

微波辅助 Osborne 法提取米糠谷蛋白及其性质的影响

肖志刚¹, 段庆松¹, 段玉敏², 朱旻鹏¹, 苏爽¹, 何东¹, 高育哲¹

(1. 沈阳师范大学粮食学院, 沈阳 110034; 2. 沈阳师范大学学前与初等教育学院, 沈阳 110034)

摘要:米糠中蛋白质含量丰富, 蛋白的必需氨基酸组成也比较完整, 是一种优良的蛋白资源, 因其组成成分复杂, 难于提取。为了更加有效地提取米糠谷蛋白, 采用微波辅助 Osborne 法提取米糠谷蛋白, 通过单因素试验研究微波功率、微波时间、微波温度对米糠谷蛋白提取率的影响, 在此基础上采用正交试验确定最优提取条件, 同时研究了微波处理对米糠谷蛋白结构和功能性质的影响。结果表明: 在微波功率 800 W、微波时间 15 min、微波温度 40 °C 的条件下, 米糠谷蛋白提取率为 73.1%。微波处理后, 米糠谷蛋白的 α -螺旋和 β -转角向 β -折叠转移, β -折叠含量明显提高。经过微波处理后, 米糠谷蛋白的溶解性提高了 8.12 百分点, 持水性提高了 0.89 百分点, 起泡性增加了 20.41 百分点, 乳化稳定性增加了 5.50 百分点。随着微波功率的增加, 米糠谷蛋白表面疏水性总体增加。适当的微波处理能有效地增加米糠谷蛋白提取率并改善米糠谷蛋白的部分功能性质。研究结果为米糠谷蛋白的工业化制备及在各种食品配方中的应用提供理论支撑。

关键词:米糠谷蛋白; 微波辅助提取; 功能性质; 结构

中图分类号: TS210.9; TS221 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2022)01-0048-06

Microwave – assisted Osborne extraction of rice bran gluten and its properties

XIAO Zhigang¹, DUAN Qingsong¹, DUAN Yumin², ZHU Minpeng¹,
SU Shuang¹, HE Dong¹, GAO Yuzhe¹

(1. Department of Grain, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China; 2. Preschool and Elementary Education College, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: Rice bran is rich in protein, and the essential amino acid composition of the protein is relatively complete. It is an excellent protein resource. However, it is difficult to extract protein from rice bran because of its complex components. In order to extract rice bran gluten more effectively, the microwave – assisted Osborne method was used, and the influences of microwave power, microwave time and microwave temperature on the extraction rate of rice bran gluten were studied by single factor experiment, then the extraction conditions were optimized by orthogonal experiment. The effects of microwave treatment on the structure and functional property of rice bran gluten were also studied. The results showed that under the conditions of microwave power 800 W, microwave time 15 min and

microwave temperature 40 °C, the extraction rate of rice bran gluten was 73.1%. After microwave treatment, the α -helix and β -turn of rice bran gluten transferred to β -sheet, and the content of β -sheet increased significantly. Compared with natural gluten, after microwave treatment, the solubility of protein increased by 8.12 percentage points, the water holding capacity increased by 0.89 percentage points, the foaming property increased by 20.41 percentage points, and the emulsion stability increased by 5.50 percentage

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(32072139); 辽宁省农业攻关及产业化指导计划项目(2019JH8/10200020); 辽宁省科学技术计划项目——区域创新联合基金(2020-YKLH-35); 辽宁省重点研发计划项目(1584949193607); 辽宁省高等学校基本科研项目专项资金资助(LQN201704); 沈阳师范大学博士科研启动项目(BS201517)

作者简介: 肖志刚(1972), 男, 教授, 博士, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程(E-mail) zhangx@sina.com。

通信作者: 高育哲, 讲师, 博士(E-mail) gaoyuzhe-66@163.com。

points. With the increase of microwave power, the surface hydrophobicity of rice bran gluten increased totally. Proper microwave treatment could effectively increase the extraction rate of rice bran gluten and improve some functional properties of rice bran gluten. The research results provided theoretical support for the industrial preparation of rice bran gluten and its application in various food formulations.

