对而言,添加糙米后,YZ-NS 和 HB-NS 样品表现出较低的断条率(13.75%),显示出较好的结构稳定性。高直链淀粉比例和脂质结合生成的 V 型复合物有助于提高淀粉分子的机械强度,从而降低复水过程中断条的风险[52]。

综上所述,FD-NS 样品表现出最佳的结构稳定性和吸水性能,得益于其纯小麦面粉的组成和低膳食纤维含量。而 YZ-NS 样品尽管复水时间较长,但吸水率和结构稳定性表现突出,断条率低,品质结构较好。

2.3.2 消化特性的测定 消化特性对评估方便面皮营养释放和淀粉凝胶结构有重要的意义[53]。不同样品的消化率随时间变化如表 6 所示。20 min 时,消化率普遍较低,范围在 30%~40% 之间。随着消化时间延长至 60 min,各样品的消化率显著提升,其中 FD-NS 消化率达到 70% 左右,远高于 YZ-NS,而其余样品介于两者之间。到 240 min 时,最终消化率由高到低分别为 FD-NS、NM-NS、CL-NS、HB-NS、ZX-NS、JS-NS、YZ-NS。FD-NS 最终消化率为 85% 左右,而 YZ-NS 的消化率最低。不同样品的直链淀粉含量、脂质复合物形成、膳食纤维含量以及结晶度共同决定了其酶解性能[54]。FD-NS 由于直链淀粉含量最高(37.72%)且膳食纤维含量最低(0.67%),淀粉分子更容易被酶降解,因此具有最快的消化速率。而 YZ-NS 虽然直链淀粉含量较高(23.67%),但与脂质结合形成了大量稳定的 V 型复合物,进一步增强了结晶度(26.16%),显著降低了酶解效率。这些结果与 Hu 等[55] 关于淀粉结晶结构与消化性能的研究一致。HB-NS 和 ZX-NS 样品在消化率上表现出适中的水平。HB-NS 的中等消化性能可能归因于其适量的直链淀粉(19.90%)和中等结晶度(20.61%),既保持了淀粉分子一定程度的稳定性,又

表 6 不同方便面皮的体外消化率(%)

Table 6 *In vitro* digestibility of different instant noodle sheet (%)

种类	20 min	60 min	120 min	180 min	240 min
FD-NS	39.32±1.22^{a}	70.84±1.21^{a}	82.90±1.38^{a}	85.02±1.07^{a}	84.07±1.27^{a}
ZX-NS	34.33±0.96^{bc}	63.44±1.00^{c}	73.12±0.47^{bcd}	75.61±0.11^{c}	75.00±0.13^{cd}
NM-NS	36.69±1.56^{ab}	67.33±0.57^{b}	78.20±0.81^{ab}	79.82±2.09^{b}	81.81±0.31^{ab}
CL-NS	35.02±0.06^{bc}	65.06±0.73^{bc}	78.05±1.10^{ab}	78.64±0.30^{bc}	78.91±1.40^{bc}
YZ-NS	32.09±0.38^{c}	57.00±0.26^{d}	68.38±2.38^{d}	68.85±0.74^{d}	70.10±0.55^{e}
JS-NS	34.18±0.41^{bc}	58.72±1.05^{d}	69.70±1.85^{cd}	70.96±1.05^{d}	71.74±1.87^{de}
HB-NS	33.43±0.64^{bc}	65.28±0.55^{bc}	74.12±1.90^{bc}	77.22±0.76^{bc}	77.17±1.34^{c}

未过度抑制酶解作用。相较之下，JS-NS 的消化率略低于 HB-NS 和 ZX-NS。JS-NS 的高膳食纤维含量（1.78%）显著增加了体系中的非晶区比例，削弱了淀粉分子间的结合力，这不仅限制了酶的作用效率，还导致最终消化率偏低[17]。

