

藜麦蛋白的提取工艺优化

袁欣铭^{1,2*}, 石兴宇¹, 罗浩然^{1,2}, 徐京菁^{1,2}, 田璐^{1#}

¹北京农业职业学院食品与生物工程学院, 北京

²北京农学院生物与资源环境学院, 北京

收稿日期: 2025年8月1日; 录用日期: 2025年8月26日; 发布日期: 2025年9月2日

摘要

藜麦被认为是一种伪粮。藜麦蛋白和其他谷物相比, 赖氨酸和蛋氨酸的含量更高一些, 因此, 越来越多的研究将注意力集中在藜麦蛋白质的营养价值和作用特点上。本研究采用了超声辅助碱法作为提取蛋白的关键技术。为进一步确定最佳提取条件, 我们实施了系统的单因素试验, 并结合了响应面法进行优化。经过分析与实验验证, 最终确定了藜麦蛋白提取的最佳工艺参数: 即原料与提取液的比例为1:15, 超声处理的功率设定为1080 W, 温度为40摄氏度。在此条件下, 藜麦蛋白的得率高达60.056%, 实现了高效的蛋白提取效果。本研究通过优化提取工艺, 有助于深入探究藜麦的潜在营养价值, 更好地为人类服务。

关键词

藜麦蛋白, 超声波, 单因素试验, 响应面法

Optimization of Extraction Process of Quinoa Protein

Xinming Yuan^{1,2*}, Xingyu Shi¹, Haoran Luo^{1,2}, Jingjing Xu^{1,2}, Lu Tian^{1#}

¹School of Food and Bioengineering, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing

²College of Bioscience and Resources Environment, Beijing University of Agriculture, Beijing

Received: Aug. 1st, 2025; accepted: Aug. 26th, 2025; published: Sep. 2nd, 2025

Abstract

Quinoa is considered to be a fake grain. Quinoa protein has higher levels of lysine and methionine

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 袁欣铭, 石兴宇, 罗浩然, 徐京菁, 田璐. 藜麦蛋白的提取工艺优化[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(5): 622-631. DOI: 10.12677/hjfn.2025.145068

than other cereals. Therefore, more and more studies have focused on the nutritional value and functional characteristics of quinoa protein. In this study, ultrasonic-assisted alkali method was used as the key technology for protein extraction. In order to further determine the optimal extraction conditions, we carried out a systematic single-factor experiment and combined the response surface method to optimize. After analysis and experimental verification, the optimal process parameters of quinoa protein extraction were finally determined: the ratio of raw material to extract was 1:15, the power of ultrasonic treatment was set to 1080 W, and the temperature was 40 degrees Celsius. Under these conditions, the yield of quinoa protein was as high as 60.056%, which achieved efficient protein extraction. In this study, by optimizing the extraction process, it is helpful to explore the potential nutritional value of quinoa and better serve human beings.

Keywords

Quinoa Protein, Ultrasonic, Single Factor Test, Response Surface Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景及目的意义

藜麦，苋科藜属一年生双子叶植物[1]，在南美被称为“五谷之母”[2]。植株呈扫把状，浅根系，序状花序，自花授粉[3]。藜麦含有多种蛋白质，含量高达 16%~22%，主要由清蛋白和球蛋白组成，谷蛋白和醇溶蛋白含量较低，不含麸质。其中藜麦清蛋白具有减肥和辅助降血脂的作用，经加工藜麦可提高其蛋白质功效[4]。因此，在食品工业中，藜麦应用于优质蛋白质提取原料方面具有巨大的潜力[5]。

