

面筋蛋白组分对麻花吸油性的影响

魏亚轩 连喜军 杨 雯 闵建康 赖炎欣 刘天牧 张 睿

(天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300134)

摘要: [目的] 减少麻花中的含油量。[方法] 将 ω -醇溶蛋白、 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白、碱溶麦谷蛋白和尿素溶麦谷蛋白 4 种面筋蛋白组分添加至面团中, 分析添加量、混合温度、油炸温度和油炸时间对麻花吸油性的影响; 进一步通过傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)、 ^{13}C 固体核磁共振 (^{13}C solid-state NMR) 和 X 射线衍射 (XRD) 探讨面筋蛋白组分减少麻花含油量的机制。[结果] 添加单一蛋白可在适宜条件下显著降低麻花含油量, 其中添加尿素溶麦谷蛋白的降幅最大。当尿素溶麦谷蛋白添加量为 4%、醒发温度为 45 °C、油炸温度为 160 °C、油炸时间为 8 min 时, 含油量由对照组的 20.51% 降至 9.20%; 复配试验中, 当 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白与碱溶麦谷蛋白质量比为 8:2、总添加量为 8% 时, 含油量最低达 8.91%。FT-IR 和 ^{13}C solid-state NMR 分析表明, 添加 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白和碱溶麦谷蛋白可促使麻花中淀粉 C6 羟基和蛋白酰胺键氧之间形成氢键, 改变蛋白和淀粉空间结构, 增强麻花原有蛋白的水合作用, 阻碍麻花冷却过程中油脂的渗入。XRD 结果显示, 添加蛋白后麻花晶型未发生改变 (2θ 约为 20°), 含油量最低组麻花的结晶度最低。[结论] 添加 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白和碱溶麦谷蛋白混合物可有效降低麻花中的含油量。

关键词: 面筋蛋白; 吸油性; 降油机制; 油炸; 麻花; 麦谷蛋白; 醇溶蛋白

Effect of gluten protein fractions on oil uptake of fried Mahua

Wei Yaxuan Lian Xijun Yang Wen Min Jiankang Lai Yanxin Liu Tianmu Zhang Rui

(School of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: [Objective] To reduce the oil content in fried Mahua. [Methods] Four gluten protein fractions, including ω -gliadin, $\alpha\beta\gamma$ -gliadin, alkali-soluble glutenin, and urea-soluble glutenin, are incorporated into the dough. The effects of protein addition amounts, mixing temperatures, frying temperatures and frying time on oil uptake are systematically investigated. Furthermore, the underlying mechanisms by which these protein fractions reduce oil content are explored using Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), ^{13}C solid-state nuclear magnetic resonance (^{13}C solid-state NMR), X-ray diffraction (XRD), and differential scanning calorimetry (DSC). [Results] The addition of individual protein fractions significantly reduces the oil content of Mahua under appropriate conditions, with urea-soluble glutenin exhibiting the greatest reduction. Under optimal conditions for urea-soluble glutenin (addition level of 4%, mixing temperature of 45 °C, frying temperature of 160 °C, and frying time of 8 min), the oil content of Mahua decreases from 20.51% in the control group to 9.20%. In the combination test, the minimum oil content of 8.91% is achieved with a mass ratio of $\alpha\beta\gamma$ -gliadin to alkali-soluble glutenin of 8:2 and a total protein addition level of 8%. FT-IR and ^{13}C solid-state NMR analyses indicate that the addition of $\alpha\beta\gamma$ -gliadin and alkali-soluble glutenin may promote the formation of hydrogen bonds between the C6 hydroxyl groups of starch and the amide oxygen atoms of proteins, thereby altering the spatial structures of both proteins and starch, enhancing the hydration capacity of endogenous proteins, and impeding oil penetration during the cooling process. XRD results show that protein supplementation does not change the crystal form of Mahua (with a characteristic peak at $2\theta \approx 20^\circ$), and the sample with the lowest oil content exhibits the lowest crystallinity. [Conclusion] The combined addition of $\alpha\beta\gamma$ -gliadin and alkali-soluble glutenin effectively reduces the oil content of fried Mahua.

Keywords: gluten protein; oil uptake; oil-reduction mechanism; fried; Mahua; glutenin; gliadin

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 31571834); 国家大学生创新创业训练计划 (编号: 202510069310)

通信作者: 连喜军 (1972—), 男, 天津商业大学教授, 博士。E-mail: lianxijun@tjcu.edu.cn

收稿日期: 2026-05-26 改回日期: 2026-08-10

引用格式: 魏亚轩, 连喜军, 杨雯, 等. 面筋蛋白组分对麻花吸油性的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 171-179.

Citation: Wei Yaxuan, Lian Xijun, Yang Wen, et al. Effect of gluten protein fractions on oil uptake of fried Mahua[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 171-179.

油炸麻花作为中国传统面制品,以其酥脆口感深受消费者喜爱^[1]。但油炸过程中高吸油性导致产品脂肪含量高,长期大量食用会显著增加肥胖、冠心病、高血压、高血脂等慢性疾病的发病风险,严重威胁人体健康^[2]。

近年来,降低油炸食品中含油量的研究聚焦于预处理优化、新型涂层技术、创新油炸工艺三大方向。预处理方面,物理与化学预处理结合成为研究热点,韩雪等^[3]研究表明,经过冷冻、涂膜、冷冻与涂膜联合处理的再制薯条含油量分别下降了 35.02%,10.49%,44.83%;Salehi 等^[4]研究发现,经 150 W 超声处理的马铃薯片吸油率从 26.92%降至 14.56%;Wang 等^[5]发现中等强度的微波处理结合 4 h 的醋酸浸泡处理可显著提升薯片的质地表现,含油量约降低了 53.25%;此外,Kirchner 等^[6]、Zhang 等^[7]分别研究了脉冲电场、射频等物理技术,证实其均可实现高效降油,其中射频处理后的薯条含油量降低了 28.00%。涂层技术方面,以复合体系为核心突破,房子蔚等^[8]研究发现,添加海藻酸钠和低甲氧基果胶可显著降低油炸甘薯淀粉总油含量;徐余余等^[9]研究表明,添加瓜尔胶、果胶、海藻酸钠、黄原胶等亲水胶体能有效促使面糊形成更致密的网络结构,减少油脂在油炸过程中向外裹糊层的渗透,有效降低油炸产品的吸油性;Abdolshah 等^[10]制备的含姜黄素纳米乳液的罗勒籽胶涂层,以及 Su 等^[11]使用的 25% 麦芽糊精、1.0% CMC-Na 和 1.5% 壳聚糖的涂层预处理,均展现出优异的阻油性能;Abu-Thabet 等^[12]也验证了结合橄榄叶提取物和壳聚糖纳米粒子的果胶基涂层在薯条降油中的应用价值。油炸工艺创新方面,真空油炸^[13-16]、空气油炸^[17-20]和喷淋油炸^[21]等低油技术日趋成熟,同时精准温控与间歇油炸技术不断优化,可有效减少油脂渗透。

