

滕聪, 吴萧宇, 郝宇琼, 等. 藜麦多糖超声辅助酶法提取工艺优化及其抑制胰脂肪酶活性分析[J]. 山西农业科学, 2025, 53(3): 135-142.

TENG C, WU XY, HAO Y Q, et al. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction process of quinoa polysaccharides and analysis of inhibition of pancreatic lipase activity[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(3): 135-142.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.03.17

藜麦多糖超声辅助酶法提取工艺优化及其抑制胰脂肪酶活性分析

滕 聪¹, 吴萧宇², 郝宇琼³, 李 莹¹

(1. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014; 2. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013; 3. 山西农业大学小麦研究所, 山西临汾 041000)

摘 要:为了解决藜麦多糖提取不充分造成的资源浪费问题,以多糖得率为指标,以复合酶添加量、提取时间、超声功率和料液比为变量,在单因素试验基础上进行响应面优化试验,并通过扫描电镜分析藜麦多糖的表观形貌,以明确超声辅助酶法提取藜麦多糖的最佳工艺,基于体外胰脂肪酶抑制试验评价藜麦多糖的降脂活性。响应面试验结果表明,优化后回归模型极显著, R^2 值为0.982 5,变量对响应值的影响程度大小依次为料液比>提取时间>酶添加量;酶添加量和提取时间的交互作用影响显著,料液比和酶添加量的交互作用、料液比和提取时间的交互作用影响均不显著。通过超声辅助酶法提取藜麦多糖的最佳提取工艺为:超声功率450 W、料液比1:14.3、复合酶添加量2.1%、超声提取时间130 min。在此条件下,得出藜麦多糖的提取率为17.02%。扫描电镜结果表明,通过此方式提取的藜麦多糖结构松散,具有较好的吸附性能。在一定浓度范围内,藜麦多糖对胰脂肪酶具有较强的抑制活性并呈剂量依赖性,当样品质量浓度为10 mg/mL时,抑制率达到71.35%,表明藜麦多糖具有显著的体外降脂活性。

关键词:藜麦多糖;工艺优化;超声辅助酶法提取;胰脂肪酶

中图分类号:TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1002-2481(2025)03-0135-08

Optimization of Ultrasonic-Assisted Enzymatic Extraction Process of Quinoa Polysaccharides and Analysis of Inhibition of Pancreatic Lipase Activity

TENG Cong¹, WU Xiaoyu², HAO Yuqiong³, LI Ying¹

(1. Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

2. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. Institute of Wheat, Shanxi Agricultural University, Linfen 041000, China)

Abstract: Aiming at the problem of waste of quinoa resources caused by insufficient polysaccharide extraction, in order to clarify the optimal process for ultrasonic-assisted extraction of quinoa polysaccharides, the yield of polysaccharides was set as the index, and the amount of compound enzyme addition, extraction time, ultrasonic power, and solid-liquid ratio were taken as the variables, and the response surface optimization test was carried out on the basis of single factor. The apparent morphology of quinoa polysaccharides was analyzed by scanning electron microscopy. The lipid-lowering activity of quinoa polysaccharides was evaluated based on in vitro pancreatic lipase inhibition experiment. The results of the response surface test showed that the optimized regression model was extremely significant, with an R^2 value of 0.982 5, and the influence of variables on the response value was in the order of solid-liquid ratio>extraction time>and enzyme addition. The influence of the interaction between enzyme addition and extraction time was significant, but the influence of the interaction between solid-

收稿日期:2025-01-29

基金项目:中国博士后科学基金(2023M731402)

作者简介:滕 聪,助理研究员,博士,主要从事食品营养与健康研究,E-mail:tengcong95@163.com

通信作者:李 莹,研究员,博士,主要从事食品营养与健康研究,E-mail:hijoly@163.com

liquid ratio and enzyme addition, and the influence of the interaction between solid-liquid ratio and extraction time were not significant. The optimal extraction process of quinoa polysaccharides assisted by ultrasonic enzyme assisted was obtained, it was: the ultrasonic power was 450 W, the solid-liquid ratio was 1: 14.3, the amount of compound enzyme was 2.1%, and the extraction time was 130 min. Under these conditions, the extraction rate of quinoa polysaccharides was 17.02%. The results of scanning electron microscopy showed that the quinoa polysaccharides extracted by this method had a loose structure and good adsorption performance. In a certain concentration range, quinoa polysaccharides had strong inhibitory activity against pancreatic lipase in a dose-dependent manner, and the inhibition rate reached 71.35% when the sample concentration was 10 mg/mL, indicating that quinoa polysaccharides had significant lipid-lowering activity in vitro.

