

响应面法研究藜麦中多酚的提取工艺

徐京菁^{1,2*}, 石兴宇¹, 罗浩然^{1,2}, 袁欣铭^{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2日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月4日

摘要

由于藜麦中多酚具有抗氧化、抑制炎症反应、预防心脑血管疾病等多种健康功效, 具有较高的研究价值。本研究以多酚作为对象, 通过单因素试验得到结果, 利用响应面软件分析数据, 从而探究藜麦中多酚提取工艺的最佳条件, 实验采用回流和有机溶剂法对藜麦中的多酚进行提取, 从料液比、提取液与乙醇比、乙醇的体积分数三方面分别进行单因素试验。最终得出提取工艺的最佳条件为: 料液比1:45 g/mL、提取液与乙醇比1:6 mL、乙醇的体积分数95%。在此条件下, 得到多酚的最佳提取率为0.4146%。为今后对于藜麦中多酚的提取提供了参考方法, 能够得到较高的提取率。

关键词

响应面法, 单因素试验, 藜麦多酚, 提取工艺

Study on Extraction Technology of Polyphenols from Quinoa by Response Surface Method

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

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

²College of Biology and Resource Environment, Beijing University of Agriculture, Beijing

Received: Aug. 2nd, 2025; accepted: Aug. 27th, 2025; published: Sep. 4th, 2025

Abstract

Because the polyphenols in quinoa have many health effects such as anti-oxidation, inhibition of

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 徐京菁, 石兴宇, 罗浩然, 袁欣铭, 田璐. 响应面法研究藜麦中多酚的提取工艺[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(5): 662-673. DOI: 10.12677/hjfn.2025.145072

inflammatory response, prevention of cardiovascular and cerebrovascular diseases, it has high research value. In this study, polyphenols were used as the object, and the results were obtained by single-factor test. The response surface software was used to analyze the data, so as to explore the optimum conditions for the extraction process of polyphenols in quinoa. The polyphenols in quinoa were extracted by reflux and organic solvent method, and the single-factor test was carried out from three aspects: the ratio of material to liquid, the ratio of extract to ethanol, and the volume fraction of ethanol. Finally, the optimum conditions for the extraction process were as follows: the ratio of material to liquid was 1:45 g/mL, the ratio of extract to ethanol was 1:6 mL, and the volume fraction of ethanol was 95%. Under these conditions, the optimum extraction rate of polyphenols was 0.4146%. It provides a reference method for the extraction of polyphenols in quinoa in the future, and can obtain a higher extraction rate.

Keywords

Response Surface Method, Single Factor Test, Quinoa Polyphenols, Extraction Process

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. 引言

藜麦多酚具有抗氧化、抑制炎症反应、预防心脑血管疾病等多种生理活性，其潜在的健康价值使其成为食品科学和营养学领域的研究热点。藜麦作为高营养谷物，其副产物(如麸皮、壳)中多酚的提取与利用可提升农产品附加值，符合可持续农业发展理念。

传统提取方法(如超声波辅助法)效率较低，提取率不足。工艺参数(如溶剂比例、料液比)的优化缺乏系统性研究。因此，文章采用回流和有机溶剂结合的方法对藜麦中的多酚进行提取，不同于传统方法，旨在确定藜麦多酚提取的最佳工艺条件，包括料液比、提取液与乙醇比、乙醇体积分数，以得到最大化提取率。

2. 实验材料

2.1. 材料与试剂

本次实验的样品为山西省静乐县山西亿隆公司生产的白色藜麦，试剂都为分析纯，如表 1。

Table 1. Experimental materials and reagents

表 1. 实验材料与试剂

试剂名称	生产商
没食子酸	天津市华盛化学试剂有限公司
福林酚	福州飞净生物科技有限公司
无水碳酸钠	国药集团化学试剂有限公司
无水乙醇	北京市通广精细化工公司

2.2. 仪器与设备

本次实验的仪器设备均在使用前进行校准，如表 2。

Table 2. Lab instrument and equipment
表 2. 实验仪器与设备

仪器设备	生产商
磨粉机	浙江苏泊尔股份有限公司
分析天平	赛多利斯科学仪器有限公司
烘箱	上海博迅实业有限公司医疗设备厂
索氏提取器	山东海能科学仪器有限公司
多功能恒温超声波萃取仪	宁波新芝生物科技股份有限公司
离心机	湖南赫西仪器装备有限公司
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