近年来，众多学者已围绕藜麦蛋白的提取展开了系列研究：田旭静[4]等采用 Osborne 分级法提取藜麦清蛋白，并通过响应面分析法优化工艺参数，为藜麦蛋白的高效提取提供了基础参考；王晨静等[5]在综述藜麦特性及开发利用研究时，指出藜麦蛋白的营养价值与功能特性使其成为食品工业的重要原料，为后续提取工艺研究指明了方向；权帆等[6]在藜麦蛋白提取工艺优化研究中，不仅探索了提取条件对得率的影响，还进一步分析了所得蛋白的功能特性，拓展了藜麦蛋白的应用研究维度。

本文以藜麦为原料，通过超声波辅助碱法提取藜麦蛋白，根据单因素试验和响应面法分析提取藜麦蛋白的最佳条件并加以优化，旨在为藜麦的进一步发展提供理论基础。

2. 实验材料

本次实验的样品为朝阳泰然科技食品有限公司生产的藜麦。

2.1. 实验仪器

实验所用仪器设备如表 1 所示：

Table 1. The instruments and equipment used in the experiment

表 1. 实验所用仪器设备

仪器设备	生产商	型号
电磁炉	广东顺德忠臣电器有限公司	LC-E109S
电热鼓风干燥箱	上海博迅实业有限公司医疗设备厂	GZX-9070

续表

涡旋振荡器	SCILOGEX	SCI-VS
天平	Sartorius	BSA2202S
超声波萃取仪	宁波新芝生物科技股份有限公司	Scientz-1000TQ
台式高速离心机	湖南赫西仪器装备有限公司	TG16MW
双光束紫外可见分光光度计	北京普析通用仪器有限责任公司	TU-1901
磨粉机	浙江绍兴苏泊尔家居用品有限公司	SMF2002
磁力搅拌器	SCILOGEX	MS-PA
pH 计	上海仪电科学仪器股份有限公司	PHSJ-3F

2.2. 实验试剂

实验所用试剂如表 2 所示:

Table 2. Reagents used in the experiment
表 2. 实验所用试剂

试剂名称	生产商
石油醚	北京市通广精细化工公司
NaOH	北京市通广精细化工公司
BSA 标准溶液	Phygene
考马斯亮蓝 G250	合肥千盛生物科技有限公司
无水乙醇	北京市通广精细化工公司
85%磷酸	国药集团化学试剂有限公司

3. 实验方法

3.1. 藜麦预处理

- 1) 取均一的藜麦种子适量, 温水清洗, 并浸泡 30 min;
- 2) 45℃烘制 8 h, 冷却粉碎, 经 40 目筛网, 得到粗藜麦粉;
- 3) 石油醚脱脂(藜麦粉:石油醚 = 1:4 (g/mL)), 搅拌 1 h 后, 静置 12 h 过滤;
- 4) 弃上清, 45℃烘制 2 h, 置通风处 24 h 以去除石油醚, 干燥储存, 备用[6]。

3.2. 藜麦蛋白提取——超声波辅助碱提法

取一定量脱脂藜麦粉加入适量蒸馏水, 用 0.5 mol/L NaOH 溶液将溶脱脂藜麦粉液调至 pH 为 10, 用超声波在一定温度和功率下提取 2 h 后取出。用蒸馏水定容到 250 mL, 溶液经 5000 r/min 离心 10 min, 取上清, 等待下步操作。

3.3. 藜麦蛋白含量测定——考马斯亮蓝 G-250 染色法

- 1) 0~100 μg/mL 标准曲线的制作

取 6 支试管按下表配制 0~100 $\mu\text{g/mL}$ BSA 标准溶液各 1 mL:
按表 3 信息加样, 反应并测定 595 nm 波长下吸光值, 绘制标准曲线[7]。

Table 3. The system constructed by Coomassie brilliant blue staining method
表 3. 考马斯亮蓝染色法构建的体系

管号	1	2	3	4	5	6
100 $\mu\text{g/mL}$ 标准蛋白质(mL)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.9% NaCl 溶液(mL)	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0
考马斯亮蓝 G-250 染料(mL)				4		