Keywords: quinoa polysaccharides; process optimization; ultrasonic enzyme assisted extraction; pancreatic lipase

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.) 原产于南美洲, 是一种具有高营养特性和优异环境适应性的粮食作物, 被联合国粮农组织称为“全营养食物”^[1]。目前, 藜麦在我国的内蒙、青海、河北、山西、新疆、江苏等地区广泛种植, 且产量逐年提高, 已成为一种重要的健康杂粮。近年来, 人们对藜麦的营养价值和产品开发进行了深入研究, 不同的加工方法对其营养质量和健康效益有很大影响。研究表明, 藜麦具有丰富的营养成分及生物活性物质, 如蛋白质、多糖、膳食纤维、皂苷和类黄酮^[2], 对改善人体健康具有积极作用, 如降血压^[3]、抗结肠癌^[4]、抑制食源性病原菌^[5]等。

多糖作为一种重要的天然生物活性组分^[6], 按营养学特性可以分为淀粉性多糖及非淀粉性多糖^[7]。研究表明, 谷物多糖具有多种生物活性, 如抗氧化、减肥、降血糖、降血脂、提高免疫等^[8]。藜麦籽粒中多糖含量丰富, 是重要的营养功能因子之一, 由半乳糖醛酸和葡萄糖单糖组成。一般而言, 非淀粉性多糖是多糖类活性物质的主要来源^[9]。藜麦的品种、种植环境、提取方式等因素均会影响多糖的得率及生物活性功能, 因此, 选择合适的提取方式优化多糖提取工艺, 对藜麦资源的合理利用具有重要意义。谷物籽粒中淀粉含量较高, 适度的酶法提取有利于除去其中淀粉, 使多糖溶出完全。超声提取方式是利用超声波的能量将多糖从溶液中析出, 但需控制在合理的能量范围内, 过低的超声功率达不到提取多糖的效果, 过高的超声功率会破坏糖苷键的结构。林冰洁等^[10]对藜麦麸皮多糖进行提取, 结果发现, 采用碱性蛋白酶除蛋白得到的多糖提取率最高。王冲等^[11]采用超高压-超声波法优化提取藜麦中 β -葡聚糖, 结果表明, 此方法优于水提法和超声波法。但超声辅助酶法是否适用于藜麦籽粒中多糖的提取未见报道。此外, 先前研究表明, 藜麦多糖具有调节高脂膳食小鼠肠

道菌群以达到降脂效果^[12], 胰脂肪酶抑制活性是评价多糖降脂活性的重要指标, 但藜麦多糖是否具有抑制胰脂肪酶活性仍不明确。

本研究采用超声结合酶法提取藜麦多糖, 通过单因素试验结合响应面优化藜麦多糖的提取工艺, 探究其表面结构特征及其抑制胰脂肪酶活性, 旨在为藜麦功能食品研发及高值化利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 材料与试剂 供试藜麦籽粒购于南京市玄武区孝陵卫集贸市场。

无水乙醇、苯酚、浓硫酸、葡萄糖标准品, 购于国药集团化学试剂有限公司。纤维素酶 (10 万 U/g)、中温 α -淀粉酶 (10 万 U/g)、胰脂肪酶 (3 万 U/g), 购于南京都莱生物技术有限公司。乙酸钠、月桂酸-4-硝基苯酯、DNS 试剂、TritonX-100 等试剂, 购于上海源叶生物科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备 DLH-100 高速多功能粉碎机 (武义祺腾电器有限公司); HG-9145A 鼓风干燥箱 (北京亚泰科隆仪器技术有限公司); H1850R 高速冷冻离心机 (长沙湘仪离心机仪器有限公司); KQ5200DE 数控超声波清洗器 (昆山市超声仪器有限公司); S400-K pH 计 (梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司); RE-52AA 旋转蒸发器 (上海亚荣生化仪器厂); XPR106 分析天平 (梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司); HH-8 数显恒温水浴锅 (上海江星仪器有限公司); Epoch2 全自动微孔板分光光度计 (美国伯腾仪器有限公司); EVO-LS10 扫描电子显微镜 (北京欧波同光学技术有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 多糖提取 选取新鲜的藜麦籽粒清洗干净, 用粉碎机粉碎后过 150 μ m 筛, 按不同料液比加入去离子水, 同时加入 Sevage 试剂以除去蛋白。

在 60 °C 条件下加入一定比例的复合酶(纤维素酶、 α -淀粉酶),设置不同的超声功率提取。取出冷却至室温,旋蒸提取液体积至 1/10,加入 4 倍体积 95% 乙醇,在 4 °C 下沉淀 12 h,以 5 000 r/min 离心 15 min,烘干即为藜麦多糖样品^[13]。

1.2.2 单因素试验 以料液比(1:10、1:12、1:14、1:16、1:18(g/mL))、超声功率(300、350、400、450、500 W)、提取时间(30、60、90、120、150 min)、复合酶添加量(1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%)为变量,探究各因素对藜麦多糖提取率的影响。

1.2.3 响应面试验 以藜麦多糖提取的单因素试验结果为依据,通过 Design-Expert 13.0 软件设计 3 因素 3 水平设计方案(表 1),计算出最佳理论数值。

表 1 超声复合酶法提取藜麦多糖 Box-Behnken 试验设计因素及水平

Tab.1 Box-Behnken experimental design factors and levels of extraction of quinoa polysaccharides by ultrasonic compound enzymatic method