Key words: rice bran gluten; microwave assisted extraction; functional property; structure

米糠是稻米加工过程的主要副产物,主要由果皮、种皮、胚乳和糊粉层组成^[1]。米糠中蛋白质含量丰富,占10%~16%。米糠蛋白组成为清蛋白、球蛋白、谷蛋白和醇溶蛋白,含量分别为37%、36%、22%、5%^[2],其中,谷蛋白作为米糠中主要的不溶性蛋白,较清蛋白、球蛋白和醇溶蛋白具有较高的必需氨基酸含量^[3],研究米糠谷蛋白的提取对于探索其在食品领域的应用具有重要意义。

目前提取米糠谷蛋白的主要方法为 Osborne 法,该方法是根据蛋白质在不同 pH 条件下的溶解性不同且等电点处溶解度最低的特点,采取碱溶酸沉法将多种蛋白质分级提取出来,但 Osborne 法分离米糠谷蛋白的提取率较低^[4]。提取前对米糠进行辅助处理有助于提高蛋白的提取率。微波可渗透分子内部,增加分子运动,对氢键、疏水键产生作用,从而改变蛋白质的构象与活性。本试验采用微波对米糠进行预处理后,利用 Osborne 法提取米糠谷蛋白,确定最优提取条件,并将微波、未微波处理提取的米糠谷蛋白结构及功能性质进行比较,为米糠谷蛋白的开发和应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

龙粳31号大米米糠(水分含量11.92%),辽宁盛宝天隆米业。SDS-PAGE 凝胶电泳试剂盒,考马斯亮蓝 R-250,十二烷基硫酸钠,盐酸胍,5,5-二巯基-2,2-二硝基苯甲酸,其他试剂均为分析纯。

DWF-100 型电动粉碎机, GL-21M 高速冷冻离心机, Ntcolet 5DXC 红外光谱仪, SU3500 扫描电镜, DELTA320 型 pH 计, MAS-II PLUS 常压微波萃取仪, SRD-200 凯氏定氮仪, F97 荧光分光光度计, J810 圆二色谱仪。

1.2 试验方法

1.2.1 微波辅助 Osborne 法提取米糠谷蛋白

根据 Osborne^[2]的分级原理并加以修改。将新鲜米糠过 0.28 mm(50 目)筛,称取 50 g 于 200 mL 蒸馏水中,在一定的微波功率、微波时间和微波温度下对米糠进行微波处理,再根据 Osborne 法进行谷蛋白提取。采用 GB 5009.5—2016 凯氏定氮法测定

谷蛋白含量,按公式(1)计算米糠谷蛋白提取率(Y)。

$$Y = m_1/m \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为提取液中谷蛋白含量; m 为原料中谷蛋白含量。

1.2.2 米糠谷蛋白扫描电镜分析

将米糠谷蛋白冷冻干燥处理,并用扫描电镜对米糠谷蛋白进行形貌观察。将待观察的样品涂在导电胶带上,并涂上一层 5 mm 厚的金属,设置电压 5 kV,于 500× 放大倍数下选择合适视野,拍摄米糠谷蛋白形貌特征。

1.2.3 米糠谷蛋白结构分析

1.2.3.1 红外光谱分析

将 1 mg 米糠谷蛋白样品与 100 mg 溴化钾混匀,压制成片进行红外光谱分析,光谱扫描范围为 400~4 000 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} 。

1.2.3.2 圆二色谱分析

参考文献[7]的方法并加以改进。取 10 mg 待测样品,加入 10 mL 磷酸盐缓冲溶液(pH 7.5, 0.005 mol/L),充分混合之后,将溶液倒入吸收池,将其放在圆二色谱仪中扫描,以 190~250 nm 作为扫描范围,扫描速度 100 nm/min,利用 Spectra Analysis 软件对图谱进行函数平滑,利用仪器附带 Jasco 二级结构估值程序估算待测样品的二级结构。

1.2.4 米糠谷蛋白的功能性质分析

1.2.4.1 溶解性测定

准确称取 2 g 的米糠谷蛋白溶于 10 mL 蒸馏水中,调 pH 为 7.0,室温搅拌 1 h,于 8 000 r/min 离心 20 min,然后用凯氏定氮法测定上清液的含氮量。溶解性用氮溶指数表示,按公式(2)计算。

$$I_{NS} = x_1/x \times 100\% \quad (2)$$

式中: I_{NS} 为氮溶指数值; x_1 为上清液含氮量; x 为样品总含氮量。

1.2.4.2 持水性和持油性测定

称取 0.1 g 米糠谷蛋白溶于 5 mL 0.05 mol/L 磷酸盐缓冲溶液或大豆油中,室温下涡旋 3 min,于 5 000 r/min 离心 20 min,称取离心后沉淀的质量。