面筋蛋白又称贮藏蛋白,是小麦籽粒中蛋白质的重要组成部分,约占小麦总蛋白的 80%~85%,主要由麦醇溶蛋白和麦谷蛋白组成^[22],还含有少量其他蛋白质、残留淀粉和脂质。根据电泳迁移率,醇溶蛋白可分为 α -、 β -、 γ -和 ω -型^[23]。 α -、 β -和 γ -醇溶蛋白相对分子质量重叠(约 28 000~35 000)。张令文等^[24]研究表明,当麦谷蛋白—麦醇溶蛋白质量比为 9:10 时,两者的相互作用有较好的成膜阻油性,炸制品的脂肪含量显著降低,水分含量高。关于面筋蛋白组分(麦谷蛋白、醇溶蛋白)对油炸麻花吸油性的影响规律、网络结构变化及油脂阻隔机制的系统性研究较少,且缺乏组分比例与油炸工艺协同降油的优化方案。试验拟通过调节麦谷蛋白与醇溶蛋白质量比以及油炸工艺条件,探究其对油炸麻花吸油性的影响,并结合红外光谱(IR)、¹³C 固体核磁共振(NMR)、X 射线衍射和扫描电子显微镜(SEM)等表征结果,提出面筋蛋白组分降低油炸麻花吸油性的可能机制。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

富强粉:蛋白质 11%,脂质 1.8%,碳水化合物 74%,含水量 13.2%,北京古船食品有限公司;

食盐:中国盐业集团有限公司;

高活性干酵母:安琪酵母股份有限公司;

直链淀粉:纯度 98%,万康生物科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

手提式电热压力蒸汽消毒器:YXQG02 型,山东安德医疗科技有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DH-101-3BS 型,天津市中环实验电炉有限公司;

海尔冰箱:BCD-229KB 型,青岛海尔股份有限公司;

离心沉淀机:L535-1 型,湖南湘仪离心机仪器有限公司;

X 射线衍射仪:Rigaku D/max 2500 v/pc 型,日本理学公司;

固体核磁共振谱仪:Infinity plus 300 WB 型,美国 Varian 公司;

傅里叶变换红外光谱仪:FTS6000 型,美国 Bio-Rad 公司;

差示扫描量热仪:BXT-DSC-300 型,上海格洛姆实业有限公司。

1.2 方法

1.2.1 麦谷蛋白和醇溶蛋白组分的提取与制备

(1) 面筋蛋白组分的制备:参照 He 等^[25]的方法并稍作修改。将面粉与 65% 乙醇按料液比 1:30 (g/mL) 混匀,35 ℃ 水浴中连续搅拌 4 h,室温静置 2 h,取出原始上清液,按料液比 1:30 (g/mL) 加入 65% 乙醇,35 ℃ 水浴中连续搅拌 4 h,室温静置 2 h,4 000 r/min 离心 5 min,得原始上清液和沉淀。原始上清液于 4 ℃ 保存 24 h,便于凝胶沉淀,沉淀物主要由 ω -麦胶蛋白组成。剩余上清液于 -20 ℃ 冷冻 24 h,室温解冻,得另一种主要由 $\alpha\beta\gamma$ -麦胶蛋白组成的沉淀物。原始沉淀物用酒精洗涤 2 次,3 500 r/min 离心 5 min,分离谷蛋白。

(2) 碱溶麦谷蛋白(ASG)的制备:将谷蛋白溶解于 0.1% NaOH 溶液中(料液比为 1:25 (g/mL)),30 ℃ 搅拌 120 min,4 000 r/min 离心 10 min,去除碱不溶性蛋白,得碱溶麦谷蛋白—氢氧化钠复合溶液,50 ℃ 凝聚沉淀 12 h 后,用盐酸调节溶液 pH 至中性,3 000 r/min 离心 5 min,得 ASG。

(3) 尿素溶麦谷蛋白(USG)的制备:配制饱和尿素溶液,缓慢加入麦谷蛋白沉淀(料液比为 1:25 (g/mL)),搅拌直至沉淀不再溶解。将溶液冷藏过夜,室温静置,尿素

结晶后取出固体,干燥粉碎后加入少量水混匀,透析除去尿素,再次干燥后得USG。

1.2.2 麻花的制作 以面粉质量为基准,和面时,向面粉中加入2%盐,2%酵母粉,2%,4%,6%,8%,10%的面筋蛋白组分,以及相同的水,混匀。分别将面团于25,30,35,40,45℃醒发。充分醒发后油炸,将揉搓成型的麻花分别于130,140,150,160,170℃油锅中油炸8,10,12,14,16 min后捞出,所有试验均做3次重复。

1.2.3 含油量及含水率测定 参照文献[26—27]的方法并稍作修改。油炸后取约7 g样品,粉碎,105℃烘干。将干燥样品用滤纸包裹,用95%乙醇提取3 h去除油脂,提取后样品再次于105℃烘干。分别按式(1)、式(2)计算油脂含量和水分含量。

$$A = \frac{M_1 - M_3}{M_1} \times 100\%, \quad (1)$$

$$B = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

A ——油脂含量,%;

B ——水分含量,%;

M_1 ——粉碎后样品质量,g;

M_2 ——烘干后样品质量,g;