水平 Level	料液比/ (g/mL)(A) Solid-liquid ratio	酶添加量/%(B) Enzyme amount	超声提取时间/min(C) Sonication extraction time
-1	1:12	1.5	90
0	1:14	2.0	120
1	1:16	2.5	150

1.2.4 扫描电镜 将藜麦多糖样品置于样品台上,并使用 EVO-LS10 扫描电子显微镜进行检查,导电膜黏附在样品架上,喷金后通过二次电子信号成像观察。

1.2.5 胰脂肪酶抑制试验 配制质量浓度分别为 2、4、6、8、10 mg/mL 的藜麦多糖溶液,取浓度为 50 mmol/L 的 PBS 溶液和质量浓度为 10 mg/mL 胰脂肪酶溶液加到各藜麦多糖溶液中,充分混匀后加入 0.5 mmol/L 底物溶液,测定 405 nm 下的 OD 值,计算胰脂肪酶抑制率^[14]。

$$\text{抑制率} = \frac{A3 - A4}{A1 - A2} \times 100\% \quad (1)$$

其中,A1 为空白组吸光度值(缓冲溶液代替样品);A2 为空白背景组吸光度值(缓冲溶液代替样品和酶溶液);A3 为样品组吸光度值;A4 为样品背景组(缓冲液代替酶溶液)。

1.3 数据分析

所有试验测试 3 次,并进行方差分析及 *t* 检验,

运用 Design-Expert 13.0 软件进行提取工艺参数优化。所有统计分析均使用 SPSS 22.0 进行,所有检验的统计显著性定义为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 不同料液比下藜麦多糖的变化 由图 1 可知,料液比在所选浓度范围时,多糖得率先提高后降低,料液比为 1:14 时达到最高值。这种趋势的原因是提取液较少时,多糖难以完全溶出导致得率较低;当提取液超过一定范围时,超声作用力集中于液体,未能完全破坏物料组织,导致多糖得率下降^[15]。因此,选料液比 1:12、1:14、1:16 为条件进行响应面分析。

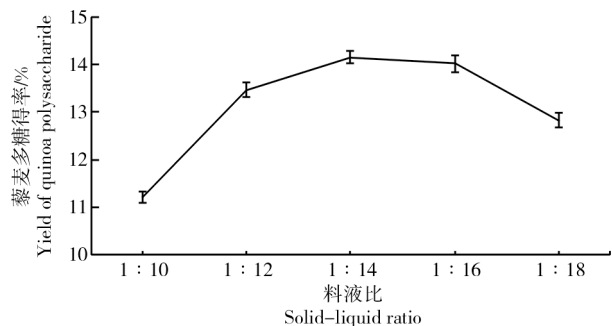


图 1 不同料液比下藜麦多糖得率的变化

Fig.1 Changes in the yield of quinoa polysaccharide under different solid-liquid ratio

2.1.2 不同酶添加量下藜麦多糖的变化 不同酶添加量下藜麦多糖得率的变化如图 2 所示。

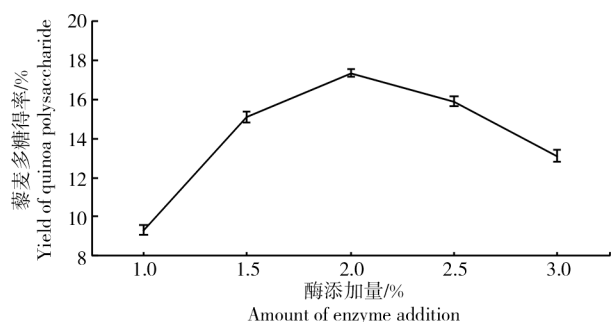


图 2 不同酶添加量下藜麦多糖得率的变化

Fig.2 Changes in the yield of quinoa polysaccharide under different amount of enzyme addition

由图 2 可知,当酶添加量从 1.0% 增加到 2.0% 时,藜麦多糖得率逐渐增大,酶添加量超过 2.0% 后,藜麦多糖得率减少。提取液中加入纤维素酶可以破坏藜麦籽粒细胞壁结构,迅速释放胞内多

糖;加入 α -淀粉酶可以结合并除去籽粒中的淀粉,使得多糖纯度提高。本研究中多糖得率降低的主要原因是可反应的底物的量达到饱和,过多添加纤维素酶和 α -淀粉酶分别反应会使多糖的 β -D-糖苷键和 α -1,4-糖苷键水解^[16]。因此,选择酶添加量为1.5%、2.0%、2.5%进行响应面分析。

2.1.3 不同超声功率下藜麦多糖的变化 从图3可以看出,当超声功率为300~450 W时,藜麦多糖得率逐渐升高;当功率超过450 W后,多糖得率下降。原因可能是由于过大的超声功率会增强空化作用,破坏藜麦细胞壁,分解其中的多糖成分,导致得率降低^[17]。超声功率因素具有非线性强、交互作用复杂、重现性低等特点,为提高模型的可靠性和实用性,在本研究中超声功率不作为设计因素进行响应面优化,固定功率为450 W。

