李政奇, 孙卓妍, 张秀清, 等. 盐溶法制备菜籽蛋白的工艺优化及其理化特性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 280−288. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070313

LI Zhengqi, SUN Zhuoyan, ZHANG Xiuqing, et al. Optimization of Rapeseed Protein Preparation by Salt Extraction and Its Physiochemical Properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 280−288. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070313

· 工艺技术 ·

盐溶法制备菜籽蛋白的工艺优化及其理化特性研究

李政奇[1,2], 孙卓妍[1,2], 张秀清[2], 裴海生[1], 师建芳[1], 李媛媛[1], 胡雪芳[1], 翟晓娜[1,*]

（1.农业农村部规划设计研究院 农业农村部农产品产地初加工重点实验室, 北京 100121;
2.中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083）

摘　要: 本文以冷榨脱皮菜籽饼为原料，采用单因素及响应面试验系统优化了盐溶法制备菜籽蛋白的工艺，并与碱溶酸沉法菜籽蛋白的物化特性进行比较研究。结果表明，在对原料进行植酸酶-含水乙醇预处理的基础上，盐溶法制备菜籽蛋白的最佳工艺参数为：0.75 mol/L 离子强度的 $CaCl_2$ 提取介质、pH6.5、料液比 1∶12 g/mL、53 ℃ 条件下浸提 90 min，该条件下蛋白溶出率为 27.96%；经透析后得到的菜籽蛋白与碱溶酸沉法菜籽蛋白相比，具有较高的蛋白纯度（77.12%±0.63%）及较低的植酸含量（0.13%±0.01%）；此外，SDS-PAGE 结果显示盐溶法菜籽蛋白富含白蛋白，二级结构中以 α-螺旋和 β-转角为主，结构兼具稳定性和灵活性，同时具有较优的溶解性能。本实验为盐溶法制备高品质菜籽蛋白提供了基础。

关键词: 油菜籽, 盐溶法, 蛋白品质, 理化特性
中图分类号: TS2229　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0280−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070313　　本文网刊:

Optimization of Rapeseed Protein Preparation by Salt Extraction and Its Physiochemical Properties

LI Zhengqi[1,2], SUN Zhuoyan[1,2], ZHANG Xiuqing[2], PEI Haisheng[1], SHI Jianfang[1], LI Yuanyuan[1], HU Xuefang[1], ZHAI Xiaona[1,*]

（1.Key Laboratory of Agro-products Primary Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Academy of Agricultural Planning and Engineering, MARA, Beijing 100121, China;
2.College of Food Science & Nutrition Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China）

Abstract: The aim of the study was to provide a reference basis for the preparation of high-quality rapeseed protein by salt-extraction. Cold-pressed dehulled rapeseed meal was used. The salt-extraction process was optimized using single-factor experiment and response surface experiments analysis, and the physicochemical properties were investigated and compared with the protein obtained by alkali-extraction and acid-precipitation. The results showed that the optimal conditions were as follows, pretreatment with phytase and hydrated ethanol, 0.75 mol/L $CaCl_2$ extracting medium, pH6.5, solid-liquid ratio 1∶12 g/mL, temperature 53 ℃ and extraction time 90 minutes, and achieving a protein solubility of 27.96% under these conditions. Furthermore, the resulted rapeseed protein achieved a higher protein purity at 77.12%±0.63% and a lower phytic acid content of 0.13%±0.01%, in comparison to the protein obtained by alkali-extraction and acid-precipitation method. What's more, SDS-PAGE analysis revealed that the main components of salt-extracted protein were albumin. Its higher contents of α-helices and β-turns dominated its stable and flexible structure, also leading to better solubility. This experiment

收稿日期: 2025−07−25
基金项目: 农业农村部规划设计研究院双青课题（QD202416）; 国家重点研发计划项目（2024YFD2100301）。
作者简介: 李政奇（2001−）, 男, 硕士, 研究方向: 农产品副产物加工及应用, E-mail: 2434080489@qq.com。
*** 通信作者:** 翟晓娜（1989−）, 女, 博士, 高级工程师, 研究方向: 功能因子的挖掘及其稳态化, E-mail: zhaixiaona907@163.com。

provides a basis for using the salt-solution method to prepare high-quality rapeseed protein.

Key words: rapeseed; slat extraction; protein quality; physiochemical properties

粮食安全关系人类永续发展和前途命运，当前全球人口增长带来食物需求的刚性增长，预计到2032 年全球粮食消费将较基期值(2020~2022 年)增长 4%；蛋白质作为人体必需的主要营养素之一，高收入国家人均蛋白供应量将上升至 88.4 克/人/天，并主要依赖于动物蛋白[1]。我国《国民营养计划(2017-2030)》指出：到 2030 年，我国居民膳食中要减少 50% 动物蛋白摄入量。植物基食品作为动物性食品的有效补充，可有效缓解动物性食品生产带来的资源、环境、健康和伦理等方面压力，并有助于推动食物系统向营养健康转型[2]。波士顿咨询报告预测，到 2035 年替代蛋白市场规模有望达到 2900 亿美元，其中植物基制品的市场占比将达 69%[3]，植物蛋白市场前景广阔。我国植物蛋白资源丰富，其中油料约含有蛋白质 1753 万吨[4]。菜籽饼粕作为我国第一大油料作物油菜籽榨油的副产物，其蛋白质含量高、氨基酸组成平衡，是一种潜力巨大的食用替代蛋白[5]，但因其含有硫苷等抗营养物质，通常用于动物饲料或肥料，附加值较低。菜籽蛋白的制备方法主要包括 pH 分段控制法、盐溶法、醇法制备及反胶束制备等，并以碱溶酸沉法应用最为广泛[6]，但利用该方法制备的菜籽蛋白产品色泽深、抗营养因子含量高、溶解性差，且能耗高对环境不友好[7]，开发高品质菜籽蛋白的可持续制备技术是非常有必要的。

盐溶法作为目前唯一工业化制备可食用菜籽蛋白的方法，可通过调整提取液中盐离子浓度提高蛋白溶出效果，胶束沉淀或直接膜过滤获得高品质菜籽蛋白；Burcon、DSM 公司等通过盐法浸提结合超滤、膜过滤等方法制备的菜籽分离蛋白产品已获得 FDA 的 GRAS 认证[8−9]。此外，Fetzer 等[10] 在系统探究盐溶法制备菜籽蛋白中发现，酸性提取环境中添加 0.25 mol/L NaCl 可有效提高蛋白得率，而碱性浸提条件下盐离子浓度的增大反而会减弱蛋白的浸提效果；梅钰琪等[11] 则发现酸性环境中(pH5.5)低浓度的 NaCl 有利于提高菜籽蛋白得率，并结合超滤可显著降低目标蛋白中的植酸含量，且微波热压处理菜籽粕的蛋白得率偏低；方雪莲等[12] 以冷榨脱脂菜籽饼粕为原料，利用弱酸(pH6.5)高盐(150 mmol/L $MgCl_2$)提取酸沉的方法制备了植酸低、色泽浅和气味佳的菜籽蛋白。即菜籽饼粕原料的处理方式、盐离子种类及离子强度、pH 等因素均会不同程度地影响蛋白质的提取效果。因此，本文在前人研究的基础上，以脱皮冷榨菜籽饼为原料，在进行抗营养因子脱除预处理的基础上，通过单因素与响应面分析系统探究了盐离子种类、离子强度、提取 pH 等参数对菜籽蛋白提取的影响，并以碱溶酸沉菜籽蛋白及市售菜籽蛋白为对照，比较分析所获菜籽蛋白的物化特征，以期为盐溶法制备菜籽蛋白提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