3　结论

本文通过对不同方便面皮淀粉特性和品质变化的研究，结果发现：糙米的添加能够通过膳食纤维嵌入与淀粉-脂质复合物形成的双重作用来调控方便面皮的淀粉特性和食用品质。其中，膳食纤维破坏了淀粉凝胶网络的致密性（SEM 孔隙率增加），而直链淀粉与脂质结合生成的 V 型复合物提升了结晶度和短程有序性，并对方便面皮的结构产生补偿效应。YZ-F 因高直链淀粉含量形成了致密的 V 型复合物，其淀粉有序度最大，断条率最低，体外消化率下降。本研究突破单一组分作用范式，提出“膳食纤维-淀粉-脂质三元竞争”机制，确定 YZ 糙米为兼具低 GI 特性与加工适宜性的优选原料，为全谷物方便食品开发提供理论依据。未来还可以通过对糙米进行萌芽、发酵等改性处理，进一步丰富方便面皮的营养属性和风味。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ LIU J, YU L L, WU Y. Bioactive components and health beneficial properties of whole wheat foods[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(46): 12904−12915.

［2］ MIR S A, SHAH M A, BOSCO S J D, et al. A review on nutritional properties, shelf life, health aspects, and consumption of brown rice in comparison with white rice[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(5): 895−903.

［3］ LISIECKA K, WÓJTOWICZ A, GANCARZ M J M. Characteristics of newly developed extruded products supplemented with plants in a form of microwave-expanded snacks[J]. Materials, 2021, 14(11): 2791.

［4］ 冯秋娟, 肖志刚, 郑广钊, 等. 低温加酶挤压玉米淀粉糊化度的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 287−290,294. ［FENG Qiujuan, XIAO Zhigang, ZHENG Guangzhao, et al. Study on the gelatinization of corn starch by enzyme-added extrusion at low temperature[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(8): 287−290,294.］

［5］ 汤晓智, 扈战强, 周剑敏, 等. 糙米粉对小麦面团流变学及饼干品质特性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1567−1576. ［TANG Xiaozhi, HU Zhanqiang, ZHOU Jianmin, et al. Influence of brown rice flour on wheat dough rheological properties and cookie quality characteristics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(8): 1567−1576.］

［6］ LI D, WANG X, WANG J, et al. Structural characterization of different starch–fatty acid complexes and their effects on human intestinal microflora[J]. Food Science, 2023, 88(8): 3562−3576.

［7］ 叶玲旭, 周闲容, 马晓军, 等. 不同品种糙米营养品质与糊化特性分析[J]. 中国食品学报, 2018, 18(2): 280−287. ［YE Lingxu, ZHOU Xianrong, MA Xiaojun, et al. Nutritional quality and pasting properties of different brown rice varieties[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(2): 280−287.］

［8］ 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. ［ZHANG Shuyi, XU Xiang, ZHANG Linhua, et al. Effect of high amylose corn starch on the structure, cooking quality and starch digestibility of extruded buckwheat noodle[J]. Food Science, 2023, 44(6): 116−124.］

［9］ MU T-H, ZHANG M, RAAD L, et al. Effect of α-amylase degradation on physicochemical properties of pre-high hydrostatic pressure-treated potato starch[J]. Multidisciplinary Sciences, 2015, 10(12): e0143620.

［10］ ZHOU J, ZHANG Z, QIAO J, et al. Investigating the effect of different contents of Mung beans on the structure and function of extruded Buckwheat noodle[J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100501.

［11］ HONG T, TAN Z, YANG T, et al. Dynamic behavior of zein-gluten interaction during extruded noodle processing[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109320.

［12］ YU M, ZHANG S, TANG P, et al. Effects of fatty acids and glycerides on the structure, cooking quality, and *in vitro* starch digestibility of extruded buckwheat noodle[J]. Food Research International, 2024, 191: 114713.

［13］ DHITAL S, GIDLEY M J, WARREN F J. Inhibition of α-amylase activity by cellulose: Kinetic analysis and nutritional implications[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 123: 305−312.

［14］ 王昊. 不同加工处理对糙米食用性、消化性和酸败的影响[D]. 杭州：浙江大学, 2020. ［WANG Hao. Effects of different processing treatments on the edibility, digestibility and rancidity of brown rice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.］

［15］ 师俊玲. 蛋白质和淀粉对挂面及方便面品质影响机理研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2001. ［SHI Junling. Study on the influence mechanism of protein and starch on the quality of dried noodle and instant noodle[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2001.］

［16］ 隋勇, 施建斌, 蔡沙, 等. 不同品种糙米营养品质和理化特性比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 37−43. ［SUI Yong, SHI Jianbin, CAI Sha, et al. Comparison of nutritional quality and physicochemical properties of different varieties of brown rice[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 37−43.］

［17］ ROMAN L, JIMÉNEZ-MUNOZ L, JAKOBSEN L M A, et al. The role of amylose content on the structure and rheological properties of pea protein-starch systems during pressurized hydrothermal processing[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110830.