M_3 ——去除油脂烘干后样品质量,g。

1.2.4 表征样品制备与表征方法 设置空白对照组、最低含油量组、碱溶麦谷蛋白组和 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白组4组样品,进行傅里叶变换红外光谱分析、 ^{13}C 固体核磁共振分析和X射线衍射分析。所有样品统一采用25℃醒发、150℃油炸10 min的加工条件。最低含油量组: $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白与碱溶麦谷蛋白以质量比8:2复配、总添加量8%,醒发温度25℃、油炸温度150℃、油炸时间10 min。以不添加外源蛋白的为空白对照组,仅添加8% $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白的为 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白组,仅添加8%碱溶麦谷蛋白的为碱溶麦谷蛋白组。

1.2.5 傅里叶变换红外光谱分析 样品于120℃干燥2 h后,与溴化钾按质量比1:60混匀,压制成薄片,在400~4 000 cm^{-1} 范围内以透射模式采集光谱图。

1.2.6 ^{13}C 固体核磁共振分析 干燥样品装入4 mm转盘中,室温下测定,魔角旋转(MAS)速率10 kHz, ^{13}C 射频场强度75 kHz,对应90°脉冲宽度3.4 μs 。

1.2.7 X射线衍射分析 采用X射线衍射仪(40 kV,40 mA)进行分析,Cu靶($\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$),扫描范围3°~80°,0.15 s/步,室温。

1.3 数据处理

各试验均重复3次,采用Excel软件进行两样本 t 检验,分析各组间差异的统计学显著性。

2 结果与分析

2.1 工艺条件对麻花含油量的影响

2.1.1 蛋白种类及添加量对含油量的影响 未添加蛋白时,麻花含油量为(20.51±0.09)%。由表1可知,固定醒发温度25℃、油炸温度150℃、油炸时间10 min,当 ω -醇溶蛋白、 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白、碱溶麦谷蛋白和尿素溶麦谷蛋白组添加量分别为10%,2%,4%,4%时,麻花含油量分别为12.51%,12.48%,16.84%,10.70%,其中添加尿素溶麦谷蛋白的含油量降幅最大,降低了47.83%。 ω -醇溶蛋白为虫状结构^[25],其与淀粉结合后部分堵塞淀粉球表面水蒸气挥发通道,减少油炸过程中淀粉球蒸汽挥发产生负压吸附油脂。 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白为球状结构^[28],可堵塞更多淀粉球水蒸气通道,其含油量略低于 ω -醇溶蛋白组。碱溶麦谷蛋白和尿素溶麦谷蛋白为膜状结构^[29],通过包裹淀粉球减少其水蒸气挥发,进而减少麻花因负压造成的油脂吸附。由于碱液会破坏部分二硫键,所以碱溶麦谷蛋白的膜结构不完整,不能堵塞麻花中淀粉球的所有气孔。尿素溶麦谷蛋白中部分氢键被打开,蛋白成膜性更强,包裹淀粉球后淀粉球中水蒸气挥发最少,麻花含油量最低。

2.1.2 醒发温度对含油量的影响 由表2可知,固定蛋白添加量4%、油炸温度150℃、油炸时间10 min,当 ω -醇溶蛋白、 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白、碱溶麦谷蛋白和尿素溶麦谷蛋白组醒发温度分别为25,45,40,45℃时,4种蛋白的成膜性有明显影响。其中添加碱溶麦谷蛋白的含油量降幅最大,可能与碱溶麦谷蛋白成膜性更好有关。碱溶麦谷蛋白膜能更好地封住淀粉球表面气孔,防止其中水分蒸发,阻碍

表1 蛋白种类及添加量对麻花含油量的影响[†]

Table 1 Effects of protein types and addition levels on the oil content of Mahua

蛋白种类	蛋白添加量				
	2%	4%	6%	8%	10%
ω -醇溶蛋白	14.95±0.07**	13.26±0.16**	14.77±0.31**	17.66±0.10**	12.51±0.10**
$\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白	21.35±0.27	12.86±0.12**	12.48±0.32**	14.86±0.24**	13.21±0.14**
碱溶麦谷蛋白	19.70±0.25	16.84±0.02**	20.05±0.04*	17.89±0.31*	16.92±0.32**
尿素溶麦谷蛋白	13.72±0.18**	10.70±0.02**	14.16±0.16**	16.93±0.40*	24.13±0.43*

[†] *表示与未添加蛋白的空白样品相比差异显著($P<0.05$),**表示与未添加蛋白的空白样品相比差异极显著($P<0.01$)。

表 2 醒发温度对麻花含油量的影响[†]

Table 2 Effects of mixing temperatures on the oil content of Mahua %

蛋白种类	醒发温度				
	25 ℃	30 ℃	35 ℃	40 ℃	45 ℃
ω-醇溶蛋白	16.45±0.73*	17.71±0.28*	24.81±0.15**	20.35±0.74	19.37±0.64
αβγ-醇溶蛋白	20.52±0.19	20.66±0.99	20.51±0.31	14.36±0.14**	11.91±0.01**
碱溶麦谷蛋白	15.77±0.32**	14.57±0.61*	16.05±0.32**	9.25±0.42**	12.41±0.33**
尿素溶麦谷蛋白	15.61±0.31**	15.46±0.10**	16.36±0.28**	17.67±0.03**	9.73±0.04**

† *表示与未添加蛋白的空白样品相比差异显著($P<0.05$),**表示与未添加蛋白的空白样品相比差异极显著($P<0.01$)。

冷却过程中油脂负压吸附油脂。

2.1.3 油炸温度对含油量的影响 由表 3 可知,固定蛋白添加量 4%、醒发温度 45 ℃、油炸时间 10 min,随着油炸温度的升高,各组含油量总体呈下降趋势。醇溶蛋白组中,当油炸温度为 160 ℃时,麻花含油量为 11.59%;碱溶麦谷

蛋白组中,当油炸温度为 160 ℃时,麻花含油量为 11.71%,表明 160 ℃为较适宜的油炸温度,可有效减少油脂吸附。Zhou 等^[30-31]研究表明,油炸温度会影响面团中淀粉球破裂程度、蛋白质和淀粉结合方式、空间结构,进而影响蛋白质和淀粉对油脂的吸附量。