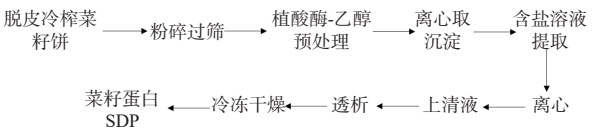
脱皮冷榨菜籽饼　贵州长顺八妹农副产品开发有限公司提供；菜籽蛋白(记作 CAP)　陕西别样红生物科技有限公司；植酸酶(5 U/mg)、黑芥子硫苷酸钾一水、氯化钯、单宁酸　上海源叶生物科技有限公司；Bradford 法蛋白浓度测定试剂盒、SDS-PAGE 凝胶制备试剂盒、预染蛋白 Marker(14.4~97.4 kDa)、4×蛋白上样缓冲液(含 DTT)　北京索莱宝科技有限公司；盐酸容量分析用溶液标准物质(0.1006 mol/L)　北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司；其他试剂均为国产分析纯。

BJ-150 多功能粉碎机　德清拜杰电器有限公司；卤素水分仪、FE28 型 pH 计　梅特勒托利多科技(中国)有限公司；TGL-24M 高速冷冻离心机　湖南平凡科技有限公司；LGJ-30F 冷冻干燥机　北京松源华兴科技发展有限公司；UV-1780 型紫外可见分光光度计　岛津仪器(苏州)有限公司；KN680 全自动凯氏定氮仪　山东海能科学仪器有限公司；YS3010 分光测色仪　深圳市三恩时科技有限公司；NS-90Z Plus 纳米粒度及电位分析仪　海欧美克仪器有限公司；FEI Tecnai G2 F30 场发射透射电子显微镜　美国 FEI 公司；Olympus FV3000 激光共聚焦显微镜　奥林巴斯株式会社；Apreo C 场发射扫描电子显微镜　赛默飞世尔科技(中国)有限公司；DYZC-MINI4 型电泳仪、WD-9143B 凝胶成像系统　北京六一生物科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　盐溶法制备菜籽蛋白的工艺优化

1.2.1.1　盐溶法制备菜籽蛋白工艺流程



粉碎过筛：取适量脱皮冷榨菜籽饼，粉碎过 60 目筛，取筛下物，即脱皮冷榨菜籽饼粉备用。

植酸酶-乙醇预处理：在前期实验基础上，采用植酸酶复合乙醇前处理制备脱毒菜籽饼。取适量脱皮冷榨菜籽饼粉，与水按料液比 1∶8 g/mL 混合，按 1 U/g 加入植酸酶，用 1 mol/L 盐酸调节溶液 pH5 后在 50 ℃ 条件下酶解 1 h 后，4 ℃ 条件下离心(8000 r/min、15 min)取沉淀，进一步用 70% 乙醇在料液比 1∶8 g/mL、pH5、60 ℃ 条件下处理 1 h。

离心取沉淀：上述处理混合液，同样条件下离心取沉淀，沉淀即为脱毒菜籽饼。

含盐溶液提取：以脱毒菜籽饼为原料，用含盐溶液进行蛋白提取；提取液离心取上清，上清经透析、冷冻干燥后即获得菜籽蛋白。

1.2.1.2 菜籽蛋白盐溶法工艺优化 单因素实验：在菜籽饼进行脱毒前处理基础上，以盐溶过程中蛋白质溶出率为主要评价指标，依次考察盐种类、离子强度、pH、料液比、温度及时间各因素的影响。具体为，固定离子强度 0.5 mol/L、提取 pH6、料液比 1∶8 g/mL、浸提温度 50 ℃、浸提时间 90 min，盐种类为 NaCl、KCl、$MgCl_2$、$CaCl_2$、Na_2SO_4、K_2SO_4、$MgSO_4$；固定 $CaCl_2$ 提取介质、提取 pH6、料液比 1∶8 g/mL、浸提温度 50 ℃、浸提时间 90 min，离子强度为 0、0.05、0.25、0.5、0.75、1 mol/L；固定离子强度为 0.75 mol/L $CaCl_2$、料液比 1∶8 g/mL、浸提温度 50 ℃、浸提时间 90 min，提取 pH 为 5.5、6、6.5、7、8；固定离子强度为 0.75 mol/L $CaCl_2$、提取 pH6.5、浸提温度 50 ℃、浸提时间 90 min，料液比为 1∶8、1∶12、1∶16、1∶20 g/mL；固定离子强度为 0.75 mol/L $CaCl_2$、浸提 pH6.5、料液比 1∶12 g/mL、浸提时间 90 min，浸提温度 30、40、50、60、70 ℃；固定离子强度为 0.75 mol/L $CaCl_2$、提取 pH6.5、料液比 1∶12 g/mL、浸提温度 50 ℃，浸提时间为 30、60、90、120、150 min。

响应面优化试验：在单因素实验的基础上，确定盐离子种类为 $CaCl_2$、料液比为 1∶12 g/mL、提取时间 90 min，利用响应面分析法对 pH、离子强度、温度 3 个因素进一步优化。根据 Box Behnken 试验设计原理，选取 pH(A)、离子强度(B)及温度(C)为自变量，以蛋白质溶出率为响应值(Y)进行三因素三水平的响应面分析，优化菜籽蛋白盐溶法工艺条件，试验因素与水平设计见表 1。

表 1 响应面试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface experiment

水平	因素		
	A: pH	B: 离子强度(mol/L)	C: 温度(℃)
−1	5.5	0.5	40
0	6.5	0.75	50
1	7.5	1	60

以最佳盐溶法工艺进行菜籽蛋白提取，离心(8000 r/min，20 min，4 ℃)后取上清液，用透析袋(3.5 kDa)在蒸馏水中透析 2 d 后，取截流液冷冻干燥得菜籽蛋白，记作 SDP。

1.2.2 碱溶酸沉法制备菜籽蛋白 参考张杰等[13]方法制备碱溶酸沉蛋白，取适量过 60 目筛的脱皮冷榨菜籽饼粉，脱毒处理后，按料液比 1∶10 与去离子水混合，用 NaOH 调节体系 pH 至 12，在 60 ℃ 条件下浸提 90 min 后，离心(8000 r/min，20 min，4 ℃)取上清液，用 1 mol/L 的 HCl 调节 pH 至 4.5，静置 4 h 后离心(8000 r/min，10 min，4 ℃)取沉淀，冷冻干燥后的菜籽蛋白样品，记作 AAP。

1.2.3 菜籽饼理化指标测定

1.2.3.1 菜籽饼水分和蛋白质含量的测定 采用卤素水分仪测定菜籽饼样品的水分含量。参考 GB 5009.5-2016 中凯氏定氮法(蛋白质换算系数 N=6.25)测定原料脱皮冷榨菜籽饼和脱毒菜籽饼的蛋白质含量。