按照公式(3)计算持水性(y_1)或持油性(y_2)。

$$y_1(y_2) = \frac{m_1 - m}{m} \quad (3)$$

式中: m 为米糠谷蛋白的质量; m_1 为离心后沉淀的质量。

1.2.4.3 乳化活性及乳化稳定性测定

采用文献[8]方法进行测定。称取0.2 g米糠谷蛋白溶于20 mL 0.05 mol/L磷酸盐缓冲溶液,混匀,从中取15 mL与5 mL大豆油混合,以10 000 r/min均质3 min。将50 μ L的底部乳液与5 mL 0.1%的SDS完全混合,然后在500 nm处测定吸光度(A_0) (对照组为0.1% SDS)。静置10 min后再次从底部各取50 μ L样品,用5 mL 0.1% SDS溶液稀释,测定吸光度(A_{10})。乳化活性(I_{EA})和乳化稳定性(I_{ES})分别按公式(4)和公式(5)计算。

$$I_{EA} = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{\varphi C \times 10\ 000} \quad (4)$$

$$I_{ES} = \frac{A_0 \times \Delta T}{A_0 - A_{10}} \quad (5)$$

式中: N 为稀释倍数; φ 为体系中油相体积分数; C 为样品溶液中蛋白质质量浓度; ΔT 为两次间隔时间差。

1.2.4.4 起泡性及泡沫稳定性测定

采用文献[9]的方法进行测定,并加以修改。准确称量0.2 g米糠谷蛋白与20 mL 0.05 mol/L pH 7.0磷酸盐缓冲溶液于50 mL烧杯中混匀。使用均质机以10 000 r/min均质3 min,测均质后液面体积(V_0),在室温下静置30 min后再读取液面体积(V_{30})。起泡性(H_1)和泡沫稳定性(H_2)分别按照公式(6)和公式(7)计算。

$$H_1 = \frac{V_0 - 20}{V_0} \times 100\% \quad (6)$$

$$H_2 = \frac{V_{30} - 20}{V_0 - 20} \times 100\% \quad (7)$$

1.2.5 米糠谷蛋白表面疏水性的测定

参考文献[10]方法采用ANS探针法测定米糠谷蛋白的表面疏水性。用磷酸缓冲溶液(0.05 mol/L, pH 7.0)制备8 mmol/L ANS溶液,加入一定量的米糠谷蛋白,使其充分溶解,在8 000 r/min下离心20 min,除去沉淀,以Lowery法计算米糠谷蛋白质量浓度。通过磷酸缓冲溶液的稀释,得到质量浓度分别为0.05~0.15 mg/mL的米糠谷蛋白溶液,取40 μ L ANS溶液滴加至不同质量浓度的米糠谷蛋白溶液中,避光静置15 min,然后进行测试。测试条件为激发波长390 nm,发射波长470 nm,扫描

夹缝5 nm,扫描速率10 nm/s。将荧光强度与米糠谷蛋白质量浓度做线性图,以初始段的斜率值计为米糠谷蛋白的表面疏水性。

1.2.6 数据处理与分析

采用Origin软件进行数据分析和图表处理,采用SPSS.24软件进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 微波功率对米糠谷蛋白提取率的影响

在微波时间15 min、微波温度35 $^{\circ}$ C条件下,考察微波功率对米糠谷蛋白提取率的影响,结果见图1。

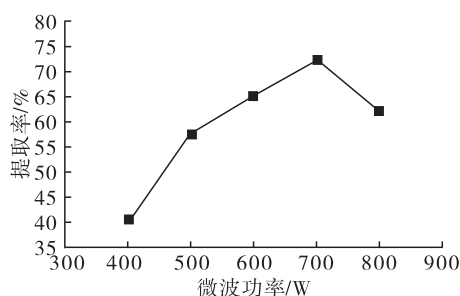


图1 微波功率对米糠谷蛋白提取率的影响

由图1可知,随微波功率的增加,米糠谷蛋白提取率不断增加,在微波功率为700 W时达到最高(72.5%)。这可能是在微波处理时,米糠细胞壁被破碎,内部氢键以及二硫键被破坏,蛋白质易于溶出,谷蛋白提取率升高。微波功率超过700 W后,米糠谷蛋白提取率降低。因此,选定微波功率为700 W。