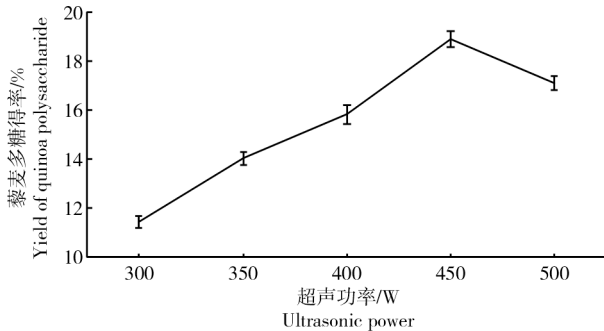


图3 不同超声功率下藜麦多糖得率的变化

Fig.3 Changes in the yield of quinoa polysaccharide under different ultrasonic power

2.1.4 不同提取时间下藜麦多糖的变化 由图4可知,在30~120 min范围内,藜麦多糖的得率逐渐提高;在120 min时酶和底物已充分反应,继续反应会降低酶活和多糖的稳定性^[18]。因此,选取90、120、150 min提取时间为条件进行响应面分析。

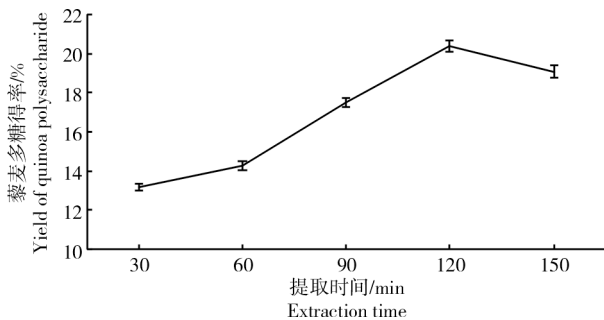


图4 不同提取时间下藜麦多糖得率的变化

Fig.4 Changes in the yield of quinoa polysaccharide under different extraction time

2.2 响应面法优化藜麦多糖提取工艺

2.2.1 响应面分析结果 响应面设置的参数及优化方案分别见表1、2,得到响应面多项式回归方程为 $Y=16.63+1.06A+0.6613B+0.845C-0.5425AB-0.2AC+0.625BC-2.88A^2-2.11B^2-1.47C^2$ 。

表2 试验设计及结果

Tab.2 Trial design and results

试验号 Number	A	B	C	多糖提取率/% Polysaccharide extraction rate
1	0	-1	1	9.15
2	0	1	-1	12.22
3	-1	0	1	12.16
4	1	0	-1	13.06
5	-1	-1	0	9.91
6	-1	0	-1	12.58
7	0	0	0	12.39
8	1	-1	0	14.26
9	-1	1	0	12.67
10	0	0	0	12.14
11	0	0	0	12.72
12	1	0	1	14.69
13	0	-1	-1	16.94
14	0	0	0	16.92
15	0	0	0	16.81
16	0	1	1	16.39
17	1	1	0	16.11

2.2.2 各因素交互作用分析 从表3可以看出,回归模型极显著($P<0.01$),失拟项($P=0.1857$)不显著, $R^2=0.9825$, $R_{adj}^2=0.9600$,表明此模型与试验值拟合度较强,可信度高。变量对响应值的影响程度从大到小依次为料液比(A)>提取时间(C)>酶添加量(B),其中,A、B、C、 A^2 、 B^2 、 C^2 对藜麦多糖的提取影响极显著($P<0.01$),BC交互作用显著影响藜麦多糖提取率($P<0.05$),AB、AC交互作用对提取影响不显著。

不同条件对藜麦多糖得率的影响程度可以通过响应曲面的陡峭度来表示,等高线图用来揭示各个条件间交互作用的强弱关系,图形越接近椭圆形表明交互作用越显著。由表3、图5可知,酶添加量和提取时间的交互作用影响显著,料液比和酶添加量的交互作用、料液比和提取时间的交互作用影响均不显著。

表3 方差分析结果

Tab.3 The results of variance analysis

方差来源		平方和	自由度	均方	F值	P	显著性
Sources of variation		Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F value	P	Significance
模型	Model	90.54	9	10.06	43.70	<0.000 1	**
A		9.05	1	9.05	39.33	0.000 4	**
B		3.50	1	3.50	15.20	0.005 9	**
C		5.71	1	5.71	24.81	0.001 6	**
AB		1.18	1	1.18	5.11	0.058 2	
AC		0.16	1	0.16	0.695 1	0.432 0	
BC		1.56	1	1.56	6.79	0.035 2	*
A ²		34.88	1	34.88	151.53	<0.000 1	**
B ²		18.71	1	18.71	81.30	<0.000 1	**
C ²		9.11	1	9.11	39.57	0.000 4	**
残缺	Residual	1.61	7	0.230 2			
失拟项	Lack of fit	1.07	3	0.356 9	2.64	0.185 7	
纯误差	Pure error	0.540 5	4	0.135 1			
总和	Sum	92.15	16				

注:*表示 $P<0.05$ 水平模型显著;**表示 $P<0.01$ 水平模型极显著。

Note: * meant the model was significant($P<0.05$); ** meant the model was extremely significant($P<0.01$).