1.2.3.2 菜籽饼中抗营养因子含量的测定 硫苷含量：采用氯化钯方法测定样品中的硫苷含量[14]，以黑芥子硫苷酸钾一水标准品绘制标准曲线为 Y=0.55637X+0.03658，R^2=0.9996(X 表示黑芥子硫苷酸钾一水浓度(μmol/mL)、Y 表示溶液吸光度)。准确称取脱皮冷榨菜籽饼或脱毒菜籽饼 0.1 g 于 15 mL 试管中，沸水浴中干蒸 l0 min 灭活，加入约 90 ℃ 的热水 8 mL 并蒸煮 40 min，静置冷却后用水稀释至 10 mL，过滤后取 2 mL 与 0.1% 羧甲基纤维素钠 3 mL 和 4.0 mmol/L 氯化钯 2 mL 混合；在室温反应 1 h 后，于 520 nm 处测定吸光值，根据标准曲线求出试样中硫苷的含量。

植酸含量：采用三氯化铁滴定法测定样品中的植酸含量，称取样品 0.05 g 加入 25 mL 稀盐酸(pH2)，混匀后 60 ℃ 条件下保持 30 min，加入 0.25 mL 0.3% 的磺基水杨酸溶液，用 0.02 mol/L 的三氯化铁溶液滴定至紫红色且颜色不褪[15]。

$$植酸含量(\%)=\frac{C\times V\times 0.2357}{W}\times 100 \qquad 式(1)$$

式中：C 为三氯化铁溶液的浓度(mol/L)；V 为滴定消耗的三氯化铁溶液体积(mL)；0.2357 代表每分子植酸可配合 2.8 个 Fe^{3+}，即 1 mmol 三氯化铁消耗 0.2357 g 植酸；W 为样品的质量(g)。

总酚含量：参考赵秋伶等[16]方法采用福林酚显色法测定菜籽饼中的总酚含量，并作适当修改。具体为，取不同浓度的没食子酸校准品 1 mL 与 0.5 mL 福林酚试剂、2 mL 的 7.5% 碳酸钠溶液和 7.5 mL 的超纯水涡旋混匀，70 ℃ 保持 30 min 后，在 750 nm 下测定吸光值，得标准曲线 Y=0.00975X+0.00616，R^2=0.998(X 表示没食子酸浓度(mg/mL)、Y 表示溶液吸光度)。取待测样品 1 g，加入 10 mL 70% 的甲醇于室温下涡旋混合 5 min，离心取上清(6000 r/min，20 min)，取 1 mL 上清液按上述方法处理，测定其在 750 nm 下的吸光值，根据标准曲线求出试样中总酚的含量。

1.2.3.3 菜籽及菜籽饼的微观结构 采用激光共聚焦显微镜(confocal laser scanning microscopy，CLSM)对菜籽、脱皮冷榨菜籽饼及脱毒菜籽饼的微观结构进行观察[17]。取样品加入 1 mL 2.5% 戊二醛固定 24 h 后，使用冰冻切片机将样品切成 30 μm 的切片，依次使用 0.02%FITC、0.01% 尼罗红和 1% Calcofluor White Stain 对切片进行染色，室温避光染色 15 min，分别在 488、545 和 405 nm 下进行观察。

1.2.4　盐溶过程菜籽蛋白溶出率的测定　采用 Bradford 法测定不同盐溶条件下菜籽蛋白的溶出量，得到蛋白质浓度的标曲为：Y=1.95901X+0.002322，R^2=0.9925（X 表示 BSA 当量（mg）、Y 表示溶液吸光度）。

$$蛋白质溶出率(\%)=\frac{盐溶液中BSA当量}{脱皮冷榨菜籽饼蛋白质含量}\times 100$$

式（2）

1.2.5　菜籽蛋白提取溶液的形貌观察　采用电子显微镜（transmission electron microscope，TEM）测定最佳盐溶条件下菜籽蛋白提取上清液的形貌特征，提取液过 0.22 μm 膜后于碳膜铜网上沉淀 10 min，滴加醋酸双氧铀染色液染色 2 min，自然晾干，在 300 kV 加速电压下进行观察。

1.2.6　不同菜籽蛋白理化指标测定

1.2.6.1　菜籽蛋白色泽分析　采用 YS3010 分光测色仪测定菜籽蛋白样品的 L^*、a^*、b^*值，测试参数为 D65 光源、直径 8 mm 测量区、10°观测角，进行白板校正和黑板校正后，取适量样品粉末平铺在桌面上，将粉末压紧实后置于测色仪测量口下端，保持稳定并进行测定。

1.2.6.2　蛋白质的基本组成　参照上述 1.2.3.1 和 1.2.3.2 的方法测定 SDP（盐溶透析蛋白）、AAP（碱溶酸沉蛋白）、CAP（市售菜籽蛋白）三种不同菜籽蛋白的蛋白质含量及抗营养因子含量。

1.2.6.3　SDS-PAGE 凝胶电泳检测　参照 Wang 等[18] 的实验方法进行 SDS-PAGE 凝胶电泳，并作适当修改。具体方法为，配制 5% 的浓缩胶和 12% 的分离胶，取适量蛋白溶液与上样缓冲液 1∶1 等体积混合，煮沸 5 min 后离心（6000 r/min，5 min），取上清液 10 μL 进行上样。在恒压下进行电泳操作，初始电压 80 V 跑 30 min 调至 120 V。电泳结束后采用考马斯亮蓝快速染色液过夜染色，去离子水脱色至条带清晰。

1.2.6.4　傅里叶红外光谱（fourier transform infrared spectrometer，FTIR）测定　采用 FTIR 测定不同蛋白质的二级结构，称取一定量样品与 KBr 以 1∶10 混合均匀，压薄片后于红外光谱仪中做全波段（400~4000 cm^{-1}）扫描，然后用 Omnic 软件取 1600~1700 cm^{-1} 波段图谱进行放大，用 Peak Fit 4.12 软件分析蛋白质的二级结构。

1.2.6.5　菜籽蛋白的溶解特性　参照冶梓芩等[19] 的方法并作适当修改，取适量样品分散在去离子水中配制 1 mg/mL 的样品溶液，常温下混匀振荡 1 h 后，用 1 mol/L 的 HCl 和 1 mol/L 的 NaOH 调整溶液 pH 至 3~12 间不同值，常温下继续混匀 0.5 h，随后离心 10 min（4 ℃，8000 r/min）取上清液，用 Bradford 法测定上清液中蛋白质含量，并按下式计算不同 pH 环境中蛋白质的溶解度：

$$蛋白质溶解度(\%)=\frac{上清液中蛋白质当量}{样品中蛋白质含量}\times 100$$

式（3）

同时测定不同 pH 条件下蛋白质溶液中的 Zeta 电位。

1.3　数据处理

所有实验均重复 3 次，结果表示为平均值±标准差，采用 SPSS 20 对实验数据进行处理和 ANOVA 显著性分析，$P<0.05$ 为显著性差异，采用 Origin 2021 软件作图。