3. 实验方法

3.1. 藜麦预处理

筛选白色藜麦于滤纸上，少量多次进行研磨，将磨碎的藜麦粉过 40 目孔筛于新的大滤纸上[1]，在温度为 70℃ 的烘箱中烘干，取出倒入密封袋后置于干燥阴凉处备用[2]。

3.2. 回流和有机溶剂提取法

准确称取藜麦粉末 1.00 g，包好后将其放入索氏提取器的提取管中，在料液比为 1:35 g/mL，温度 90℃，时间 2 h 的条件下，利用索氏提取器同时回流 6 个样品[3]。

回流结束后关闭电源和冷凝水，待提取瓶中的提取液冷却后倒入 100 mL 容量瓶中，超纯水定容至刻度，4℃ 冰箱保存。

取 10 mL 离心管，在提取剂为无水乙醇，提取液与乙醇比为 1:8 mL 的条件下，将提取液与乙醇混合，在离心机 8000 r/min，离心时间 20 min 的条件下将样品进行离心，结束后放入试管架上，取上清待测，重复三次实验[4]。

3.3. 超声波辅助提取法

在分析天平上准确称取藜麦粉末 5.00 g 于 250 mL 烧杯中，加入 125 mL 70%乙醇溶液作为提取剂，即料液比为 1:25 g/mL，将烧杯放入多功能恒温超声波萃取仪中，在烧杯外壁加入超纯水，没过烧杯内提取液液面即可，使用探头前先用 70%乙醇溶液润洗探头，再深入提取液内，确保探头悬在液体中，不碰壁[5]。

设置条件为：温度 50℃、超声波功率 540 W、超声辅助提取 20 min，超声结束后用漏斗过滤提取液于 250 mL 容量瓶中，超纯水定容至刻度，将提取液放入 10 mL 离心管中，在离心机 4000 r/min 的条件下离心 5 min，取上清待测，重复三次实验。

3.4. 没食子酸标准曲线的绘制

用移液管精确吸取浓度为 30 μg/mL 的没食子酸溶液 0.5、1、1.5、2、2.5、3 mL，使其终质量浓度分别为 1.5、3.0、4.5、6.0、7.5、9.0 μg/mL，再分别置于 25 mL 的比色管中，用移液枪分别加入 0.5 mL 的福林酚试剂，1 min 后再加入 1.5 mL 10%的碳酸钠溶液，超纯水定容至 10 mL 刻度，摇匀，在避光条件下放置 1 h 后取出，及时测定。利用紫外分光光度计，将标准样品倒入石英比色皿中，液体装量在 2/3 至 4/5 左右，在最大波长 740 nm 处测定其吸光度，每个条件测定三次[6]。

3.5. 样品含量测定

用移液枪吸取藜麦提取液 1 mL，置于 10 mL 离心管中，加入 0.5 mL 的福林酚试剂，1 min 后再加入 1.5 mL 10%的碳酸钠溶液，超纯水定容至 10 mL 刻度，摇匀，在避光条件下放置 1 h 后取出，及时测定。利用紫外分光光度计，将待测样品倒入石英比色皿中，液体装量在 2/3 至 4/5 左右，在最大波长 740 nm 处测定吸光度，每个条件测定三次。

3.6. 多酚提取率计算

按照如下公式计算多酚提取率：

多酚提取率 = $\frac{C \times V \times N}{m \times 10^6} \times 100\%$

其中，C 为样品提取液浓度(μg/mL)；V 为样品提取液体积(mL)；N 为样品提取液稀释倍数；m 为样品质量(g)。

3.7. 单因素试验条件选择

3.7.1. 不同料液比对藜麦中多酚提取率的影响

将准确称量好的 1.00 g 藜麦粉末倒入脂肪包中，将其放入索氏提取器的提取管中，打开电源，设置条件，在料液比分别为 1:35、1:40、1:45、1:50 和 1:55 g/mL，温度 90℃，时间 2 h 的条件下，利用索氏提取器回流样品。