- 2) 提取液蛋白含量的测定
与表 3 方法类似。
3) 藜麦蛋白得率计算

$$\text{得率} = \frac{\text{提取的蛋白质量}}{\text{称取的样品质量}} \times 100\%$$

平均得率取平均值即可。

3.4. 单因素试验

在前面提取方法的基础上, 研究料液比(1:10 (g/mL), 1:20 (g/mL), 1:30 (g/mL))、超声功率(720 W, 900 W, 1080 W)、提取温度(40℃、45℃、50℃)对蛋白得率的影响。以蛋白质的得率为指标, 每个水平重复测试 3 次, 取平均值。

3.5. 响应面优化设计

响应面试验因素水平如表 4 所示:

Table 4. Response surface test factor level
表 4. 响应面试验因素水平

水平	因素		
	A 料液比/(g/mL)	B 超声功率/W	C 提取温度/℃
-1	1:10	720	40
0	1:20	900	45
1	1:30	1080	50

4. 实验结果与数据分析

4.1. 单因素试验结果

结果表明, 在料液比 1:20、功率 50%、温度 45℃的工艺参数下, 藜麦蛋白的得率最高。

4.1.1. 料液比对藜麦蛋白提取的影响

由图 1 可以看出, 随着料液比的比例扩大, 藜麦蛋白的得率也随之提高, 在 1:20 (g/mL)达到最高,

继续扩大料液比的比例,藜麦蛋白的得率逐渐降低。可能是由于料液比太小(1:10 (g/mL))时,此时提取液体积不足,藜麦粉在提取液中所占比重较大,不能充分接触水,藜麦粉在体系中分散不充分,不能将藜麦蛋白充分溶解,蛋白分子难以从细胞基质中游离并与溶剂(水)充分接触,导致传质阻力增大,蛋白溶出发生障碍;提取溶剂增多时,水分子可有效渗透至藜麦粉颗粒内部,破坏蛋白与碳水化合物、纤维等成分的结合力,使蛋白更容易溶解于碱性溶液中,促进其稳定溶出;当料液比过大(1:30 (g/mL))时,此时溶剂过量,藜麦蛋白在溶液中过度稀释膨胀,且可能因体系黏度降低导致超声能量分散,同时其溶出量达到饱和,减少了与水的结合力,进一步增加溶剂体积反而会降低单位体积内的蛋白浓度,导致得率下降。综合考虑,最佳料液比选择 1:20 (g/mL)。