2　结果与分析

2.1　植酸酶-乙醇预处理对菜籽饼的影响

高抗营养因子含量是限制菜籽饼广泛应用的主要因素之一[20]。如表 2 所示，植酸酶联合含水乙醇预处理可有效脱除菜籽饼中的抗营养因子，处理后的菜籽饼其植酸、硫苷和总酚含量可分别降低至约 0.84%、27.91 μmol/g 和 0.65 mg/g，符合 GB/T 22514-2008《菜籽粕》中低硫苷菜籽粕（硫甙含量≤35.0 μmol/g）的要求，同时伴随着粗蛋白含量提升，这可能也与菜籽饼中部分脂肪的脱除有关。如图 1 所示，油菜籽细胞内部被蛋白质和油脂充斥，其中部分油脂沿细胞壁均匀分布，且蛋白质尺寸明显大于油脂（图 1a）；经脱皮压榨后，原有细胞结构破碎、油脂与蛋白从细胞中释放，大部分残余脂肪与蛋白紧密结合成均一的球状（图 1b），即两者间存在较强的亲和力[17]；进一步进行抗营养因子脱除处理后，可明显发现大量的脂肪与蛋白复合物被脱除。

表 2　菜籽饼的组分及含量

Table 2　Chemical composition and content of rapeseed cakes

原料	水分（%）	粗蛋白（%）	植酸（%）	硫苷（μmol/g）	总酚（mg/g）
脱皮冷榨菜籽饼	7.28±0.13^a	38.44±0.26^b	4.0±0.16^a	127.37±1.08^a	17.61±0.02^a
脱毒菜籽饼	5.97±0.23^b	40.14±0.33^a	0.84±0.01^b	27.91±0.18^b	0.65±0.04^b

注：不同小写字母表示同一指标数据差异显著（$P<0.05$），表5~表6同。

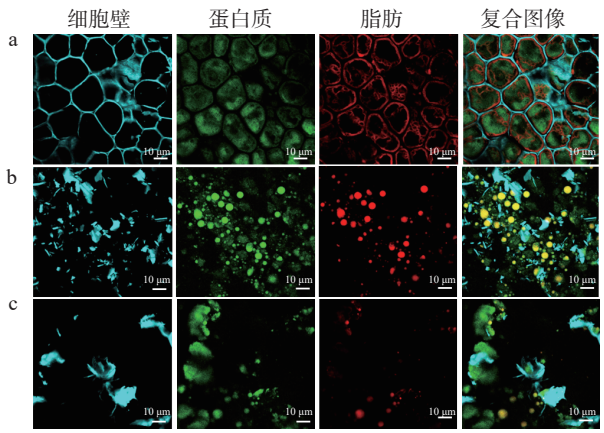


图 1　菜籽及菜籽饼的微观结构 CLSM 图

Fig.1　CLSM images of rapeseed and rapeseed cakes

注：a：油菜籽，b：脱皮冷榨菜籽饼，c：脱毒菜籽饼。

2.2 菜籽蛋白盐溶条件优化

2.2.1 菜籽蛋白盐溶提取单因素实验 盐离子种类可直接影响蛋白质的盐溶效果[21]。由图 2a 可知, 相同离子强度条件下盐离子种类一定程度上会影响菜籽蛋白的溶出效果, 其中 NaCl 溶液的蛋白溶出率最高为 14.33%±0.30%, 其次是 $CaCl_2$ 溶液, 且两者之间无显著性差异(P>0.05), 相比之下 $MgSO_4$ 的蛋白溶出率明显低于其他盐类; 此外, 相同阳离子盐体系中, 氯化盐的菜籽蛋白促溶效果优于硫酸盐, 与 Hofmeister 效应的阴离子次序相一致[22]; 再者, 利用 $CaCl_2$ 提取的蛋白溶液中植酸含量显著低于其他盐类处理组(P<0.05), 仅为 0.12%±0.003%, 这可能是因为植酸与钙离子络合, 改变了植酸的存在形式使其沉淀[23]。综合考虑 $CaCl_2$ 处理时高蛋白溶出率及低植酸残留率, 选择 $CaCl_2$ 进行盐溶法提取蛋白的优化。

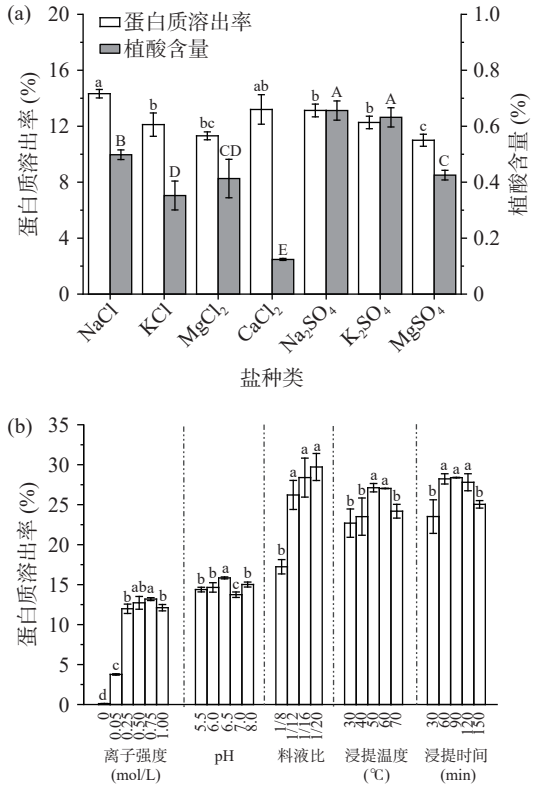


图 2 提取因素对菜籽蛋白溶出效果的影响

Fig.2 Influences of extraction parameters on rapeseed protein extraction effect

注: 不同字母表示同一指标数据差异显著(P<0.05)。

在确定盐离子种类的基础上, 进一步分析离子强度等参数对蛋白溶出效果的影响, 结果如图 2b 所示。首先, 蛋白质溶出率随离子强度的增大呈现先升高后降低的趋势, 离子强度为 0~0.75 mol/L 时, 蛋白质的溶出率由 0.12%±0.02% 提高至 13.19%±0.18%, 随后随着离子强度的增大, 蛋白溶出率略有下降, 这与方雪莲等[12] 利用 $MgCl_2$ 提取菜籽蛋白的研究趋势相一致; 这可能是因为随着离子强度的增大、即盐离子浓度的增加, 蛋白质与介质中水分子相互作用增强, 从而促进蛋白质溶解, 但当离子强度进一步增大时, 离子直接改变水体结构, 降低其与蛋白质的相互作用, 从而抑制蛋白质的溶出[24], 因此优选 0.75 mol/L 的离子强度。其次, 蛋白质溶出率在 pH6.5 条件下达到最高为 15.84%±0.12%, 并在 pH7 条件下表现最低为 13.74%±0.34%(P<0.05), 推测与菜籽 12S 球蛋白等电点约为 7.2 有关[25], 因此优选 pH6.5 进行下一步实验。再者, 当料液比从 1∶8 增加至 1∶12 时, 蛋白溶出率从 17.23%±0.90% 显著增加至 26.22%±1.81%(P<0.05), 当料液比继续增加时, 料液比 1∶12、1∶16、1∶20 的溶出率分别为 26.22%±1.81%、28.39%±2.44%、29.71%±1.68%, 蛋白溶出率虽逐步增高, 但增速明显放缓, 且组间无显著性差异(P>0.05); 已知料液比的增加必然会使物料与介质充分接触从而促进蛋白的溶出转移, 但考虑到实际生产中料液比不宜过大, 因此优选 1∶12 为最佳料液比。进一步, 蛋白溶出率受浸提温度和时间的影响相近, 均表现为先增加后下降的趋势, 具体在 50 ℃ 时达到 27.13%±0.52%、在 90 min 的提取时间内提高至 28.39%±0.04%, 推测与蛋白质的溶出已达到平衡并趋于停滞有关[26], 且随着时间的延长, 已溶出的蛋白质可能会发生聚集沉淀从而导致蛋白质表观溶出率降低; 因此优选 90 min 为最佳浸提时间。