3.7.2. 不同提取液与乙醇比对藜麦中多酚提取率的影响

回流结束后将样品定容，取 10 mL 离心管，在提取剂为无水乙醇，提取液与乙醇比分别为 1:4、1:5、1:6、1:7 和 1:8 mL 的条件下，将提取液与乙醇混合，在离心机 8000 r/min、20 min 的条件下将样品进行离心，结束后放入试管架上，取上清待测。

3.7.3. 不同乙醇体积分数对藜麦中多酚提取率的影响

回流结束后将样品定容，取 10 mL 离心管，在乙醇体积分数分别为 80%、85%、90%、95%和 100%，提取液与乙醇比为 1:8 mL 的条件下，将提取液与乙醇混合，在离心机 8000 r/min、20 min 的条件下将样品进行离心，结束后放入试管架上，取上清待测。

根据实验结果和参考文献，将从料液比(g/mL)、提取液与乙醇比(mL)和乙醇的体积分数(%)三方面分别作为三个单因素分别进行试验，如表 3，每组试验重复三次，结果取其平均值[7]。

Table 3. Response surface design factors and levels
表 3. 响应面设计因素及水平

水平	因素		
	料液比	提取液与乙醇比	乙醇体积分数
	g/mL	mL	%
-1	1:40	1:5	90
0	1:45	1:6	95
+1	1:50	1:7	100

4. 结果与分析

4.1. 没食子酸标准曲线绘制结果

利用紫外分光光度计以吸光度为纵坐标，标准溶液浓度为横坐标绘制回归方程，结果为 $y = 0.1106x + 0.0088$ ($R^2 = 0.9991$)，测量数据如表 4。

Table 4. Standard sample absorbance determination table
表 4. 标准样品吸光度测定表

编号	类型	浓度($\mu\text{g/mL}$)	Abs	波长 740.00 nm
1	标准样品	1.5000	0.1728	0.1728
2	标准样品	3.0000	0.3532	0.3523
3	标准样品	4.5000	0.5012	0.5012
4	标准样品	6.0000	0.6615	0.6615
5	标准样品	7.5000	0.8329	0.8329
6	标准样品	9.0000	1.0137	1.0137

4.2. 超声波辅助提取法与回流和有机溶剂提取法对比多酚提取率实验结果分析

分别利用超声波辅助提取法与回流和有机溶剂提取法对藜麦中多酚进行提取，所测得两种方法的多酚提取率如图 1 [8]。

由图 1 可得，回流和有机溶剂提取法得到的藜麦多酚提取率高于超声波辅助提取法得到的藜麦多酚提取率，因此选择采用回流和有机溶剂提取法对藜麦中多酚进行提取，并通过单因素试验和响应面实验研究其最佳提取工艺。

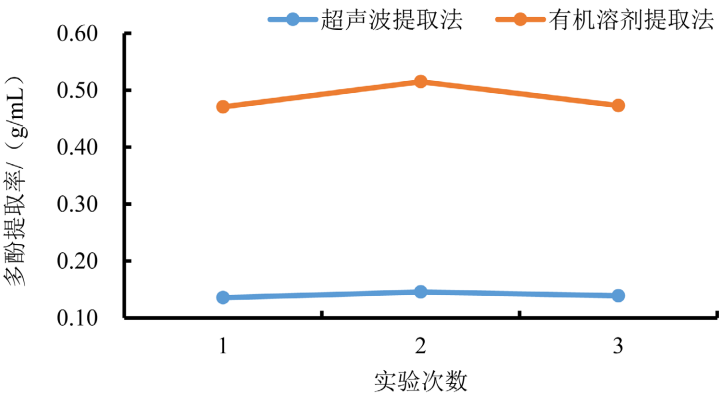


Figure 1. Comparison of extraction rate of polyphenols by ultrasonic and organic solvent extraction
图 1. 超声波与有机溶剂提取的多酚提取率对比