表 3 油炸温度对麻花含油量的影响[†]

Table 3 Effects of frying temperatures on the oil content of Mahua %

蛋白种类	油炸温度				
	130 ℃	140 ℃	150 ℃	160 ℃	170 ℃
ω-醇溶蛋白	15.28±0.07**	13.57±0.43**	14.84±0.07**	11.59±0.05**	14.01±0.04**
αβγ-醇溶蛋白	18.84±0.15*	15.28±0.16**	16.31±0.01**	12.19±0.28**	12.06±0.01**
碱溶麦谷蛋白	19.62±0.04*	18.01±0.27*	14.09±0.90*	11.71±0.80**	13.74±0.24**
尿素溶麦谷蛋白	15.28±0.08**	14.67±0.32*	13.57±0.13	11.83±0.13**	14.88±0.01*

† *表示与未添加蛋白的空白样品相比差异显著($P<0.05$),**表示与未添加蛋白的空白样品相比差异极显著($P<0.01$)。

2.1.4 油炸时间对含油量的影响 由表 4 可知,固定蛋白添加量 4%、醒发温度 45 ℃、油炸温度 160 ℃,当 ω-醇溶蛋白、αβγ-醇溶蛋白、碱溶麦谷蛋白和尿素溶麦谷蛋白组油炸时间分别为 11,9,8,10 min 时,含油量最低。其中碱溶麦谷蛋白组油炸 8 min 的含油量降幅最大,由 20.51%降至 9.20%。影响面团吸附油脂的主要因素为淀粉球和直链淀粉^[32-33],前者通过孔径负压吸附油脂,后者通过双螺旋吸附油脂。碱溶麦谷蛋白通过膜覆盖淀粉球通道减少油脂吸附,其他 3 种蛋白与淀粉球结合后油炸过程中可能导致淀粉球破裂释放出直链淀粉,减少了淀粉球吸附油脂,

但释放出的直链淀粉又吸附了一定的油脂。推测麻花中的大部分油脂是通过淀粉球负压吸附的。

2.1.5 蛋白复配组合对含油量的影响 固定醒发温度 25 ℃、油炸温度 150 ℃、油炸时间 10 min,将不同蛋白按不同质量比复配,总添加量为 2%~10%。由表 5 可知,多数复配组合可进一步降低含油量,效果优于单一蛋白添加。其中,αβγ-醇溶蛋白与碱溶麦谷蛋白以质量比 8:2 复配、总添加量为 8%时,含油量低至 8.91%,降油效果最佳;ω-醇溶蛋白与尿素溶麦谷蛋白以质量比 2:8 复配、总添加量为 8%时,含油量为 9.01%;αβγ-醇溶蛋白与尿素溶麦谷蛋

表 4 油炸时间对麻花含油量的影响[†]

Table 4 Effects of frying time on the oil content of Mahua %

蛋白种类	油炸时间				
	8 min	9 min	10 min	11 min	12 min
ω-醇溶蛋白	14.92±0.11**	12.60±0.44**	14.84±0.07**	11.73±0.39**	16.29±0.05**
αβγ-醇溶蛋白	14.40±0.20**	13.94±0.02**	16.31±0.01**	14.37±0.19**	20.84±0.26
碱溶麦谷蛋白	9.20±0.03**	9.99±0.01**	14.09±0.90*	12.15±0.07**	13.66±0.39**
尿素溶麦谷蛋白	16.57±0.13**	18.81±0.23*	21.00±0.32	16.58±0.10**	22.89±0.42*

† *表示与未添加蛋白的空白样品相比差异显著($P<0.05$),**表示与未添加蛋白的空白样品相比差异极显著($P<0.01$)。

表 5 两两蛋白复配对麻花含油量的影响[†]