2.2.2 菜籽蛋白盐溶提取响应面试验 在单因素优化的基础上, 确定选用 $CaCl_2$ 溶液、料液比 1∶12、浸提时间 90 min, 利用响应面进一步对 pH、离子强度和温度进行优化。根据 Box-Behnken 原理进行 3 因素 3 水平试验设计, 试验方案和结果如表 3 所示。

表 3 响应面试验设计与结果

Table 3 Design and results of response surface experiment

试验号	A: pH	B: 离子强度	C: 温度	蛋白质溶出率(%)
1	0	−1	−1	23.967
2	−1	−1	0	22.087
3	0	0	0	27.360
4	0	0	0	27.903
5	1	−1	0	20.430
6	0	1	1	25.082
7	0	−1	1	24.300
8	0	0	0	28.765
9	1	1	0	20.333
10	0	0	0	27.297
11	0	1	−1	21.401
12	−1	1	0	21.822
13	−1	0	1	23.550
14	−1	0	−1	23.616
15	0	0	0	28.121
16	1	0	−1	20.265
17	1	0	1	23.179

2.2.2.1 蛋白质溶出率回归模型的建立与方差分析

利用 Design Expert8.0.6 软件对结果进行方差分析(表 4), 对拟合回归方程进行方差分析和显著性检验, 将数据进行二次多元回归拟合, 得到蛋白质溶出率(Y)与 pH(A)、离子强度(B)和浸提温度(C)

的回归方程为：$Y=-155.83067+45.7058A+49.3294B+0.70903C+0.168AB+0.0745AC+0.3348BC-3.8781A^2-45.489B^2-0.013586C^2$。由表 4 可知，模型 P 值<0.0001，表明模型拟合效果显著，能很好地反映变量与响应变量之间的关系；回归模型的失拟项为 0.7452，即失拟不显著，较好呈现了蛋白溶出率与 pH、离子强度和温度之间的关系；多元决定系数 R^2=0.9858，拟合效果较好。进一步的，一次项（A、C）和二次项（A^2、B^2、C^2）的 P 值均<0.01，交互项 AC、BC 的 P 值<0.05，即各变量系数对模型影响显著。

表 4　回归模型方差分析

Table 4　Analysis of variance for regression models

来源模型	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	132.62	9	14.74	53.84	<0.0001	**
A	5.90	1	5.90	21.54	0.0024	**
B	0.58	1	0.58	2.10	0.1903	
C	5.89	1	5.89	21.51	0.0024	**
AB	0.000705	1	0.000705	0.026	0.8770	
AC	2.22	1	2.22	8.11	0.0248	*
BC	2.80	1	2.80	10.24	0.0151	*
A^2	63.32	1	63.32	231.37	<0.0001	**
B^2	34.03	1	34.03	124.35	<0.0001	**
C^2	7.77	1	7.77	28.40	0.0011	**
残差	1.92	7	0.27			
失拟项	0.46	3	0.15	0.43	0.7452	
纯误差	1.45	4	0.36			
所有项	134.54	16				
R^2	0.9858	9	R^2_{adj}	0.9675		

注：*表示差异显著（P<0.05）；**表示差异极显著（P<0.01）。

2.2.2.2　响应面交互作用分析　在模型分析的基础上，进一步分析了盐溶工艺中交互因素对蛋白质溶出率的影响。如图 3 所示，模型中交互因素的响应曲面较为陡峭、开口向下，等高线呈椭圆形，菜籽蛋白溶出率随提取介质 pH（A）、离子强度（B）及提取温度（C）的增大呈现先升高后降低的趋势，说明在响应曲面上存在最大响应值，模型建立良好。同时结合拟合方程，交互作用 AC、BC 对蛋白质溶出率影响显著（P<0.05），二次项 A^2、B^2、C^2 对蛋白质溶出率影响极显著（P<0.01）。以蛋白质溶出率最大，分析优化得到的盐溶提取条件为 pH6.42、离子强度 0.75 mol/L、浸提温度 52.91 ℃，该条件下理论蛋白溶出率为 28.05%。考虑实际操作，经修正确定最终工艺参数为以 $CaCl_2$ 为盐离子进行提取，离子强度 0.75 mol/L、pH6.5、浸提温度 53 ℃、料液比 1∶12 g/mL、提取时间 90 min，此条件下进行 3 次平行实验，得到蛋白质溶出率为 27.96%±0.54%，与理论值相当，实验值和预测值具有良好的相关性，说明该响应面模型和最优化条件是有效的。

2.2.2.3　菜籽蛋白提取液形貌分析　对最优条件下的菜籽蛋白提取溶液进行形貌观察。由图 4 可知，盐溶提取液中菜籽蛋白大部分以均一的球状或类球

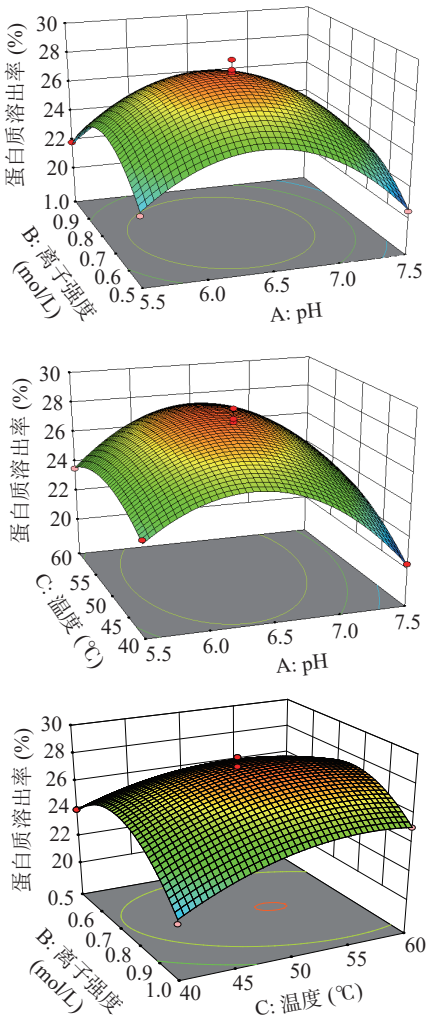


图 3　各试验因素响应曲面图

Fig.3　Surface plot of responses to each test factor

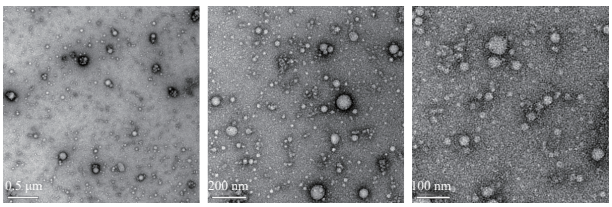


图 4　盐溶蛋白提取液的 TEM 图

Fig.4　TEM images of salt-extracted rapeseed protein solution

状形式存在（直径约 25 nm），少数呈短棒状或聚集簇，可能为蛋白聚集体，其中部分颗粒呈“珍珠项链”似的线性排列，考虑到蛋白提取液 pH 在 6 左右及大量 Ca^{2+}（0.25 mol/L）的存在，推测钙盐作为凝固剂促进了提取液中蛋白质的聚集[27]。