4.3. 关于藜麦多酚提取率单因素试验结果分析

4.3.1. 不同料液比对藜麦中多酚提取率的影响

在料液比分别为 1:35、1:40、1:45、1:50 和 1:55 g/mL，温度 90℃，时间 2 h 的条件下，测得多酚的提取率如图 2 [9]。

由图 2 可得, 当料液比为 1:45 g/mL 时多酚的提取率达到最大。

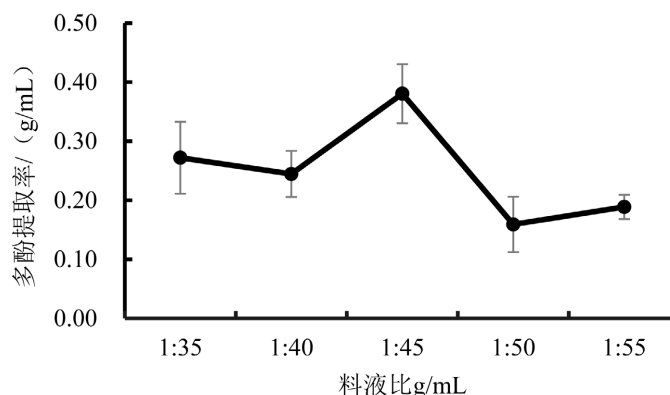


Figure 2. Effect of different solid-liquid ratio on the extraction rate of polyphenols
图 2. 不同料液比对多酚提取率的影响

4.3.2. 不同提取液与乙醇比对藜麦中多酚提取率的影响

在提取液与乙醇比分别为 1:4、1:5、1:6、1:7 和 1:8 mL 的条件下, 测得多酚的提取率如图 3。

由图 3 可得, 当提取液与乙醇比为 1:6 mL 时多酚的提取率达到最大。

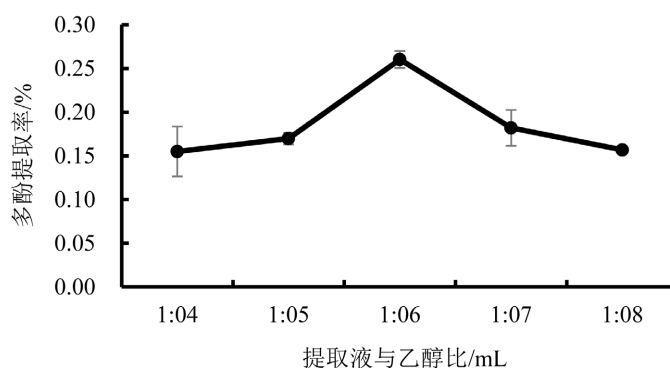


Figure 3. The effect of different ratio of extract to ethanol on the extraction rate of polyphenols
图 3. 不同提取液与乙醇比对多酚提取率的影响

4.3.3. 不同乙醇体积分数对藜麦中多酚提取率的影响

在乙醇体积分数分别为 80%、85%、90%、95%和 100%的条件下, 测得多酚的提取率如图 4。

由图 4 可得, 当乙醇体积分数 95%时多酚的提取率达到最大。

4.4. 响应面法对藜麦中多酚的提取工艺进行结果分析

4.4.1. 利用响应面软件中的 Box-Behnken 进行试验设计分析[10] [11]

响应面法可以将隐式函数关系显示化, 减少试验次数, 提高试验精度。通过对具有代表性的变量多水平进行试验, 并对响应曲面及等高线的数据进行分析, 能够高效求解最优响应值。与正交试验相比, 响应面法在试验条件优化过程中对变量因素各个水平的分析具有连续性, 并能研究几种因素间的交互作用。

通过响应面法拟合出的回归方程模型精度更高, 对实际值的预测性能更好, 可以获得单个因素与输出变量的响应关系, 进而得到最优的参数组合。

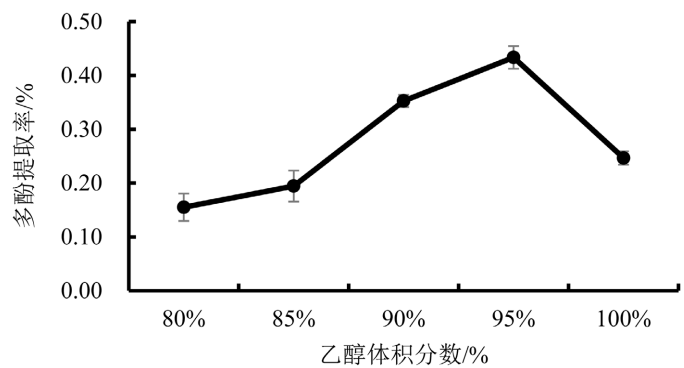


Figure 4. Effect of different ethanol volume fraction on the extraction rate of polyphenols
图 4. 不同乙醇体积分数对多酚提取率的影响