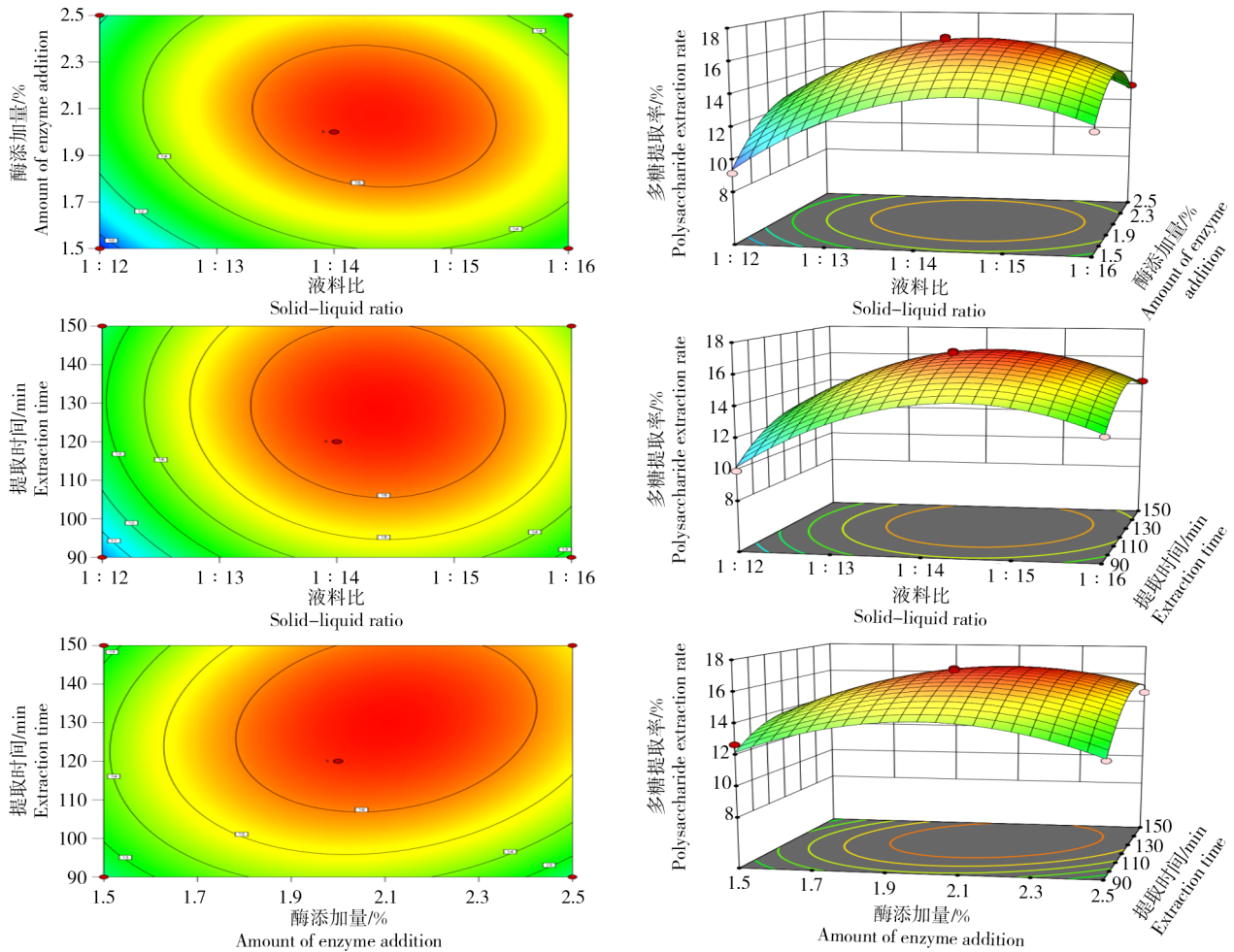


图5 各因素交互作用对藜麦多糖提取率的影响

Fig.5 The effect of interaction between factors on the extraction rate of quinoa polysaccharides

通过 Design-Expert 13.0 软件对得到的数据进行预测,得出藜麦多糖的最优提取工艺为:料液比 1:14.31、复合酶添加量 2.09%、提取时间 129.46 min,在该提取条件下,藜麦多糖提取率的理论值为 16.91%。为使提取工艺更加合理,对该方案进行修订,修订后的方案为:料液比 1:14.3、复合酶添加量 2.1%、提取时间 130 min。在此条件下,试验得出藜麦多糖的提取率为 17.02%,与优化值差异不大,表明此参数合理可行。