2.3　菜籽蛋白的理化性质

2.3.1　不同菜籽蛋白的色泽　不同制备方式所获菜籽蛋白的表观色泽如表 5 所示。可以看出，SDP 和 AAP 的 L^*、a^*、b^*间差异显著（P<0.05），其中 SDP 呈淡黄绿色、AAP 呈深黄褐色，与 CAP 的淡黄色存在明显的差距（图 5），通常认为酚类化合物在碱性条件下会形成酮类物质，而酮类物质会与蛋白质反应产生

表 5 不同菜籽蛋白的色泽

Table 5 Color of different kinds of rapeseed protein

样品	盐溶透析蛋白SDP	碱溶酸沉蛋白AAP	市售菜籽蛋白CAP
L^*	87.73±1.02^b	70.93±0.34^c	97.02±0.12^a
a^*	0.48±0.02^c	6.06±0.15^a	2.40±0.06^b
b^*	20.46±0.19^b	29.73±0.13^a	16.64±0.14^c
$\triangle E$	21.62±0.62^b	39.33±0.16^a	15.90±0.12^c

深绿色或棕色物质[28]。总体而言，盐溶透析法获得的菜籽蛋白色泽较碱提酸沉法的浅，与方雪莲等[12]利用弱酸高盐法获得的菜籽蛋白结果一致。



图 5 不同菜籽蛋白的光学照片

Fig.5 Optical images of different rapeseed proteins

注：从左向右依次为：盐溶透析蛋白、碱溶酸沉蛋白、市售菜籽蛋白。

2.3.2 不同菜籽蛋白的成分组成及含量 制备方式可以显著影响蛋白质的物质组成[6]。如表 6 所示，SDP 的粗蛋白含量为 77.12%±0.63%，显著高于 AAP（P<0.05），与前期盐溶法制备所获菜籽蛋白的纯度相近[11−12]，但显著低于 Jia 等[29]利用 NaCl 盐提超滤联合透析法制备的分离菜籽蛋白 94.39%±1.70% 的纯度，推测一方面与其弱碱性环境提取以及采用脱脂菜籽粕有关，另一方面盐溶蛋白提取液在经过超滤-透析双重处理后其纯度必然会提升。在抗营养因子含量方面，SDP 的植酸含量最低仅为 0.13%±0.01%，这可能是盐溶过程中 Ca^{2+}与植酸螯合沉淀的原因，而碱溶过程中植酸则会与蛋白一起溶出；但 SDP 的硫苷含量显著高于 AAP，这与方雪莲等[12]利用弱酸高盐法制备的菜籽蛋白中未检出硫苷、碱溶酸沉蛋白则含有 21.7 μmol/g 的结果相反；但另有研究指出，在酸性 pH（3~7）范围内硫苷的提取率几乎不受 pH 影响[30]，而在碱性条件下其提取率随 pH 升高显著增加[31]，即碱性环境更易于菜籽蛋白中硫苷的脱除；SDP 中的多酚含量与 CAP 相近，并均明显低于 AAP，这也是 AAP 颜色较深的原因。

表 6 菜籽蛋白的组分及含量

Table 6 Chemical composition and content of rapeseed protein

原料	粗蛋白(%)	植酸(%)	硫苷(μmol/g)	总酚(mg/g)
SDP	77.12±0.63^b	0.13±0.01^c	3.43±0.13^a	0.13±0.02^b
AAP	72.75±1.59^c	0.61±0.06^a	1.95±0.29^b	0.43±0.02^a
CAP	80.74±0.87^a	0.27±0.01^b	0.20±0.03^c	0.12±0.008^b

2.3.3 不同菜籽蛋白的 SDS-PAGE 采用 SDS-PAGE 分析盐溶透析法与碱溶酸沉法对制备菜籽蛋白的影响。前期研究报道，典型的菜籽蛋白主要由 12S 球蛋白（Cruciferin）和 2S 白蛋白（Napin）组成，其中球蛋白为碱性蛋白，由 α-多肽链（30.0~40.0 kDa）和 β-多肽链（20.0 kDa）以二硫键连接组成，白蛋白为酸溶蛋白，由两条多肽链（4~5 kDa 的小链和 9~10 kDa 的大链）组成[6,32]。从图 6 可看出，SDP 明显呈现出 3 条条带，分子量分别在~31、~20.1、<14.4 kDa，并以<14.4 kDa 条带为主，说明 SDP 中以 Napin 组分居多；相比，APP 与 CAP 样品中无明显<14.4 kDa 的条带，这主要是因为 Napin 为酸溶性蛋白且等电点约为 11[33]。

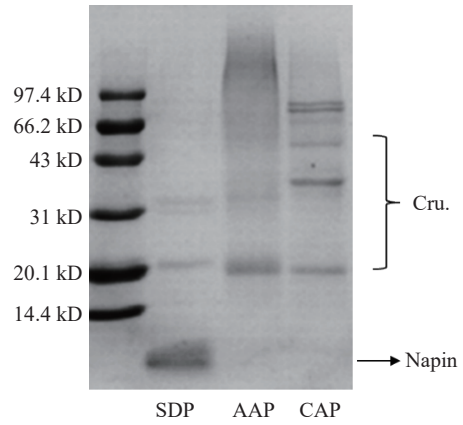


图 6 菜籽蛋白的 SDS-PAGE 图谱

Fig.6 SDS-PAGE diagram of rapeseed protein

2.3.4 不同菜籽蛋白的 FTIR 光谱 利用傅里叶红外光谱对蛋白质的二级结构进行分析，通常将光谱的酰胺 I 带（1600~1700 cm^{-1}）进行去卷积处理预测不同制备方法菜籽蛋白中 α-螺旋、β-折叠、β-转角和无规则卷曲的相对含量[34]。图 7 为三种菜籽蛋白 FTIR 谱图的二阶导光谱，其中 1612~1631 cm^{-1}、1689~1701cm^{-1} 与 β-折叠结构有关，1631~1645 cm^{-1} 与无规则卷曲有关，1645~1678 cm^{-1} 与 α-螺旋结构有关，1678~1689 cm^{-1} 与 β-转角结构有关。由表 7 可知，AAP 与 CAP 二级结构组成类似，具有较高含量 β-折