Table 5 Effects of pairwise protein combinations on the oil content of Mahua

%

复配蛋白	质量比	总添加量				
		2%	4%	6%	8%	10%
ω -醇溶蛋白— $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白	1:9	15.35±1.56	17.80±0.12**	12.29±0.31**	11.52±0.04**	15.56±0.08**
	2:8	15.52±1.38	15.02±0.08**	14.35±0.44**	10.23±0.52**	13.83±0.34**
	3:7	18.98±0.56	16.21±0.58*	15.89±0.79*	14.31±0.60**	17.67±0.52*
	4:6	17.63±0.43*	16.83±0.39*	12.74±0.58**	12.88±0.13**	14.24±0.02**
	1:1	13.73±0.16**	16.88±0.04**	10.89±0.81**	12.84±0.13**	13.58±0.30**
	6:4	16.02±0.22**	13.39±0.04**	11.45±0.36**	13.90±0.15**	14.79±0.19**
	7:3	11.59±0.06**	12.41±0.00**	12.03±0.25**	12.59±0.09**	15.16±0.38**
	8:2	15.22±0.36**	13.88±0.07**	11.37±0.25**	11.94±0.55**	13.87±0.05**
	9:1	20.08±0.58	17.35±0.78	13.02±0.60**	10.29±0.31**	17.45±0.31*
ω -醇溶蛋白—碱溶麦谷蛋白	1:9	14.46±0.44**	27.58±0.52**	18.73±0.90	16.05±0.12**	15.62±0.04**
	2:8	14.46±0.05**	16.96±0.10**	20.58±0.09	16.21±0.06**	18.67±0.14**
	3:7	16.34±0.23**	11.76±0.05**	16.58±0.57*	16.42±0.14**	16.38±0.26**
	4:6	14.42±0.16**	15.24±0.83*	11.71±0.65**	17.12±0.10**	18.02±0.00**
	1:1	15.94±0.09**	20.78±1.07	16.10±0.16**	16.07±0.09**	17.12±0.17**
	6:4	12.33±0.96*	16.26±0.15**	12.46±0.22**	15.63±0.49*	14.94±0.29**
	7:3	14.53±0.03**	17.38±0.13**	14.70±0.24**	16.56±0.18**	17.30±0.24**
	8:2	15.25±0.04**	15.88±0.29**	14.79±0.15**	14.92±0.15**	15.26±0.15**
	9:1	11.62±0.06**	18.38±0.02**	12.86±0.76**	18.20±0.04**	11.53±0.20**
ω -醇溶蛋白—尿素溶麦谷蛋白	1:9	18.66±0.56	14.70±0.72*	14.78±0.15**	12.12±0.30**	9.85±0.13**
	2:8	14.20±0.05**	15.36±0.40**	12.98±0.78*	9.01±0.04**	13.56±0.26**
	3:7	13.99±0.02**	15.81±0.13**	12.39±0.37**	10.75±0.01**	10.74±0.17**
	4:6	14.05±0.07**	15.41±0.69*	12.79±0.05**	10.78±0.16**	14.76±0.15**
	1:1	15.00±0.03**	15.41±0.11**	9.34±0.23**	11.25±0.39**	13.32±0.03**
	6:4	15.91±0.23**	14.43±0.07**	13.06±0.04**	9.59±0.30**	14.19±0.05**
	7:3	16.00±0.09**	19.60±0.17*	13.49±0.59**	15.90±0.07**	9.39±0.18**
	8:2	16.03±0.24**	18.48±0.85	9.64±0.47**	15.12±0.69*	15.08±0.17**
	9:1	13.88±0.12**	15.57±0.01**	13.03±0.31**	10.60±0.15**	12.81±0.13**
$\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白—碱溶麦谷蛋白	1:9	16.87±0.19**	17.88±0.55*	13.31±0.05**	13.22±0.04**	11.15±0.04**
	2:8	14.03±0.24**	18.02±0.32*	16.85±0.20**	13.93±0.06**	10.88±0.45**
	3:7	14.09±0.22**	15.64±0.20**	15.92±0.02**	13.31±0.16**	10.30±0.14**
	4:6	15.82±1.05*	18.65±0.20*	15.38±0.02**	10.62±0.12**	12.29±0.01**
	1:1	15.29±0.35**	20.02±0.86	12.43±0.07**	10.63±0.04**	12.00±0.05**
	6:4	17.53±0.18**	17.44±0.06**	11.84±0.28**	12.12±0.05**	10.58±0.30**
	7:3	14.92±0.13**	12.68±0.00**	11.83±0.03**	12.25±0.09**	9.64±0.48**
	8:2	13.32±0.05**	13.45±0.24**	9.18±0.21**	8.91±0.18**	9.50±0.27**
	9:1	16.77±0.14**	14.14±0.12**	9.07±0.05**	11.62±0.09**	12.78±0.17**
$\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白—尿素溶麦谷蛋白	1:9	15.96±0.08**	13.83±0.30**	14.90±0.38**	16.51±0.70*	19.23±0.13*
	2:8	13.96±0.38**	15.92±0.32**	13.50±0.34**	10.37±0.23**	19.43±0.00**
	3:7	13.73±0.24**	12.95±0.64**	16.05±0.33**	10.52±0.45**	17.79±0.48*
	4:6	15.58±0.11**	16.65±0.02**	14.31±0.36**	13.61±0.67**	17.26±0.04**
	1:1	14.21±0.22**	15.57±0.36**	12.28±0.11**	13.79±0.00**	15.81±0.22**

续表 5

复配蛋白	质量比	总添加量				
		2%	4%	6%	8%	10%
$\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白—尿素溶麦谷蛋白	6:4	16.38±0.14**	17.52±0.20**	15.96±0.06**	16.13±0.02**	14.18±0.09**
	7:3	15.54±0.20**	15.04±0.03**	12.53±0.48**	14.52±0.21**	11.86±0.57**
	8:2	15.45±0.09**	15.92±0.48*	12.80±0.11**	13.35±0.21**	14.63±0.27**
	9:1	12.35±0.49**	11.90±0.54**	12.72±0.51**	10.62±0.33**	15.38±0.23**
碱溶麦谷蛋白—尿素溶麦谷蛋白	1:9	13.76±0.75*	19.65±0.41	17.32±0.46*	13.60±0.13**	14.00±0.03**
	2:8	17.89±0.21**	16.81±0.22**	20.89±0.33**	13.59±0.56**	16.15±0.17**
	3:7	18.15±0.28*	18.64±0.04**	24.88±0.14**	15.18±0.15**	16.47±0.71*
	4:6	12.68±0.05**	15.40±0.05**	17.11±0.29**	12.52±0.26**	15.14±0.25**
	1:1	15.42±0.05**	20.94±0.32	15.64±0.03**	12.10±0.01**	16.41±0.90*
	6:4	10.43±0.39**	21.16±0.53	16.57±0.36**	10.07±0.11**	15.86±0.31**
	7:3	16.31±0.20**	18.36±0.03**	15.79±0.29**	11.38±0.49**	14.63±0.20**
	8:2	15.29±0.17**	13.67±0.03**	16.60±0.08**	10.68±0.01**	13.97±0.12**
	9:1	10.99±0.09**	14.15±0.04**	14.77±0.51**	12.06±1.13*	10.84±0.06**

† *表示与未添加蛋白的空白样品相比差异显著($P<0.05$),**表示与未添加蛋白的空白样品相比差异极显著($P<0.01$)。

白复配组合在高添加量时含油量回升,表明两种蛋白本身可能结合油脂。总之,合理复配可产生协同降油效应,可将麻花含油量降至9%以下,最佳条件为 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白与碱溶麦谷蛋白以质量比8:2复配、总添加量8%,醒发温度25℃、油炸温度150℃、油炸时间10 min,此时含油量为8.91%,低于文献[26]的。