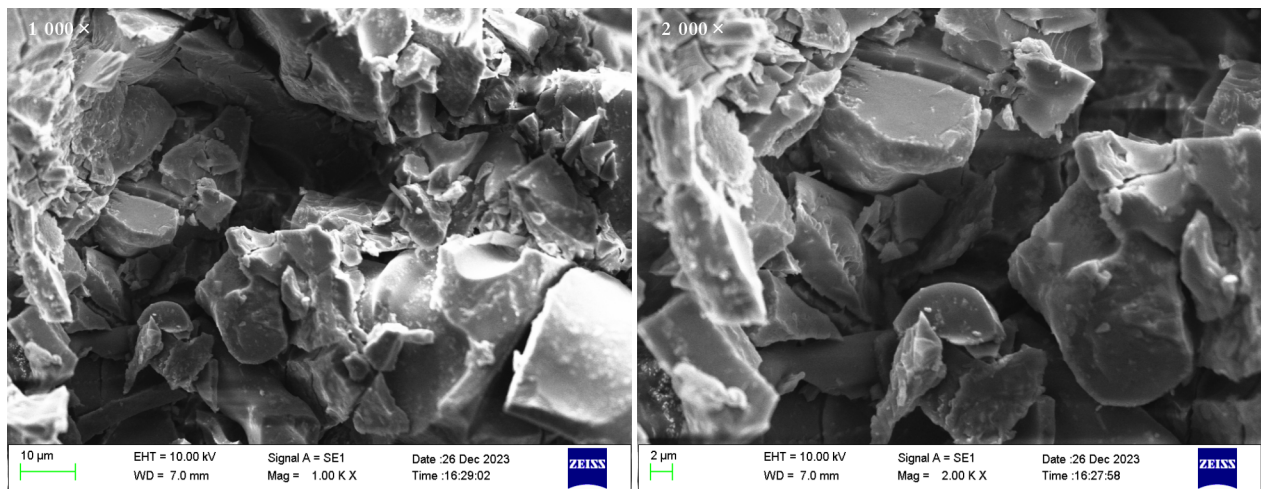
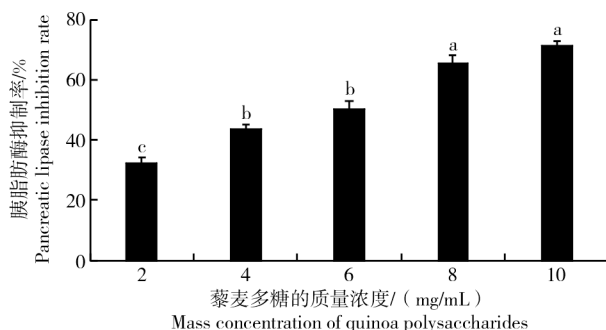


图 6 藜麦多糖的扫描电镜

Fig.6 SEM images of quinoa polysaccharides

2.4 藜麦多糖对胰脂肪酶的抑制活性分析

藜麦多糖的胰脂肪酶抑制活性比较结果如图 7 所示。



不同小写字母表示不同质量浓度藜麦多糖间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicated significant differences between different mass concentrations of quinoa polysaccharides ($P < 0.05$)

图 7 藜麦多糖的胰脂肪酶抑制活性比较

Fig.7 Comparison of pancreatic lipase inhibitory activity of quinoa polysaccharides

2.3 藜麦多糖表观结构分析

图 6 从左向右依次为藜麦多糖在 1 000 \times 、2 000 \times 放大倍数下的表观结构,在表面粗糙,呈现块状结构,可能是经过超声辅助酶法后结构松散,具有较好的吸附性能,与先前报道的藜麦多糖结构相似^[19]。藜麦多糖的糖链是基于氢键相连接,本研究通过超声辅助酶法提取多糖,糖苷键易被酶切断,氢键交联的密度减小,故藜麦多糖表面附着粗糙小颗粒。

从图 7 可以看出,藜麦多糖在质量浓度为 2~10 mg/mL 范围内,藜麦多糖对胰脂肪酶活性抑制率随着样品质量浓度升高而提高,当质量浓度为 10 mg/mL 时,抑制率达到 71.35%。经计算得出,藜麦多糖对胰脂肪酶活性的半抑制质量浓度为 2.744 mg/mL,说明藜麦多糖具有良好的降脂活性,可作为优质谷物成分应用于降脂功能食品研发。

3 结论与讨论

多糖是由不同单糖在不同位置通过糖苷键而形成的聚合物。近年来,多糖由于安全性较高、生物活性强等特点逐渐在食品、医药等领域广泛应用^[20]。不同物料中的多糖根据其特性需要不同的方式提取,常见的提取方式从类别上可以分为化学法、物理法、生物法^[21-22]。超声辅助提取法是一种利用超声波技术来辅助提取植物多糖的方法^[23],主要利用空化及传质作用促进活性物质溶出,经常和化学法及生物法联合使用,在适当的条件下,