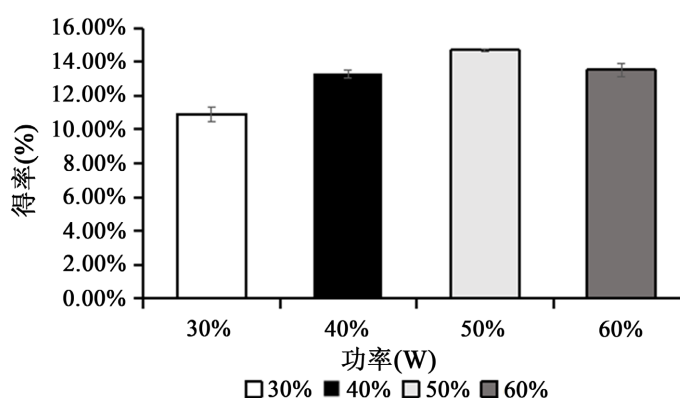


Figure 1. Effect of solid-liquid ratio on quinoa protein extraction

图 1. 料液比对藜麦蛋白提取的影响

4.1.2. 超声功率对藜麦蛋白提取的影响

从图 2 可以看出,随着超声功率的上升,藜麦蛋白的得率也随之上升,在 50% 的超声功率达到最高,超声功率继续上升,藜麦蛋白的得率下降。原因可能是低功率(30%)时,空化效应较弱,机械剪切力不足,无法有效打破藜麦细胞结构及蛋白与其他成分的结合键,导致蛋白溶出速率慢,得率较低;在适宜功率(50%)时,适度的空化效应可产生强烈的微流和冲击力,瓦解藜麦粉颗粒的物理屏障,促进碱性溶液渗透,同时,机械振动能削弱蛋白分子间的疏水相互作用和氢键,使蛋白更容易溶解于提取液中,得率显著提升;功率(60%)时,过度空化会产生局部极端环境,导致蛋白分子二级、三级结构破坏(如肽键断裂、疏水基团暴露)引发蛋白变性,聚集甚至沉淀,反而会降低得率。可能是由于过大的超声功率会破坏蛋白质结构,使蛋白质部分水解变性,从而造成藜麦蛋白的得率降低。综合考虑,最佳超声功率选择 50% (W)。

4.1.3. 温度对藜麦蛋白提取的影响

由图 3 可知,在一定范围内提取温度与藜麦蛋白正相关,在 45℃ 温度下达到最高,温度继续升高,藜麦蛋白的得率随之下降。可能是因为低温(40℃ 以下)时,分子热运动较弱,蛋白溶解度低,且溶剂渗透速率慢,导致蛋白从基质中溶出的动力不足,得率较低;在适宜温度下(40℃~45℃),温度升高使分子热运动加剧,一方面提高蛋白在碱性溶液中的溶解度,另一方面加速溶剂向藜麦粉内部的扩散及蛋白向溶液中的传质,从而提升得率;在高温(50℃ 以上)时,超过蛋白变性温度后,蛋白分子的空间结构被破坏,疏水基团暴露并相互作用,导致蛋白聚集沉淀;同时,高温可能加剧碱性条件下的蛋白水解,进一步降低可溶蛋白含量,使得得率下降;温度升高,增加蛋白质溶解性;超过 45℃ 后,蛋白质理化性质改变,发生变性,从而影响蛋白质的提取。综合考虑,45℃ 为最佳提取温度。