［18］ CHEN X, MA M, LIU X, et al. Multi-scale structure of A- and B-type granules of normal and waxy hull-less barley starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 200: 42−49.

［19］ ANANTHANARAYAN L, GAT Y, KUMAR V, et al. Extruded black gram flour: Partial substitute for improving quality characteristics of Indian traditional snack[J]. Journal of Ethnic Foods, 2018, 5(1): 54−59.

［20］ KRISHNAN V, MONDAL D, BOLLINEDI H, et al. Cooking fat types alter the inherent glycaemic response of niche rice varieties through resistant starch (RS) formation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 1668−1681.

［21］ 陈季旺, 张瑞忠, 余小兵, 等. 燕麦方便面的非膨化挤压生产技术[J]. 食品科学, 2010, 31(8): 20−23. ［CHEN Jiwang,

ZHANG Ruizhong, YU Xiaobing, et al. Non-expansive extrusion processing of instant oat noodle[J]. Food Science, 2010, 31(8): 20−23.]

[22] 章丽琳, 张喻, 张涵予. 挤压膨化参数对马铃薯全粉理化性质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 40−44. [ZHANG Lilin, ZHANG Yu, ZHANG Hanyu. Effects of different extrusion conditions on physicochemical properties of potato powder[J]. Food & Machinery, 2016, 32(12): 40−44.]

[23] AN H, MA Q, ZHANG F, et al. Insight into microstructure evolution during starch retrogradation by infrared and Raman spectroscopy combined with two-dimensional correlation spectroscopy analysis[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109174.

[24] LI Q Q, WANG Y S, CHEN H H, et al. Retardant effect of sodium alginate on the retrogradation properties of normal cornstarch and anti-retrogradation mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 1−9.

[25] 史韬琦, 张晨, 丁文平, 等. 不同品种籼米直链淀粉含量对米线加工特性和品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(19): 33−38,44. [SHI Taoqi, ZHANG Chen, DING Wenping, et al. Effect of amylose content of different varieties of long rices on processing characteristics and quality of rice noodle[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(19): 33−38,44.]

[26] LIU X, LIU S, XI H, et al. Effects of soluble dietary fiber on the crystallinity, pasting, rheological, and morphological properties of corn resistant starch[J]. LWT, 2019, 111: 632−639.

[27] ZHAN Q, YE X, ZHANG Y, et al. Starch granule-associated proteins affect the physicochemical properties of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105504.

[28] RUTTARATTANAMONGKOL K, CHITTRAKORN S, TOCHAMPA W. Rice bran valorization: Oil extraction via extrusion-$SCCO_2$ processing and development of protein hydrolysates from its residue[J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100605.

[29] YAN X, MCCLEMENTS D J, LUO S, et al. Recent advances in the impact of gelatinization degree on starch: Structure, properties and applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 340: 122273.

[30] ZHUANG J, ZHU J, CHEUNG P C K, et al. The physical and chemical interactions between starch and dietary fiber: Their impact on the physicochemical and nutritional properties of starch[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 149: 104566.

[31] 米红波, 苏情, 李政翰, 等. 脂肪酸不饱和度对高直链玉米淀粉-脂肪酸复合物结构和热性能的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 27−32. [MI Hongbo, SU Qing, LI Zhenghan, et al. Effect of unsaturation of fatty acid on structure and stability of high amylose corn starch-fatty acid complex[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 27−32.]

[32] ZHAO X, MEI T, CUI B. Lipids-modified starch: Advances in structural characteristic, physicochemical property, and application[J]. Food Research International, 2024, 197: 115146.

[33] LI L, YANG H, CHI C D, et al. Effect of protein types on structure and digestibility of starch-protein-lipids complexes[J]. LWT, 2020, 134: 110175.