因此利用响应面法，对藜麦中多酚的提取工艺进行研究，分别从料液比(g/mL)、提取液与乙醇比(mL)和乙醇的体积分数(%)三个方面进行单因素试验，所有试验条件组合及测定结果如表 5。

Table 5. Box-Behnken test design and test results
表 5. Box-Behnken 试验设计方案及试验结果

试验编号	料液比(A) (g/mL)	提取液与乙醇比(B)/mL	乙醇体积分数(C)/%	多酚提取率/%
1	1:45	1:07	90	0.1721
2	1:40	1:06	90	0.2155
3	1:45	1:05	90	0.1967
4	1:45	1:06	95	0.2922
5	1:45	1:05	100	0.1388
6	1:45	1:07	100	0.2213
7	1:45	1:06	95	0.3182
8	1:50	1:06	100	0.1200
9	1:40	1:07	95	0.2365
10	1:50	1:05	95	0.2082
11	1:40	1:05	95	0.2270
12	1:50	1:06	90	0.1967
13	1:45	1:06	95	0.2784
14	1:40	1:06	100	0.1685
15	1:45	1:06	95	0.2994
16	1:50	1:07	95	0.2234
17	1:45	1:06	95	0.2857

4.4.2. 响应面模型的建立及方差结果的分析

利用响应面软件对试验数据结果进行分析，得到回归方程为：

$$\begin{aligned} \text{多酚提取率} = & +0.2948 - 0.0124 * A + 0.0103 * B - 0.0166 * C + 0.0014 * AB - 0.0074 \\ & * AC + 0.0268 * BC - 0.0390 * A^2 = 0.0320 * B^2 - 0.0806 * C^2 \end{aligned}$$