2.1.2 微波时间对米糠谷蛋白提取率的影响

在微波功率700 W、微波温度35 $^{\circ}$ C条件下,考察微波时间对米糠谷蛋白提取率的影响,结果见图2。

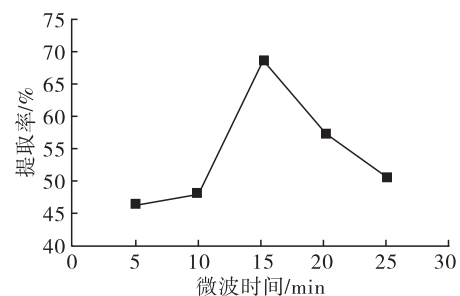


图2 微波时间对米糠谷蛋白提取率的影响

由图2可知,随微波时间的延长,米糠谷蛋白提取率呈现先增加后降低的趋势,在微波时间超过15 min后,米糠谷蛋白提取率不断降低。原因是在微波的作用下,微波时间过长,蛋白质分子氢键以及基团发生改变,内部疏水基团暴露出来,疏水残基相互

作用形成网络结构,蛋白质难以溶出,使谷蛋白提取率降低。因此,选定微波时间为15 min。

2.1.3 微波温度对米糠谷蛋白提取率的影响

在微波时间15 min、微波功率700 W条件下,考察微波温度对米糠谷蛋白提取率的影响,结果见图3。

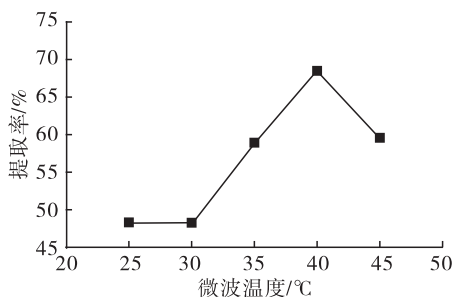


图3 微波温度对米糠谷蛋白提取率的影响

由图3可知,随微波温度的升高,米糠谷蛋白提取率呈现不断升高的趋势,在40℃时米糠谷蛋白提取率达到最大,之后继续升高温度,米糠谷蛋白提取率下降。在微波作用下,随着温度的升高蛋白质结构变得疏松,蛋白质中二硫键被破坏,促进蛋白质的溶解,从而提高了蛋白提取率。因此,选定微波温度为45℃。

2.2 正交试验

根据单因素试验结果,采用三因素三水平的正交试验对米糠谷蛋白提取参数进行优化,正交试验因素水平见表1,正交试验设计与结果见表2。

表1 正交试验因素水平

水平	A 微波功率/W	B 微波时间/min	C 微波温度/°C
1	600	10	35
2	700	15	40
3	800	20	45

表2 正交试验设计与结果

试验号	A	B	C	提取率/%
1	1	1	1	58.7
2	1	2	3	57.4
3	1	3	2	68.3
4	2	1	2	69.5
5	2	2	1	66.9
6	2	3	3	62.1
7	3	1	3	70.3
8	3	2	2	73.1
9	3	3	1	69.7
k_1	61.5	66.2	65.1	
k_2	66.2	65.8	70.3	
k_3	71.0	66.7	63.3	
R	9.5	0.9	7.0	