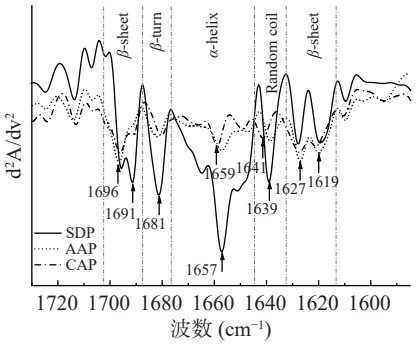


图 7 菜籽蛋白的 FTIR 光谱

Fig.7 FTIR spectra of the rapeseed protein

表 7 菜籽蛋白的二级结构

Table 7 Secondary structure of rapeseed protein

样品	β-折叠(%)	无规则卷曲(%)	α-螺旋(%)	β-转角(%)
SDP	22.44	17.37	20.41	39.78
AAP	34.78	17.58	17.40	30.24
CAP	35.48	17.78	17.00	29.74

叠，推测碱溶酸沉的过程会诱导蛋白部分发生变性，从而形成了更为规则的 β-折叠结构；SDP 中相对较高的 α-螺旋和 β-转角含量与其富含 Napin（天然 Napin 具有较高比例的 α-螺旋）有关[35]，推测其具有更加稳定的结构及柔韧性。此外，不同蛋白间的无规则卷曲含量无明显差异。总体说明盐溶透析法所制备的菜籽蛋白具有更加稳定的二级结构，与冶梓芩等[19] 的研究结果相一致。

2.3.5　不同菜籽蛋白的溶解特性　蛋白质溶解性是植物蛋白最重要的功能特性[36]。如图 8 所示，在 pH3~12 范围内，SDP、AAP 和 CAP 的溶解性均随着 pH 的升高表现出先降低后升高的趋势，且相同条件下 SDP（29.29%±0.99%~75.17%±2.77%）与 AAP（17.26%±1.22%~76.59%±1.09%）相比具有更高的溶解度，与以往研究趋势相一致[11]，但却明显低于梅钰琪等[11] 采用盐溶结合超滤提取蛋白 85% 以上溶解度（pH2~12），推测是其微波处理提高了菜籽蛋白的溶解度。进一步的，AAP 和 CAP 的溶解度均在 pH≈4 处最小，而 SDP 则在 pH≈5 附近溶解度最小，推测与 AAP 采用酸沉（pH4.5）进行蛋白回收且组分以球蛋白为主，而 SDP 以 Napin 为主有关。此外，相对应的，AAP 和 CAP 均在 pH4 条件下 Zeta 电位绝对值最小，SDP 在 pH5 时 Zeta 电位接近 0 mV。

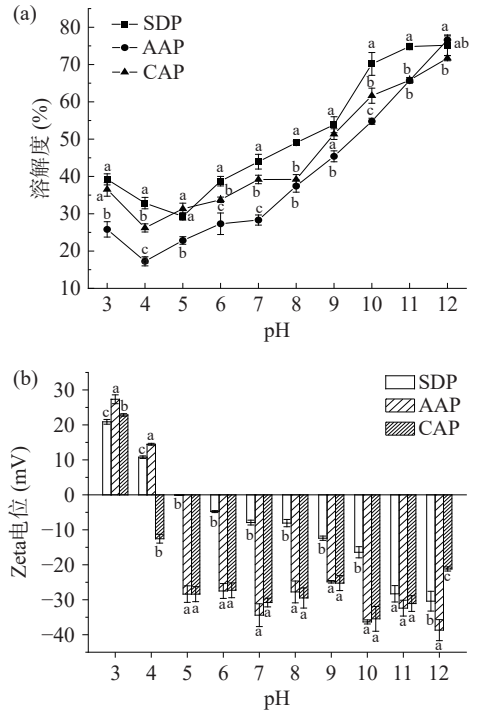


图 8　不同 pH 条件下菜籽蛋白的溶解特性

Fig.8　Solubility characteristics of rapeseed protein under different pH conditions

注：a：溶解度；b：Zeta 电位；不同字母表示同一条件下样品间数据绝对值差异显著（P<0.05）。

3　结论

本文对菜籽蛋白的盐法提取工艺进行了系统优化，并对菜籽蛋白的物化特性进行了表征。结果表明，以脱皮冷榨菜籽饼为原料，在进行植酸酶-含水乙醇梯次前处理的基础上，以 $CaCl_2$ 溶液为提取介质，在离子强度 0.75 mol/L、pH6.5、料液比 1∶12 g/mL、53 ℃ 条件下浸提 90 min，经离心透析冻后可获得蛋白含量高、抗营养因子含量低的菜籽蛋白；与碱溶酸沉蛋白相比，盐溶透析菜籽蛋白色泽良好、富含 Napin 组分、具有更加稳定的蛋白结构及更优的溶解特性。综上，盐溶法可作为高品质菜籽蛋白制备的有效路径之一，可进一步探究前处理对盐溶法制备菜籽蛋白的影响，为其高效高质开发提供支撑。

© 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] OECD-FAO agricultural outlook 2023-2032[OL]. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2023-2032_08801ab7-en.html.

[2] 陈坚. 未来食品：任务与挑战[J]. 中国食物与营养，2022，28（7）：5−6. [CHEN J. Future foods: Tasks and challenges[J]. Food and Nutrition in China, 2022, 28(7): 5−6.]

[3] Food for Thought: The Protein Transformation[OL]. https://www.bcg.com/publications/2021/the-benefits-of-plant-based-meats.

[4] 赵婧，蔺垚，张捷，等. 可持续植物蛋白加工创新与挑战[J]. 中国食品学报，2025，25（5）：67−76. [ZHAO J, LIN Y, ZHANG J, et al. Sustainable plant-based protein processing: Innovation and challenge[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(5): 67−76.]

[5] MOHAMMAD A, CHOCKRY B. Canola proteins: composition, extraction, functional properties, bioactivity, applications as a food ingredient and allergenicity–A practical and critical review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(1): 21−39.

[6] 翟晓娜，师建芳，赵慧凝，等. 菜籽饼粕蛋白的提取、功能特性及其在食品中应用的研究进展[J]. 食品工业科技，2021，42（12）：389−397. [ZHAI X N, SHI J F, ZHAO H N, et al. Extraction, function properties and food application of rapeseed meal protein isolates[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 389−397.]

[7] VAHEDIFAR A, WU J P. Extraction, nutrition, functionality and commercial applications of canola proteins as an underutilized plant protein source for human nutrition[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2022, 101: 17−69.

[8] SCHWEIZER M, SEGALL K, MEDINA S, et al. Rapeseed/canola protein isolates for use in the food industry[C]//International Rapeseed Congress; 20070326-30; Wuhan (CN) Proceedings of the 12th International Rapeseed Congress: Sustainable Development in Cruciferous Oilseed Crops Production, 2007: 160−162.

[9] Re: GRAS Notice No. GRN 000683 [EB/OL]. (2017-05-10). https://www.fda.gov/media/106478/download.