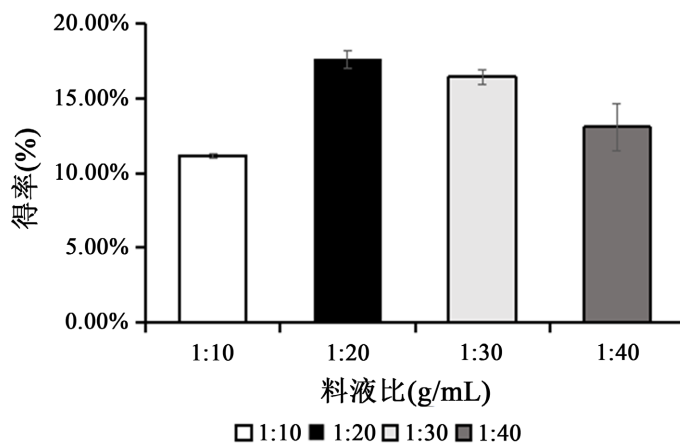


Figure 2. Effect of ultrasonic power on quinoa protein extraction

图 2. 超声功率对藜麦蛋白提取的影响

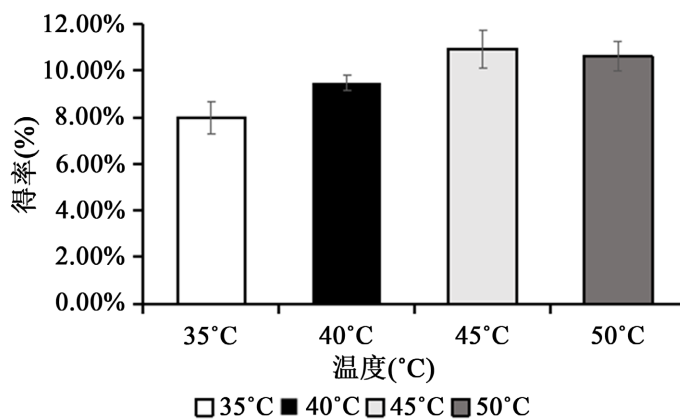


Figure 3. Effect of temperature on quinoa protein extraction

图 3. 温度对藜麦蛋白提取的影响

4.2. 响应面试验

4.2.1. 响应面试验设计及结果

为研究最适的料液比、超声功率和提取温度，我们进行响应面优化试验。结果见表 5。

Table 5. Response surface test design and results

表 5. 响应面试验设计及结果

试验号	A 料液比/(g/mL)	B 超声功率/W	C 提取温度/°C	Y 得率/%
1	-1	-1	0	5.43
2	1	-1	0	10.45
3	-1	1	0	28.53
4	1	1	0	9.34
5	-1	0	-1	37.67
6	1	0	-1	9.69
7	-1	0	1	39.79

续表

8	1	0	1	11.09
9	0	-1	-1	12.55
10	0	1	-1	60.05
11	0	-1	1	54.69
12	0	1	1	54.19
13	0	0	0	8.48
14	0	0	0	8.26
15	0	0	0	6.61
16	0	0	0	6.87
17	0	0	0	5.25

4.2.2. 回归模型拟合及方差分析

对表 5 结果进行回归方程拟合，得到响应面回归方程：
 $Y = +7.09 - 5.78A + 9.70B + 9.13C - 5.67AB - 2.32AC - 12.00BC - 8.50A^2 + 14.46B^2 + 23.82C^2$ 。

Table 6. Regression model analysis of variance
表 6. 回归模型方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	6016.36	9	668.48	115.42	<0.0001	显著
A 料液比	267.73	1	267.73	46.23	0.0003	**
B 超声功率	753.30	1	753.30	130.06	<0.0001	***
C 提取温度	666.31	1	666.31	115.04	<0.0001	***
AB	128.48	1	128.48	22.18	0.0022	**
AC	21.58	1	21.58	3.73	0.0949	
BC	576.00	1	576.00	99.45	<0.0001	***
A ²	304.00	1	304.00	52.49	0.0002	**
B ²	879.84	1	879.84	151.91	<0.0001	***
C ²	2389.12	1	2389.12	412.50	<0.0001	***
残差	40.54	7	5.79			
失拟项	33.58	3	11.19	6.43	0.0521	不显著
纯误差	6.97	4	1.74			
合计	6056.90	16				
R ² = 0.9933				RAdj2 = 0.9847		

注：“*”表示差异显著(0.01 < P < 0.05)， “**”表示差异较显著(P < 0.01)， “***”表示差异极显著(P < 0.0001)。

由表 6 中, 从 P 值的大小可以看出 B (超声功率)、C (提取温度) 对响应值的影响极为显著, A (料液比) 的影响较显著。由 F 值可知, 影响藜麦蛋白得率的因素主要次序是超声功率 > 提取温度 > 料液比[8]。