由表2可见,各因素对米糠谷蛋白提取率影响大小依次为A>C>B,即微波功率>微波温度>微波时间,最优方案为A₃B₃C₂。结合单因素试验结

果,最终确定最优工艺方案为A₃B₂C₂,即微波功率800 W、微波时间15 min、微波温度40℃。在最优方案下,米糠谷蛋白提取率为73.1%。

2.3 微波处理对米糠谷蛋白性质的影响

2.3.1 微波处理前后米糠谷蛋白的扫描电镜图

采用扫描电镜观察微波处理前后米糠谷蛋白表面形貌,结果见图4。

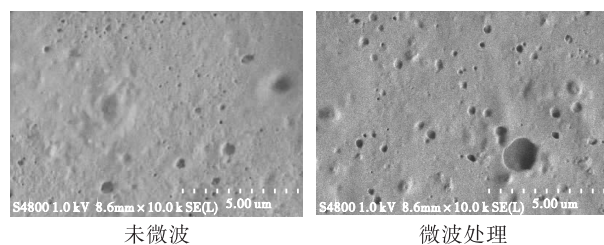


图4 微波处理前后米糠谷蛋白扫描电镜图

由图4可知,米糠谷蛋白表面多孔,经过微波处理后蛋白表面孔隙增大,其原因可能与微波处理后碱液提取的米糠谷蛋白非共价键的相互作用增强有关。

2.3.2 微波处理对米糠谷蛋白结构的影响

图5是微波处理前后米糠谷蛋白的红外光谱图,表3为米糠谷蛋白的圆二色谱测定结果。由图5可见,微波处理前后的米糠谷蛋白的红外光谱图走势相似,但在二级结构上存在很大差异。米糠谷蛋白在1700 cm⁻¹附近的振动峰是由C—N伸缩振动和N—H面内变形振动所形成的α-螺旋和β-折叠,在3000 cm⁻¹附近的振动峰均是由—CH₂和—CH₃伸缩振动引起的。蛋白的二级结构中α-螺旋和β-折叠是比较有序的蛋白结构,具有较高的稳定性^[15]。由表3可知,微波处理后,米糠谷蛋白α-螺旋和β-转角向β-折叠转移,β-折叠含量明显提高,因此微波处理后的米糠谷蛋白有较高的稳定性。

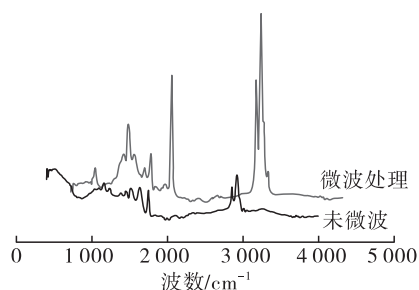


图5 微波处理前后米糠谷蛋白的红外光谱图

表3 米糠谷蛋白的圆二色谱测定结果 %

提取方法	α-螺旋	β-折叠	β-转角	无规则卷曲
Osborne法	28.4	0	34.1	37.5
本方法	22.5	16.9	25.6	35.0

2.3.3 微波处理对米糠谷蛋白功能性质的影响 (见表4)

米糠谷蛋白是具有较大空间结构的大分子类物质,分子内的大量基团在受到外界影响时会发生某些变化,进而影响其功能性质^[11]。由表4可知,米糠经过微波处理后所提取的米糠谷蛋白功能性质发生改变,溶解性提高了8.12个百分点,持水性升高了0.89个百分点,持油性降低了0.84个百分点。郝天舒等^[12]研究发现,微波处理提高了米糠蛋白的溶解性,可能是与蛋白氨基酸分布有关。米糠经过微波处理后,米糠谷蛋白二级结构被破坏,导致亲水基团

暴露,加剧了蛋白质分子的氢键和离子基团的水合作用,蛋白持水性升高。微波处理后米糠谷蛋白起泡性增加了20.41个百分点,泡沫稳定性则降低了21.66个百分点。这可能是因为微波处理后,米糠谷蛋白结构展开,更易吸附到空气-水界面上,形成泡沫,这与Adam等^[13]的研究结果一致。微波处理后,米糠谷蛋白乳化稳定性增加了5.50个百分点,但乳化活性降低了4.61个百分点,这可能是微波处理破坏了米糠谷蛋白结构,致使疏水基团疏远水相,从而降低了乳化活性^[14]。

表4 微波处理对米糠谷蛋白功能性质的影响

提取方法	溶解性/%	持水性/(g/g)	持油性/(g/g)	起泡性/%	泡沫稳定性/%	乳化活性/(m ² /g)	乳化稳定性/min
Osborne 法	50.45 ± 0.01	2.55 ± 0.02	3.71 ± 0.01	37.00 ± 0.01	83.21 ± 0.11	29.14 ± 0.02	45.00 ± 0.01
本方法	58.57 ± 0.02	3.44 ± 0.04	2.87 ± 0.02	57.41 ± 0.06	61.55 ± 0.14	24.53 ± 0.04	50.50 ± 0.05