超声波处理可适度提高多糖的提取效率,酶法提取技术可以破坏物料的细胞壁使得多糖成分溶出^[24]。与常规的提取方式相比,酶法提取具有环境友好、可控性强的优势。多糖是藜麦中重要的功能成分之一,优化其提取工艺以提高得率对藜麦的资源高效利用具有重要意义。本研究首先通过单因素试验确定了提取藜麦多糖的参数范围,选取料液比、酶添加量和提取时间为控制因素。本研究选取的纤维素酶和 α -淀粉酶,可以适度水解藜麦籽粒中的 β -D构型糖苷键和 α -1,4-糖苷键,与前期报道的藜麦多糖糖苷键构型吻合^[19]。但值得注意的是,酶添加量不能过多,单因素试验结果表明,当复合酶添加量超过2.0%时,多糖得率会降低,原因是过量的酶会过度水解多糖的糖苷键。本研究响应面优化试验结果表明,酶添加量和提取时间的交互作用影响显著,料液比和酶添加量的交互作用、料液比和提取时间的交互作用影响均不显著。本研究优化了超声辅助酶法提取藜麦多糖的具体工艺为:料液比1:14.3、复合酶添加量2.1%、提取时间130 min,在此条件下,藜麦多糖的提取率为17.02%。

胰脂肪酶的作用是分解脂肪变成脂肪酸和甘油,这2种物质可在体内发生酯化反应生成甘油三酯,进而会导致肥胖^[25],因此,抑制胰脂肪酶的活性是评价降脂活性的重要指标。先前佐兆杭等^[26]证实了脱皮处理后的藜麦粉具有较强的抗氧化活性和降脂功能活性,但具体功效因子需要进一步明确。多种谷物多糖被证实具有胰脂肪酶活性。例如,褚盼盼等^[27]研究表明,胰脂肪酶的构象受苦荞麦多糖影响发生改变,抑制酶催化活性。恽含等^[17]研究表明,藜麦多糖具有改善3T3-L1细胞抑制分化为脂肪的活性,但其是否具有抑制胰脂肪酶活性值得探究。本研究通过扫描电镜证实了藜麦多糖结构松散,呈现片状结构,比表面积大,易与胰脂肪酶活性位点结合。在体外降脂活性方面,藜麦多糖在质量浓度为2~10 mg/mL内具有较强的抑制胰脂肪酶活性,当多糖质量浓度为10 mg/mL时,抑制率最高,达到71.35%。

本研究明确了超声辅助酶法提取藜麦多糖的具体工艺,通过体外酶活抑制试验证实了其具有抑制胰脂肪酶活性的效果,为规模化提取藜麦多糖及其降脂保健食品开发提供了理论基础。

参考文献:

- [1] ABDELSHAFY A M, RASHWAN A K, OSMAN A I. Potential food applications and biological activities of fermented quinoa: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144:104339.
- [2] REN G X, TENG C, FAN X, et al. Nutrient composition, functional activity and industrial applications of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. Food Chemistry, 2023, 410:135290.
- [3] GUO H M, HAO Y Q, FAN X, et al. Administration with quinoa protein reduces the blood pressure in spontaneously hypertensive rats and modifies the fecal microbiota[J]. Nutrients, 2021, 13(7):2446.
- [4] FAN X, GUO H M, TENG C, et al. Supplementation of quinoa peptides alleviates colorectal cancer and restores gut microbiota in AOM/DSS-treated mice[J]. Food Chemistry, 2023, 408:135196.
- [5] DONG S X, YANG X S, ZHAO L, et al. Antibacterial activity and mechanism of action saponins from *Chenopodium quinoa* Willd. husks against foodborne pathogenic bacteria[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 149:112350.
- [6] ZHU F. Dietary fiber polysaccharides of amaranth, buckwheat and quinoa grains: a review of chemical structure, biological functions and food uses[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 248:116819.
- [7] 冯翠萍, 乔瑶瑶, 李佳欣, 等. 食用菌多糖结构与功能研究进展[J]. 山西农业科学, 2024, 52(2):128-144.
FENG C P, QIAO Y Y, LI J X, et al. Research progress on structure and function of polysaccharides from edible fungi[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(2):128-144.
- [8] 李苗苗, 王聪, 王淼, 等. 谷物中非淀粉多糖结构、特性和功能及其对小麦啤酒酿造的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 2024: 1-8. [2025-03-27]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039564>.
LI M M, WANG C, WANG M, et al. Structure, properties and function of non-starch polysaccharides in grains and its effects on brewing of wheat beer[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2024: 1-8. [2025-03-27]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039564>.
- [9] 陈林林, 郝熙, 李昕彤, 等. 非淀粉多糖对淀粉特性影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10):386-394.
CHEN L L, HAO X, LI X T, et al. Research progress on the effect of non-starch polysaccharides on starch properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10):386-394.
- [10] 林冰洁, 毛肇洁, 余远, 等. 藜麦麸皮多糖的提取及理化性质和活性研究[J]. 食品科技, 2021, 46(8):171-178.
LIN B J, MAO Z J, YU Y, et al. Extraction, physicochemical properties and activity of quinoa husk polysaccharide[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(8):171-178.
- [11] 王冲, 邹佳文, 陈虹均, 等. 超高压-超声波协同法提取藜麦 β -葡聚糖的工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(6):39-44.
WANG C, ZOU J W, CHEN H J, et al. Extraction of quinoa β -glucan by an ultra-high pressure-ultrasonic wave synergy method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(6):39-44.
- [12] CAO Y N, ZOU L, LI W, et al. Dietary quinoa (*Chenopodium*