4.2.3. 响应面分析

利用 Design-Expert-13 软件, 得到各因素的交互作用对蛋白得率影响的等值线图及 3D 响应面图, 见图 4。

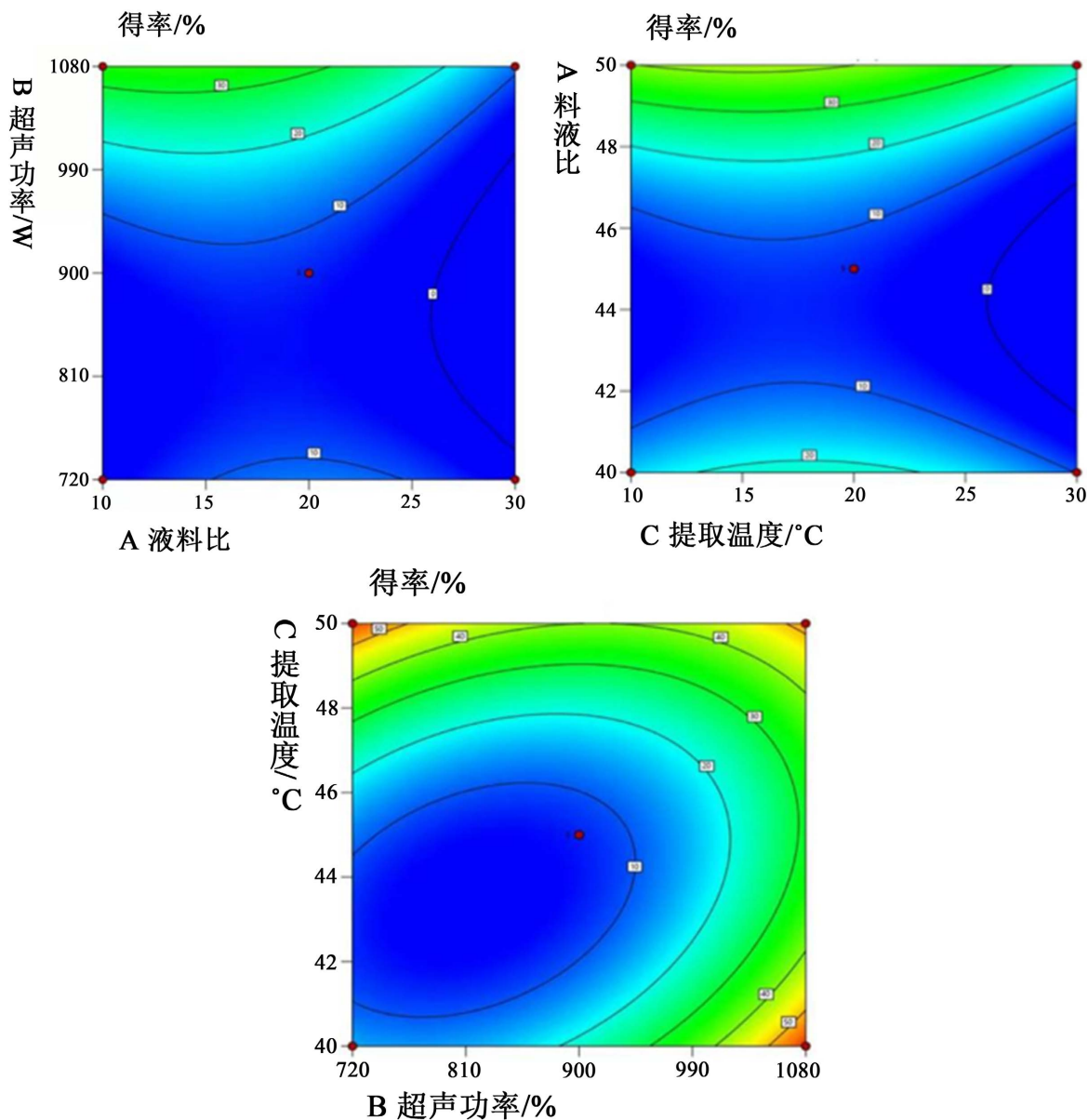


Figure 4. The contour map of the interaction of AB, AC and BC on the yield of quinoa protein
图 4. AB、AC、BC 的交互作用对藜麦蛋白得率影响的等值线图

由图 4 可知, AB、AC、BC 交互的等高线图变化明显, BC 等值线呈椭圆形, BC 的交互作用对藜麦蛋白得率的影响更为显著;

BC 交互作用二者通过“能量 - 温度”协同效应调控蛋白溶出与变性平衡: 在低功率 + 适温条件下,

超声能量不足,即使温度适宜,蛋白溶出动力仍然较弱,得率较低;在适合功率 + 适温条件下,超声空化效应提供充足机械力,促进蛋白释放;同时温度未达变性临界点,蛋白结构稳定,溶解度高,得率最高;在高功率 + 高温条件下,超声过度空化产生的机械破坏与高温的热变性叠加,导致蛋白结构严重受损,聚集沉淀增加,得率下降。