2.3.4 微波处理对米糠谷蛋白表面疏水性的影响 (见图6)

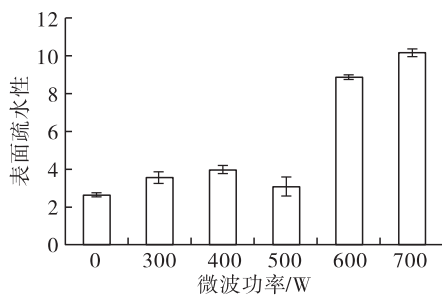


图6 微波功率对米糠谷蛋白表面疏水性的影响

由图6可知,随着微波功率的增加,米糠谷蛋白表面疏水性总体逐渐增加,且均高于未微波处理的。表明微波处理后,蛋白质结构展开,内部的疏水基团暴露于蛋白质分子表面。

3 结论

本研究采用微波辅助Osborne法提取米糠谷蛋白,在微波功率800W、微波时间15min、微波温度40℃条件下,米糠谷蛋白提取率达到73.1%。微波处理后米糠谷蛋白 α -螺旋和 β -转角向 β -折叠转移, β -折叠含量明显提高。微波处理后,米糠谷蛋白的溶解性提高了8.12个百分点,持水性升高了0.89个百分点,起泡性增加了20.41个百分点,乳化稳定性增加了5.50个百分点,持油性降低了0.84个百分点,乳化活性降低了4.61个百分点,泡沫稳定性降低了21.66个百分点。米糠谷蛋白表面疏水性随微波功率增加总体逐渐增大。本研究可为米糠谷蛋白的工业化制备及在各种食品配方中的应用提供理论支撑。

参考文献:

- [1] FABINA C, JU Y H. A review on rice bran protein: its properties and extraction methods [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2017, 51(9): 178 - 182.
- [2] OSBORNE T B. The vegetable proteins [M]. London: Longmans, Green and Company, 1924: 154 - 156.
- [3] WU W, LI F, WU X J. Effects of rice bran rancidity on oxidation, structural characteristics and interfacial properties of rice bran globulin [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2021, 110: 106123 [2021 - 02 - 22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.10.6123>.
- [4] 殷东. 米糠蛋白和大米蛋白功能特性的对比研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [5] 杨立风, 方双杰, 吴茂玉, 等. 微波辅助提取黑枸杞多酚及抗氧化活性研究 [J]. 食品科技, 2020, 45(2): 258 - 263, 271.
- [6] JIANG Y L, YIN H, ZHENG Y R, et al. Structure, physicochemical and bioactive properties of dietary fibers from *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz. seeds using ultrasonication/shear emulsifying/microwave - assisted enzymatic extraction [J/OL]. Food Res Int, 2020, 136: 109348 [2021 - 02 - 22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109348>.
- [7] 尤翔宇. 过氧自由基和丙二醛氧化对米糠蛋白结构、功能性质和消化性质的影响 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [8] JUTTULAPA M, PIRIYAPRASARTH S, TAKEUCHI H, et al. Effect of high - pressure homogenization on stability of emulsions containing zein and pectin [J]. Asian J Pharm Sci, 2017, 12(1): 21 - 27.