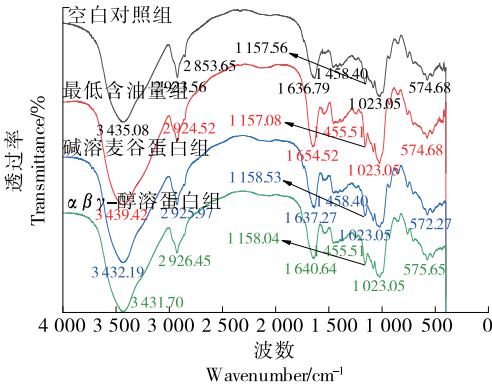
2.2 傅里叶变换红外光谱分析

根据文献[34—36],所有样品在3 430~3 440 cm^{-1} 处出现强吸收峰,对应蛋白N—H与羟基O—H伸缩振动;2 924~2 926 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2-$ 的C—H伸缩振动;1 640~1 654 cm^{-1} 为蛋白酰胺I带(C=O伸缩振动),1 636 cm^{-1} 处吸收峰为水分子O—H—O伸缩振动;1 545 cm^{-1} 处为蛋白酰胺II带的C—N伸缩振动;1 023 cm^{-1} 处为无定型淀粉C—O伸缩振动;490~550 cm^{-1} 处为蛋白二硫键特征峰。由图1可知,最低含油量样品中C=O伸缩振动由空白组的1 636.79 cm^{-1} 转变为1 654.52 cm^{-1} ,说明最低含油量组蛋白的水合作用增强^[37]。此外,最低含油量组样品中蛋白酰胺II带的C—N伸缩振动强度明显大于空白对照组,可能与该样品蛋白中 β -转角和无规卷曲结构含量较高有关(见表6)。1 745 cm^{-1} (脂质C=O伸缩振动)处红外吸收峰强度较弱^[38],主要与样品测样前用乙醇脱除油脂有关。最低含油量组在1 023 cm^{-1} 附近无定型淀粉红外吸收峰强度较大,说明部分淀粉球破裂,淀粉球中原有有序排列淀粉转变为淀粉球破裂析出无定型态的直支链淀粉。各组二硫键特征峰(490~550 cm^{-1})位置与强度无明显差异^[36],说明添加碱溶麦谷蛋白和 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白未改变麻花原有蛋白二硫键构象,只是麻花中各蛋白二级结构含量发生了变化。综上,添加碱溶麦谷蛋白和

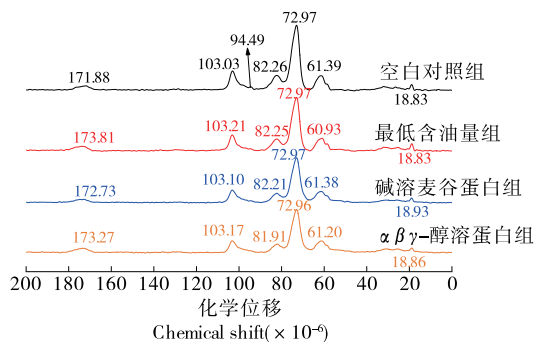
$\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白降低含油量的原因是增强了麻花原有蛋白的水合作用,这些存在于 β -转角和无规卷曲结构中的水分阻碍了麻花冷却过程中油脂的渗入,从而减少了麻花的含油量。

2.3 ^{13}C 固体核磁共振分析

根据文献[39—40], $(171\sim174)\times10^{-6}$ 处核磁信号为



蛋白质酰胺羰基碳特征共振峰, $(100\sim105)\times10^{-6}$ 处为淀粉异头碳(C1)特征峰, $(70\sim80)\times10^{-6}$ 处为淀粉吡喃环碳(C2~C5)信号, $(60\sim62)\times10^{-6}$ 处为淀粉羟甲基碳(C6)峰, $(18\sim19)\times10^{-6}$ 处为缬氨酸(Val)特征峰^[25]。由图2可知,所有样品中仅出现明显缬氨酸核磁共振峰,说明缬氨酸位于蛋白外侧,较少参与蛋白分子间的聚合。最低含油量组麻花有两处核磁共振峰与空白对照组明显不同:①酰胺键核磁共振峰由空白对照组的 171.88×10^{-6} 转变为最佳组的 173.81×10^{-6} ,且峰强度略有增加,说明最佳组麻花中蛋白水合作用增强^[41],与红外结果吻合;②淀粉C6的核磁峰从 61.39×10^{-6} 转变为 60.93×10^{-6} ,说明碱溶麦谷蛋白和 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白的酰胺键氧和小麦淀粉中C6的羟基间可能形成了氢键,淀粉和蛋白互作改变了麻花中蛋白空间结构,增加了水分的束缚能力。碱溶麦谷蛋白和 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白中出现了明显的淀粉或多糖核磁共振峰,说明碱溶麦谷蛋白和 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白结合有淀粉或多糖,该结构有利于其与麻花中淀粉相互结合。油炸过程中麻花中大多数淀粉球破裂,淀粉球吸附油脂较少,主要是网状蛋白结构吸附油脂。添加碱溶麦谷蛋白和 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白后,麻花中淀粉球因这两种蛋白膜包裹油炸过程破裂程度更高,吸附油脂减少。此外,蛋白与淀粉互作过程中蛋白结构发生变化,水合作用增强,蛋白吸附油脂进一步减少。

图2 麻花样品的¹³C固体核磁共振谱图Figure 2 The ¹³C NMR spectra of Mahua samples

2.4 X-射线衍射分析

由图3可知,添加碱溶麦谷蛋白和 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白前后,麻花样品仅有一个 $2\theta\approx20^\circ$ 衍射峰,与文献^[26]的相同,但与小麦淀粉(2θ 为 $15^\circ, 17^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 23^\circ$)的A型衍射不同^[42]。添加碱溶麦谷蛋白和 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白的麻花X射线衍射峰也在 $2\theta\approx20^\circ$ 处,该衍射峰可能源于小麦支链淀粉或面筋蛋白组分,或是二者的结合物。空白对照组、最低含油量组、碱溶麦谷蛋白组和 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白组结晶度分别为23.92%, 19.33%, 23.43%, 30.39%,最低含油量组的结晶度最低,与红外和核磁共振结果吻合,表明较多