AB 交互作用通过“溶剂体积 - 能量密度”影响超声作用效率:在低料液比 + 低功率下,体系黏稠,超声能量分散不均匀,且溶剂不足限制传质;在适宜料液比 + 适宜功率下,溶剂充足使藜麦粉分散均匀,超声能量可高效转化为机械力,促进蛋白溶出,得率提升;在高料液比 + 高功率下,溶剂过多导致能量密度降低,超声空化效应减弱,同时蛋白浓度稀释,得率下降。

AC 交互作用不显著,因为二者对蛋白提取的影响机制相对独立:料液比主要影响传质环境,温度主要影响溶解度与结构稳定性,二者无强烈协同或拮抗效应。如低料液比时,即使温度适宜,溶剂不足仍限制溶出;高料液比时,温度升高虽能提升溶解度,但过度稀释可能抵消部分增益,故交互作用较弱。

由图 5~7 可知,在 3D 图中,BC 交互曲线较陡峭,且随着因素水平的提高,藜麦蛋白的得率呈现先升高后下降的趋势。

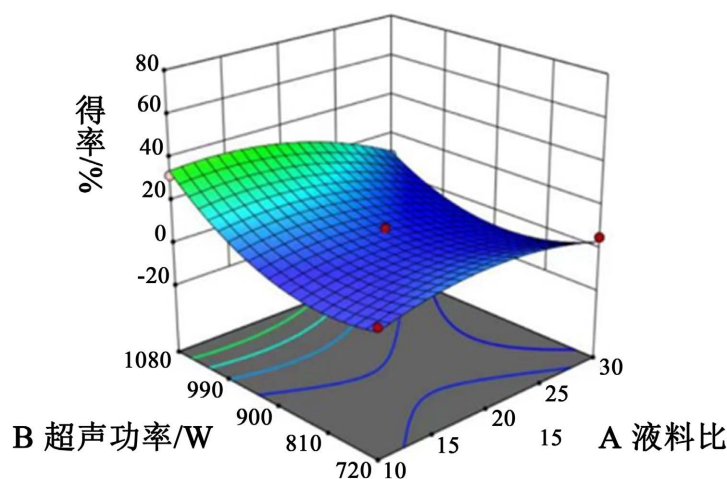


Figure 5. The 3D response surface diagram of the effect of AB interaction on the yield of quinoa protein
图 5. AB 的交互作用对藜麦蛋白得率影响的 3D 响应面图

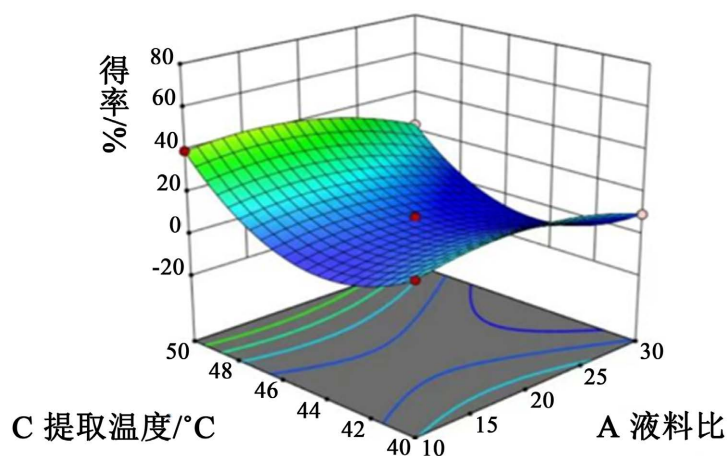


Figure 6. The 3D response surface diagram of the effect of AC interaction on the yield of quinoa protein
图 6. AC 的交互作用对藜麦蛋白得率影响的 3D 响应面图