- quinoa* Willd.) polysaccharides ameliorate high-fat diet-induced hyperlipidemia and modulate gut microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163:55-65.
- [13] HU A Y, ZHAO Y J, JIANG L, et al. Optimization of polysaccharide extraction from pumpkin seeds using ultrasonic-assisted enzymatic method[J]. Microchemical Journal, 2025, 208:112285.
- [14] 孙永进, 曾惠梅, 黄静, 等. 吴茱萸多糖的分离纯化、结构表征及体外降脂活性[J/OL]. 食品工业科技, 2024: 1-18. [2025-03-27]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070437>. SUN Y J, ZENG H M, HUANG J, et al. *In vitro* lipid-lowering activity, separation and purification, structural characterization of polysaccharides fractionated from *Evodia Rutae-carpa*[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2024: 1-18. [2025-03-27]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070437>.
- [15] 魏鉴腾, 申奥, 张丹阳, 等. 高速剪切辅助提取蕨麻多糖工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(23):115-124. WEI J T, SHEN A, ZHANG D Y, et al. Optimization of high-speed shear-assisted extraction process and study on antioxidant activity of *Potentilla anserina* L. polysaccharide[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(23):115-124.
- [16] 殷澳, 张涵, 侯相竹, 等. 朝鲜淫羊藿多糖复合酶提工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2024, 49(1):191-200. YIN A, ZHANG H, HOU X Z, et al. Optimization of compound enzyme extraction process and antioxidant activity of *Epimedium koreanum Nakai* polysaccharides[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(1):191-200.
- [17] 恽含, 于溪, 李芳菲, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取黑玉米芯多糖及其抑制 α -糖苷酶活性分析[J/OL]. 食品工业科技, 2024: 1-18. [2025-03-27]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070365>. YUN H, YU X, LI F F, et al. Extraction of polysaccharides from black corn cob using ultrasonic-assisted deep eutectic solvent and its activity in inhibiting α -glycosidase[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2024: 1-18. [2025-03-27]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070365>.
- [18] 杜娟, 于彤, 傅宇, 等. 三七多糖酶解提取工艺优化及抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(22):120-126. DU J, YU T, FU Y, et al. Optimization of enzymolysis extraction process and antioxidant activity of *Panax notoginseng* polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2024, 45(22):120-126.
- [19] TENG C, SHI Z X, YAO Y, et al. Structural characterization of quinoa polysaccharide and its inhibitory effects on 3T3-L1 adipocyte differentiation[J]. Foods, 2020, 9(10):1511.
- [20] XUE H K, TANG Y Q, ZHA M, et al. The structure-function relationships and interaction between polysaccharides and intestinal microbiota; a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 291:139063.
- [21] WANG R, WANG J Y, WANG Z C, et al. Extraction methods, structural characteristics, biological activities, and applications of the polysaccharides from *Gracilaria lemaneiformis*: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 293:139316.
- [22] 王敬赫, 胡庆丰, 刘婕, 等. 银杏叶渣中多糖和黄酮的综合提取及其抗氧化活性研究[J]. 河南农业科学, 2023, 52(8):171-180. WANG J H, HU Q F, LIU J, et al. Comprehensive extraction and antioxidant activity research of polysaccharides and flavonoids from *Ginkgo biloba* leaf residue[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(8):171-180.
- [23] YAN F D, XU Y, LONG X Y, et al. Ultrasound-enzyme-assisted aqueous two-phase extraction, structural characterization and bioactivities of *Coptis chinensis* polysaccharides[J]. LWT, 2025, 215:117254.
- [24] SONG Z Y, HUANG G L, HUANG H L. The ultrasonic-assisted enzymatic extraction, characteristics and antioxidant activities of lychee nuclear polysaccharide[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 110:107038.
- [25] PU Y J, CHEN L Y, HE X, et al. Soluble polysaccharides decrease inhibitory activity of banana condensed tannins against porcine pancreatic lipase[J]. Food Chemistry, 2023, 418:136013.
- [26] 佐兆杭, 徐炳政, 宫雪, 等. 藜麦粉的抗氧化能力及体外降糖降脂特性研究[J]. 山西农业科学, 2022, 50(11):1511-1518. ZUO Z H, XU B Z, GONG X, et al. Study on antioxidant ability and hypoglycemic and lipid-lowering properties of quinoa powder *in vitro*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(11):1511-1518.
- [27] 褚盼盼, 侯冬敏, 杨卫民. 苦荞麦多糖对胰脂肪酶抑制作用的研究[J]. 中国食品添加剂, 2015, 26(9):78-83. CHU P P, HOU D M, YANG W M. Bitter buckwheat polysaccharide the study of pancreatic lipase inhibition[J]. China Food Additives, 2015, 26(9):78-83.