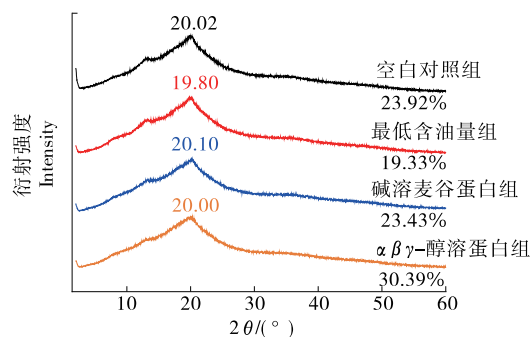


图3 麻花样品的X射线衍射图

Figure 3 The XRD spectra of Mahua samples

的结合水减少了麻花中蛋白结合油脂的量,大大减少了麻花的含油量。

3 结论

面筋蛋白可显著降低油炸麻花的吸油性,其效果受蛋白种类、添加量、醒发温度及油炸条件的综合调控。单一蛋白中,尿素溶麦谷蛋白的降油效果最突出。不同蛋白复配可产生协同增效,进一步将含油量降至更低水平,其中 $\alpha\beta\gamma$ -醇溶蛋白和碱溶麦谷蛋白以质量比8:2复配的效果更突出。相关表征结果表明,该组合蛋白通过增加麻花保水率而减少油脂的吸附。后续应深入探索该组合对麻花淀粉球、直链淀粉和蛋白本身油脂吸附的作用规律。

参考文献

- [1] 武新雨. 乳酸菌发酵处理对麻花油炸过程中伴生危害物的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025: 1.
Wu X Y. Study on the influence of lactic acid bacteria fermentation treatment on the associated hazards in the frying process of fried dough twist[D]. Changchun: Jilin University, 2025: 1.
- [2] 计红芳, 张令文, 王方, 等. 糊的组成成分对挂糊油炸肉制品品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 384-389.
Ji H F, Zhang L W, Wang F, et al. Research progress of effects of batter composition on edible quality of deep-fat-fried battered meat product[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(4): 384-389.
- [3] 韩雪, 李文钊, 赵薇, 等. 冷冻联合涂膜处理降低再制薯条含油量的效果[J]. 食品科学, 2025, 46(17): 254-262.
Han X, Li W Z, Zhao W, et al. Effect of freezing combined with coating treatment on reducing the oil content of reconstituted French fries[J]. Food Science, 2025, 46(17): 254-262.
- [4] Salehi F, Ghazvinch S, Amiri M. Effect of basil seed gum coating and ultrasound pretreatment on frying time, oil uptake, hardness, color indexes, and sensory properties of potato slices[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 110: 107035.

- [5] Wang S M, Zhao S L, Wang N, et al. Effective pretreatment of microwave combined with acetic acid soaking on oil absorption and quality of fried potato chips[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, 105(3): 1 624-1 634.
- [6] Kirchner M A, Hill K, Siemer C, et al. Effects of pulsed electric field treatment and raw material storage on processing properties and quality attributes of fried sweet potato chips[J]. *Applied Food Research*, 2025, 5(2): 101462.
- [7] Zhang C, Lyu X M, Zhao W, et al. Radio frequency as an innovative method to produce low-fat French fries[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(12): 5 181-5 189.
- [8] 房子蔚, 王雨生, 李鑫, 等. 海藻酸钠和低甲氧基果胶抑制油炸甘薯淀粉吸油效果及结构变化[J]. *粮油食品科技*, 2022, 30(3): 96-104.
- Fang Z W, Wang Y S, Li X, et al. Oil absorption-reducing and structural changes of fried sweet potato starch with the addition of sodium alginate and low methoxyl pectin[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2022, 30(3): 96-104.
- [9] 徐余余, 樊铭聪, 李言, 等. 亲水胶体对油炸外裹糊酥肉制品吸油特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(24): 27-34.
- Xu Y Y, Fan M C, Li Y, et al. Effect of hydrophilic colloids on oil absorption characteristics of fried and coated meat products [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(24): 27-34.
- [10] Abdolshah M, Najafi A, Razavi R, et al. Effect of curcumin loaded in nanoemulsion basil seed gum coating on the reduction of acrylamide and oil absorption in fried potato strips [J]. *Food Research International*, 2025, 200: 115467.
- [11] Su Y, Zhang M, Chitrakar B, et al. Reduction of oil uptake with osmotic dehydration and coating pre-treatment in microwave-assisted vacuum fried potato chips[J]. *Food Bioscience*, 2021, 39: 100825.
- [12] Abu-Thabet A, Al-Asmar A, Sabbah M, et al. Evaluation of pectin-based coatings, olive leaf extract, and chitosan nanoparticles for acrylamide and hydroxymethylfurfural mitigation in French fries: a comparative study of the deep frying and air frying methods[J]. *Coatings*, 2025, 15(5): 562.
- [13] 赵之越, 廖梦雨, 聂远洋, 等. 真空油炸香菇脆片烫漂和浸渍工艺优化[J]. *食品与机械*, 2025, 41(2): 189-196.
- Zhao Z Y, Liao M Y, Nie Y Y, et al. Optimization of blanching and soaking technology for vacuum-fried *Lentinus edodes* crispy[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(2): 189-196.
- [14] 鲍雨婷, 陈琪, 王灼琛. 低温油炸黄茶风味小麦脆片加工工艺优化及品质分析[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(11): 254-268.
- Bao Y T, Chen Q, Wang Z C. Process optimization and quality analysis of low temperature fried yellow tea flavor wheat chips [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(11): 254-268.
- [15] 弓志青, 王雪玲, 孔令宝, 等. 低含油率真空油炸金针菇加工工艺研究[J]. *中国果菜*, 2023, 43(3): 14-17, 30.
- Gong Z Q, Wang X L, Kong L B, et al. Study on processing technology of low oil content vacuum-fried *flammulina velutipes*[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2023, 43(3): 14-17, 30.
- [16] 王香存, 陈龙, 金征宇. 真空油炸技术及其在淀粉基食品中的应用[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(11): 1-9.
- Wang X C, Chen L, Jin Z Y. Vacuum frying technology and its applications in starchy foods[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(11): 1-9.
- [17] 周婷, 周劲松, 何哲, 等. 空气油炸鳕鱼休闲食品工艺优化研究[J]. *渔业研究*, 2024, 46(5): 509-518.
- Zhou T, Zhou J S, He Z, et al. The study of processing optimization of air-fried anchovy snack food[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2024, 46(5): 509-518.
- [18] 吉薇, 陈玉, 胡沛婷, 等. 响应面法优化空气油炸莲子片的工艺研究[J]. *农产品加工(上半月)*, 2022(9): 53-57, 62.
- Ji W, Chen Y, Hu P T, et al. Optimization of air fried lotus seed slices by response surface methodology[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2022(9): 53-57, 62.
- [19] 江嘉琦, 张旭飞, 吉宏武, 等. 常压油炸与空气油炸对凡纳滨对虾中虾青素含量及抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(13): 33-39.
- Jiang J Q, Zhang X F, Ji H W, et al. Effects of deep frying and air frying on astaxanthin content and antioxidant activity of *litopenaeus vannamei*[J]. *Food Science*, 2022, 43(13): 33-39.
- [20] 李晓云, 谢荣华, 陈胜, 等. 羧甲基纤维素钠涂膜处理对真空油炸香芋脆条油脂吸收的影响[J]. *食品与机械*, 2025, 41(4): 155-161.
- Li X Y, Xie R H, Chen S, et al. Effect of sodium carboxymethyl cellulose coating treatment on oil absorption in vacuum-fried taro crisp strips[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(4): 155-161.
- [21] 李来瑛, 冯沛生, 齐永忠. 一种喷淋油炸装置: CN221996635 U[P]. 2024-11-15.
- Li L Y, Feng P S, Qi Y Z. A spray-frying apparatus: CN221996635U[P]. 2024-11-15.
- [22] 杨莹莹, 杨梓婷, 徐润东, 等. 不同品种小麦面筋蛋白结构与理化特性分析[J]. *中国食品学报*, 2025, 25(11): 49-58.
- Chang Y Y, Yang Z T, Xu R D, et al. Analysis of physicochemical properties and structure of gluten protein from different wheat varieties[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2025, 25(11): 49-58.
- [23] 赵金金. 小麦直支链淀粉共晶促进碱溶麦谷蛋白二硫键形成的机制及其在面条中的应用[D]. 天津: 天津商业大学, 2024: 5.
- Zhao J J. Effect of wheat amylose and amylopectin eutectic treatment on disulfide bond formation of alkali-soluble glutenin and its application in noodles[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2024: 5.
- [24] 张令文, 王雪菲, 琚星, 等. 麦谷蛋白/麦醇溶蛋白对挂糊油炸猪肉片外壳食用品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9):