[34] 李良怡, 谭沙, 吴安琪, 等. 物理、酶和酸处理对板栗淀粉结构及理化特性的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(24): 294−303. [LI Liangyi, TAN Sha, WU Anqi, et al. Effects of physical, enzymatic and acid treatments on the structure and physicochemical properties of chestnut starch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(24): 294−303.]

[35] 谢雅曼, 张楠, 潘娟, 等. 改性莲子淀粉多尺度结构与体外消化特性的关系[J]. 现代食品科技, 2024, 40(10): 68−78. [XIE Yaman, ZHANG Nan, PAN Juan, et al. Relationship between multi-scale structure and *in vitro* digestive properties of modified lotus seed starch[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 68−78.]

[36] WANULE D, NAGARE K H, MOULVI S, et al. Extraction and physico-chemical analysis of chitosan from shell of marine crab Scylla serrata[J]. Indian Journal of Applied Research, 2016, 6: 825−828.

[37] KANG X, JIA S, GAO W, et al. The formation of starch-lipid complexes by microwave heating[J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132319.

[38] YANG S, DHITAL S, SHAN C S, et al. Ordered structural changes of retrograded starch gel over long-term storage in wet starch noodle[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 270: 118367.

[39] LIU D, TANG W, XIN Y, et al. Comparison on structure and physicochemical properties of starches from adzuki bean and dolichos bean[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105784.

[40] 侯景瑶, 邢佳悦, 尹绂聿, 等. 挤压处理对玉米粉微观结构及理化特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(10): 217−223. [HOU Jingyao, XING Jiayue, YIN Fuyu, et al. Effect of extrusion treatment on the microstructure and physicochemical properties of corn flour[J]. Food Science, 2024, 45(10): 217−223.]

[41] ALEIXANDRE A, BENAVENT-GIL Y, MOREIRA R, et al. *In vitro* digestibility of gels from different starches: Relationship between kinetic parameters and microstructure[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106909.

[42] FENG Y, CAI Z, HUANG Q, et al. Tailoring starch-lipid complexes for optimized flaxseed oil emulsion stability, antioxidation, and digestion kinetics[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110363.

[43] OZGOREN E, YAPAR A. Physicochemical, microstructure and sensory properties of noodle enriched with pumpkin (*Cucurbita moschata*) powder[J]. Agricultural and Food Sciences, 2022, 52(4): 313−320.

[44] OBADI M, QI Y, XU B. High-amylose maize starch: Structure, properties, modifications and industrial applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 299: 120185.

[45] KRISHNAN V, MONDAL D, THOMAS B, et al. Starch-lipid interaction alters the molecular structure and ultimate starch bioavailability: A comprehensive review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182: 626−638.

[46] 张伟峰, 黄泽华, 王玉坤, 等. 复合菌发酵对非油炸方便面品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 210−216. [ZHANG Weifeng, HUANG Zehua, WANG Yukun, et al. Effect of mixed culture fermentation on the quality of non-fried instant noodle[J]. Food Science, 2024, 45(5): 210−216.]

[47] HOOVER R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 45(3): 253−267.

[48] LI M, LI L, SUN B, et al. Interaction of wheat bran dietary fiber-gluten protein affects dough product: A critical review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 255: 128199.

[49] 韩文芳, 林亲录, 赵思明, 等. 直链淀粉和支链淀粉分子结构研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 267−275. [HAN Wenfang, LIN Qinlu, ZHAO Siming, et al. Recent advances in molecular structures of amylose and amylopectin[J]. Food Science, 2020, 41(13): 267−275.]

［50］ SINGH J, SINGH N. Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(1): 63−72.
［51］ SUN X, MENG L, TANG X. Retrogradation behavior of extruded whole buckwheat noodle: An innovative water pre-cooling retrogradation treatment[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 99: 103234.
［52］ COPELAND L, BLAZEK J, SALMAN H, et al. Form and functionality of starch[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(6): 1527−1534.
［53］ ZHENG M, YE A, SINGH H, et al. The *in vitro* digestion of differently structured starch gels with different amylose contents[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 116: 106647.
［54］ LIU Q, WANG Y, YANG Y, et al. Structure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of extruded starch-lauric acid complexes with different amylose contents[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108239.
［55］ HU W X, CHEN J, ZHAO J W, et al. Effect of the addition of modified starch on gelatinization and gelation properties of rice flour[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 26−35.