[10] FETZER A, HERFELLNER T, SÄBLER A, et al. Influence of process conditions during aqueous protein extraction upon yield from pre-pressed and cold-pressed rapeseed press cake[J]. Industrial Crops & Products, 2018, 112: 236−246.

[11] 梅钰琪，郑键欣，杨韵仪，等. 盐溶超滤制备菜籽蛋白及其功能特性研究[J]. 中国食品添加剂，2023，34（1）：1−9. [MEI Y Q, ZHENG J X, YANG Y Y, et al. Rapeseed protein preparation by salt

extraction combined with ultrafiltration and its functional properties[J]. China Food Additives, 2023, 34(1): 1−9.]
[12] 方雪莲, 冯子盛, 何静仁, 等. 菜籽蛋白的弱酸高盐法提取工艺优化及品质分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(5): 54−59. [FANG X L, FENG Z S, HE J R, et al. Optimization of extraction process and quality analysis of rapeseed protein with weak acid and high salt method[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(5): 54−59.]
[13] 张杰, 陈冲, 张倩玉, 等. 三种制备菜籽蛋白质方法的比较[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(5): 128−132. [ZHANG J, CHEN C, ZHANG Q Y, et al. Comparison of three methods for preparing rapeseed protein[J]. Food Science and Technology and Economy, 2020, 45(5): 128−132.]
[14] 翟晓娜, 汪涛, 梁亮, 等. 菜籽粕蛋白的碱溶酸沉工艺优化及其活性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 164−171. [ZHAI X N, WANG T, LIANG L, et al. Study on optimization and activities of rapeseed meal protein by alkai-extraction and acid-precipitation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 164−171.]
[15] 肖传豪, 陈来成. 快速简便测定植酸的方法[J]. 化工时刊, 2010, 24(8): 66−68. [XIAO C H, CHEN L C. Fast simple determine phytic acid method[J]. Chemical Industry Times, 2010, 24(8): 66−68.]
[16] 赵秋伶, 王振宇, 王玉荣, 等. 高粱壳多酚的提取、结构表征及其抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(2): 58−63. [ZHAO Q L, WANG Z Y, WANG Y R, et al. Study on the extraction, structural characterization, and antioxidant activity of polyphenols from sorghum husks[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(2): 58−63.]
[17] 袁帅. 大豆液压冷榨工艺及水媒法制备大豆分离蛋白的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [YUAN S. Soybean hydraulic cold pressing process and the aqueous extraction soybean protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
[18] WANG Z G, ZHANG C, ZHANG T, et al. Effects of acylation and glycation treatments on physicochemical and gelation properties of rapeseed protein isolate[J]. RSC Advances, 2018, 8(70): 40395−40406.
[19] 冶梓芬, 王进英, 马桂兰, 等. 不同油料蛋白品质特性对比研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(12): 97−105. [YE Z Q, WANG J Y, MA G L, et al. Comparative study on protein quality characteristics of different oil crops[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(12): 97−105.]
[20] 魏瑞芝, 刘广志, 王乐涛, 等. 菜籽粕中的抗营养因子及应用研究进展[J]. 中国饲料, 2023(7): 17−20,26. [WEI R Z, LIU G Z, WANG Y T, et al. Research progress on antinutritional factors and application of rapeseed meal[J]. China Feed, 2023(7): 17−20,26.]
[21] KAI K M, MAIJA G, JIAKAI L, et al. Functional performance of plant proteins[J]. Foods, 2022, 11(4): 594.
[22] 黄芳, 马骁, 沈青. Hofmeister 效应对生物和化学体系的影响[J]. 广州化学, 2010, 35(4): 50−60. [HUAGNG F, MA X, SHEN Q. Hofmesiter effect in chemical and biological systems[J]. Guangzhou Chemistry, 2010, 35(4): 50−60.]
[23] 邱立明, 孟橘, 魏冰, 等. 菜籽粕制备植酸钙及其精制工艺条件研究[J]. 粮食与食品工业, 2019, 26(6): 5−7. [QIU L M, MENG J, WEI B, et al. Study on preparation of calcium phytate from rapeseed meal and its refining conditions[J]. Cereal & Food Industry, 2019, 26(6): 5−7.]
[24] JIN M H, YUN X, XIE P L, et al. Physicochemical and functional properties of *Pleurotus geesteranus* proteins[J]. Food Research International, 2022, 162(PA): 111978.
[25] SUDARSHAN R N, JANITHA W, LAURIE S. Sustainable protein sources[M]. Academic Press, 2017: 285−304.
[26] 杨万富, 黄桃翠, 刘和平, 等. 冷榨菜籽蛋白的碱性电解水提取工艺及其结构性能表征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 288−295. [YANG W F, HUANG T C, LIU H P, et al. Alkaline electrolyzed water extraction of rapeseed protein from cold rapeseed meal, and its structural characteristics functional properties[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(23): 288−295.]
[27] 黄雨洋, 刘纪元, 朱颖, 等. 阳离子对大豆蛋白及其组分凝胶特性影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 9−16. [HUANG Y Y, LIU J Y, ZHU Y, et al. Progress in the effect of cations on the gel properties of soy protein and its fractions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 9−16.]
[28] JOY R, RAY V D, YOSHINORI M, et al. Phenolics of cereal, pulse and oilseed processing by-products and potential effects of solid-state fermentation on their bioaccessibility, bioavailability and health benefits: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116954−974.
[29] JIA W Q, RODRIGUEZ-ALONSO E, BIANEIS M, et al. Assessing functional properties of rapeseed protein concentrate versus isolate for food applications[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2021, 68.
[30] 周洁, 闫丽华, 王沛, 等. 菜籽粕硫苷的乙醇提取工艺优化及营养成分研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 18−24,92. [ZHOU J, YAN L H, WANG P, et al. Optomization of ethanol extraction of glucoside from rapeseed meal and study on its nutrient composition[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(5): 18−24,92.]
[31] ZHANG Z Y, HE S D, LIU H Y, et al. Effect of pH regulation on the components and functional properties of proteins isolated from cold-pressed rapeseed meal through alkaline extraction and acid precipitation[J]. Food Chemistry, 2020, 327: 126998.
[32] YANG J, KORNET R, NTONE E, et al. Plant protein aggregates induced by extraction and fractionation processes: Impact on techno-functional properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110223.
[33] MÓNICA M, PATTRA C, MARCELO S, et al. High throughput process development for the purification of rapeseed proteins napin and cruciferin by ion exchange chromatography[J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 125: 228−241.
[34] 赵康妤, 杨萍, 马俊坤, 等. 超声协同热处理对菜籽蛋白结构及溶解性的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 100−107. [ZHAO K Y, YANG P, MA J K, et al. Effect of ultrasonic-assisted thermal treatment on the structure and solubility of rapeseed protein[J]. Food Science, 2025, 46(1): 100−107.]
[35] ZHANG R, FANG X L, FENG Z S, et al. Protein from rapeseed for food applications: Extracton, sensory quality, functional and nutritional properties[J]. Food Chemstiry, 2024, 439: 138109.
[36] ZHANG M M, OU W, CAI S B, et al. Composition, functional properties, health benefits and applications of oilseed proteins: A systematic review[J]. Food Research International, 2023, 171: 113061.