- 14-19.
- Zhang L W, Wang X F, Jv X, et al. Effect of glutenin-gliadin ratio on the edible quality of crusts from deep-fried battered pork slices[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(9): 14-19.
- [25] He Z X, Wang H W, Lian X J. Isolation and characterization of four protein fractions of gluten by conventional methods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 131: 106271.
- [26] Lian X J, Zuo Y X, Jiang R X, et al. Effects of alcohol extracts of gluten on oil uptake of fried Mahua[J]. *Starch-Stärke*, 2020, 72(3/4): 1900210.
- [27] 杨镒静, 吴中华, 刘静, 等. 基于声发射法的油炸马铃薯片脆性测量及油炸工艺优化[J]. *食品与机械*, 2025, 41(6): 203-210.
- Yang Y J, Wu Z H, Liu J, et al. Brittleness measurement and process optimization of fried potato chips based on the acoustic emission method[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(6): 203-210.
- [28] Quester S, Dahesh M, Strey R. Microcellular foams made from gliadin[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2014, 292(9): 2 385-2 389.
- [29] Han C W, Ma M, Li M, et al. Further interpretation of the underlying causes of the strengthening effect of alkali on gluten and noodle quality: studies on gluten, gliadin, and glutenin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105661.
- [30] Zhou R X, Sun J, Qian H F, et al. Effect of the frying process on the properties of gluten protein of you-Tiao[J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125973.
- [31] 陈龙. 油炸过程中淀粉结构变化与吸油特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 30.
- Chen L. Investigation on the structural changes and oil absorption of starch during frying[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 30.
- [32] Zhang J, Li J W, Fan L P. Effect of starch granule size on the properties of dough and the oil absorption of fried potato crisps [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 268: 131844.
- [33] Chen L, Mcclements D J, Zhang H H, et al. Impact of amylose content on structural changes and oil absorption of fried maize starches[J]. *Food Chemistry*, 2019, 287: 28-37.
- [34] Singh G, Singh B, Singh A, et al. Functionality of barley pasta supplemented with mungbean flour: cooking behavior, quality characteristics and morphological interactions[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2023, 17(6): 5 806-5 820.
- [35] Krekora M, Nawrocka A. The influence of selected polyphenols on the gluten structure-A study on gluten dough with application of FT-IR and FT-Raman spectroscopy[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 108: 103570.
- [36] Van Der Vennet J, De Witte F, Vandenabeele P, et al. Applicability of Raman spectroscopy for the assessment of wheat flour quality and functionality in bakery applications[J]. *Foods*, 2025, 14(19): 3 330.
- [37] Nawrocka A, Krekora M, Niewiadomski Z, et al. FTIR studies of gluten matrix dehydration after fibre polysaccharide addition [J]. *Food Chemistry*, 2018, 252: 198-206.
- [38] Gunarathne R, Marikkar N, Yalagama C, et al. FTIR spectral analysis combined with chemometrics in evaluation of composite mixtures of coconut testa flour and wheat flour[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16 (3): 1 796-1 806.
- [39] Baik M Y, Dickinson L C, Chinachoti P. Solid-state ¹³C CP/MAS NMR studies on aging of starch in white bread[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(5): 1 242-1 248.
- [40] Kuang J W, Huang J R, Ma W H, et al. Influence of reconstituted gluten fractions on the short-term and long-term retrogradation of wheat starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 130: 107716.
- [41] Sivam A S, Waterhouse G I N, Zujovic Z D, et al. Structure and dynamics of wheat starch in breads fortified with polyphenols and pectin: an ESEM and solid-state CP/MAS ¹³C NMR spectroscopic study[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(1): 110-123.
- [42] Lv Y J, Li M, Pan J X, et al. Interactions between tea products and wheat starch during retrogradation[J]. *Food Bioscience*, 2020, 34: 100523.