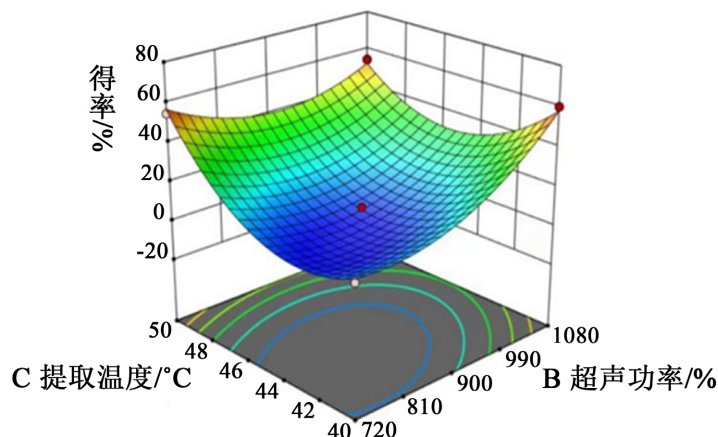


Figure 7. The 3D response surface diagram of the effect of BC interaction on the yield of quinoa protein

图 7. BC 的交互作用对藜麦蛋白得率影响的 3D 响应面图

在通过 Design-Expert-13 软件的精确预测下，我们确定了超声辅助碱法提取藜麦蛋白的最佳工艺参数预测值，其中超声功率为 1079 W，料液比为 1:14 (g/mL)，操作温度控制在 40℃，并预计此条件下的蛋白提取率能高达 60.056%。

5. 结论

超声波辅助碱提法与其他提取蛋白质的方法相比，具有操作简便、试验过程安全等优点。通过单因素试验，结合响应面优化分析，得到藜麦蛋白的最佳提取条件为：料液比 1:15、超声功率 1080 W、提取温度 40℃，此时蛋白得率高达 60.056%。本研究通过工艺优化显著提升了藜麦蛋白的提取效率，为藜麦资源的深度开发奠定了基础，后续可针对本工艺提取的藜麦蛋白开展功能特性研究，如持水性、持油性、乳化性、起泡性等，明确在食品加工中的应用潜力，此外，可尝试结合其他辅助提取技术与本研究的超声辅助碱提法进行组合优化，进一步改善蛋白功能特性，推动藜麦产业从原料种植到精深加工的全链条发展。

基金项目

项目等级：全国生物技术职业教育指导委员会立项；

项目名称：工作过程视角下《生物分离纯化技术》课程改革；

项目编号：GTTXM202403。

参考文献

- [1] 任贵兴, 杨修仕, 么杨. 中国藜麦产业现状[J]. 作物杂志, 2015(5): 1-5.
- [2] 翟娅菲, 刘秀妨, 张华, 等. 藜麦淀粉理化特性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 48-52+57.
- [3] 郭晓凤. 试论藜麦的推广前景及栽培技术[J]. 现代农业, 2015(2): 61-63.
- [4] 田旭静, 张婧婷, 陈文超, 等. Osborne 分级法提取藜麦清蛋白的响应面分析[J]. 山西农业科学, 2017, 45(4): 621-626.
- [5] 王晨静, 赵习武, 陆国权, 等. 藜麦特性及开发利用研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(2): 296-301.
- [6] 权帆, 王文斌, 朱玲丽, 等. 藜麦蛋白提取工艺优化及其功能特性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(11): 50-56.
- [7] 祝连彩, 唐士金, 周丽. 考马斯亮蓝 G250 法测定蛋白质含量的教学实践及方法学探究[J]. 教育教学论坛, 2020(23): 266-269.
- [8] 冯玉兰, 罗威, 孙家美, 等. 响应面法优化藜麦蛋白提取工艺[J]. 食品工业, 2022, 43(3): 10-14.