- [46] TRINCHESE G, CAVALIERE G, CIMMINO F, et al. Decreased metabolic flexibility in skeletal muscle of rat fed with a high - fat diet is recovered by individual CLA isomer supplementation via converging protective mechanisms [J/OL]. *Cells*, 2020, 9(4):823 [2021 - 03 - 11]. <https://doi.org/10.3390/cells9040823>.
- [47] CORINO C, GIANCAMILLO A D, ROSSI R, et al. Dietary conjugated linoleic acid affects morphofunctional and chemical aspects of subcutaneous adipose tissue in heavy pigs[J]. *J Nutr*, 2005,135(6):1444 - 1450.
- [48] 郭常虹. 反10,顺12-共轭亚油酸对猪不同部位前脂肪细胞增殖、分化及脂肪代谢关键酶的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [49] YEGANEH A, TAYLOR C G, TWOREK L, et al. *Trans* - 10, *cis* - 12 conjugated linoleic acid (CLA) interferes with lipid droplet accumulation during 3T3 - L1 preadipocyte differentiation[J]. *Int J Biochem Cell Biol*, 2016,76:39 - 50.
- [50] CHAPLIN A, PARRA P, SERRA F, et al. Conjugated linoleic acid supplementation under a high - fat diet modulates stomach protein expression and intestinal microbiota in adult mice [J/OL]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0125091 [2021 - 03 - 10]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125091>.
- [51] MARQUES T M, WALL R, O'SULLIVAN O, et al. Dietary *trans* - 10, *cis* - 12 - conjugated linoleic acid alters fatty acid metabolism and microbiota composition in mice[J]. *Br J Nutr*, 2015,113(5):728 - 738.
- [52] CLÉMENT L, POIRIER H, NIOT I, et al. Dietary *trans* - 10, *cis* - 12 conjugated linoleic acid induces hyperinsulinemia and fatty liver in the mouse[J]. *J Lipid Res*, 2002,43(9):1400 - 1409.
- [53] PANG K, ZHU Z, ZHU S, et al. A high dose of conjugated linoleic acid increases fatty liver and insulin resistance in lactating mice[J/OL]. *PLoS One*, 2019,14(8): e0214903 [2021 - 03 - 10]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214903>.
- [54] ELIASSON J H, BIRGISDOTTIR B E, GUDMUNDSSON L S. A case of complete scotoma following intake of conjugated linoleic acid supplement [J]. *J Head Face Pain*, 2018, 58(5):761 - 763.
- [55] MOREIRA T G, HORTA L S, GOMES - SANTOS A C, et al. CLA - supplemented diet accelerates experimental colorectal cancer by inducing TGF - β - producing macrophages and T cells[J]. *Mucosal Immunol*, 2019, 12(1):188 - 199.
- [56] HUNT W T, KAMBOJ A, ANDERSON H D, et al. Protection of cortical neurons from excitotoxicity by conjugated linoleic acid [J]. *J Neurochem*, 2010, 115(1):123 - 130.
- [57] RITCHEY M E, HARDING A, HUTER S, et al. Cardiovascular safety during and after use of phentermine and topiramate [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2019,104(2):513 - 522.
- [58] SHUKLA A P, KUMAR R B, ARONNE L J. Lorcaserin HCl for the treatment of obesity [J]. *Expert Opin Pharmacother*, 2015,16(16):2531 - 2538.
- [59] TERASAWA N, OKAMOTO K, NAKADA K, et al. Effect of conjugated linoleic acid intake on endurance exercise performance and anti - fatigue in student athletes [J]. *J Oleo Sci*, 2017, 66(7):723 - 733.

(上接第52页)

- [9] SONG Y L, QIN R Q, YANG S M, et al. Improvement of foaming and emulsifying properties of gluten by conjugation with fructose through Maillard reaction [J]. *Grain Oil Sci Technol*, 2018,1(3):119 - 125.
- [10] 林素丽. 超高压处理对米糠蛋白功能及结构特性的影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [11] 黎卫. 芡实蛋白组分的结构表征及其理化性质研究[D]. 江苏无锡:江南大学,2015.
- [12] 郝天舒,王长远. 微波处理对米糠蛋白结构及功能性的影响[J]. *天然产物研究与开发*, 2015,27(5):774 - 779,784.
- [13] ADAM J, QUEK H, BLAKE A, et al. Structure and function characterization of the $\alpha 1\alpha 2$ motifs of *Streptococcus pyogenes* M protein in human plasminogen binding [J]. *J Mol Biol*, 2019,431(19):3804 - 3813.
- [14] ZHANG M, HUANG T S, MU T H. Improvement of thermal, microwave and ultrasonication pretreatment on the production of antioxidant peptides from sweet potato protein via in vitro gastrointestinal digestion [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2019,54(7):2338 - 2345.
- [15] 吴伟,吴晓娟,蔡勇建,等. 米糠贮藏期间米糠谷蛋白结构变化的研究[J]. *中国粮油学报*, 2017,32(7):98 - 102,120.