利用响应面软件对各个单因素试验结果进行数据分析，得到响应面模型。

1) 不同料液比和提取液与乙醇比对藜麦中多酚提取率影响的结果分析

由图 5 可得，其等高线图接近圆形，颜色变化不明显，表明不同料液比和提取液与乙醇比在藜麦多酚的提取方面交互性较小。

由图 6 可得，其响应面图的坡度较缓，表明不同料液比和提取液与乙醇比的交互作用对藜麦多酚提取率的影响较弱。

2) 不同料液比和乙醇体积分数对藜麦中多酚提取率影响的结果分析

由图 7 可得，其等高线图接近椭圆形，颜色变化较明显，表明不同料液比和乙醇体积分数在藜麦多酚的提取方面交互性较大。

由图 8 可得，其响应面图的坡度较陡，表明不同料液比和乙醇体积分数的交互作用对藜麦多酚提取率的影响较强。

3) 不同提取液与乙醇比和乙醇体积分数对藜麦中多酚提取率的影响

由图 9 可得，其等高线图接近椭圆形，颜色变化较明显，表明不同提取液与乙醇比和乙醇体积分数在藜麦多酚的提取方面交互性较大。

由图 10 可得，其响应面图的坡度较陡，表明不同提取液与乙醇比和乙醇体积分数的交互作用对藜麦多酚提取率的影响较强。

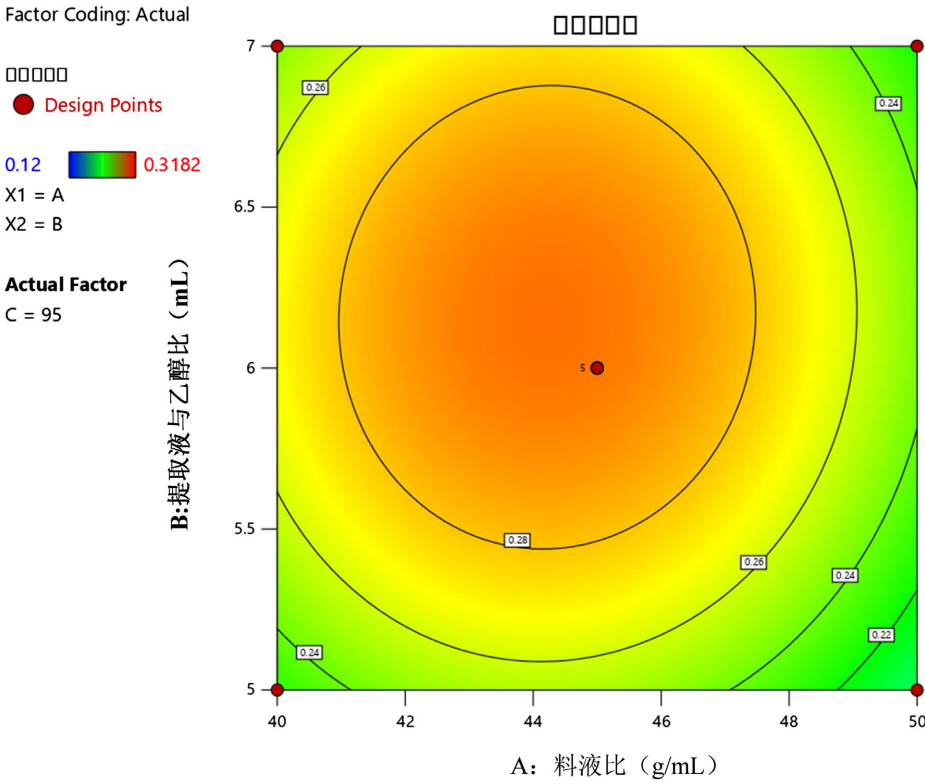


Figure 5. Contours of the effects of different solid-liquid ratios and extract-ethanol ratios on the extraction rate of quinoa polyphenols

图 5. 不同料液比和提取液与乙醇比对藜麦多酚提取率影响的等高线图

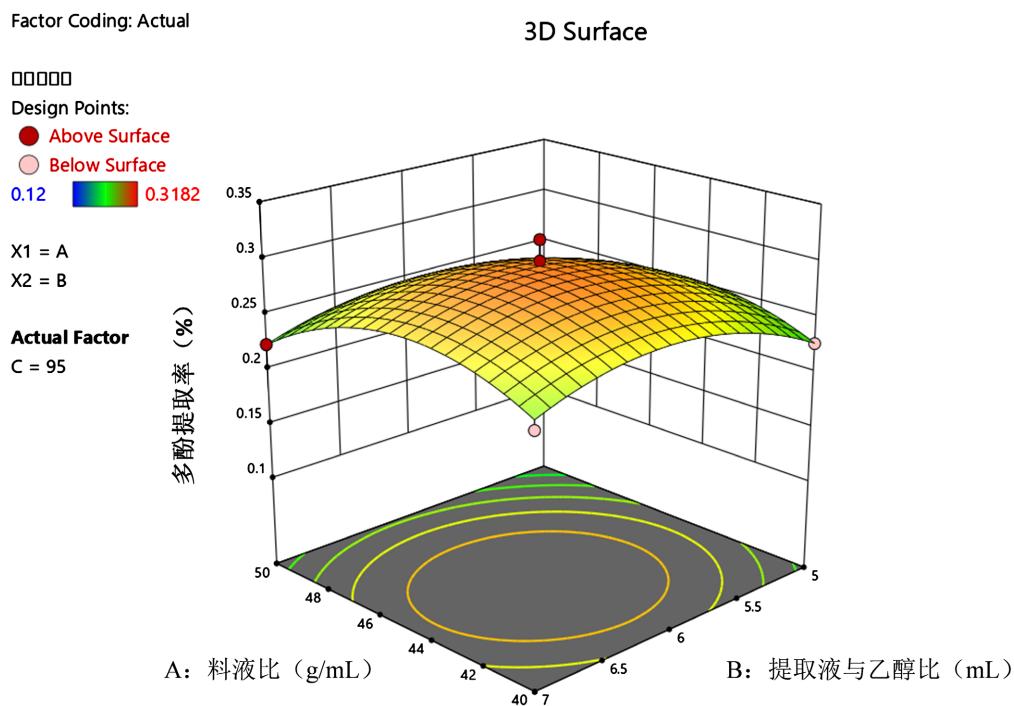


Figure 6. Response surface plots of the effects of different solid-liquid ratios and extract-ethanol ratios on the extraction rate of quinoa polyphenols

图 6. 不同料液比和提取液与乙醇比对藜麦多酚提取率影响的响应面图

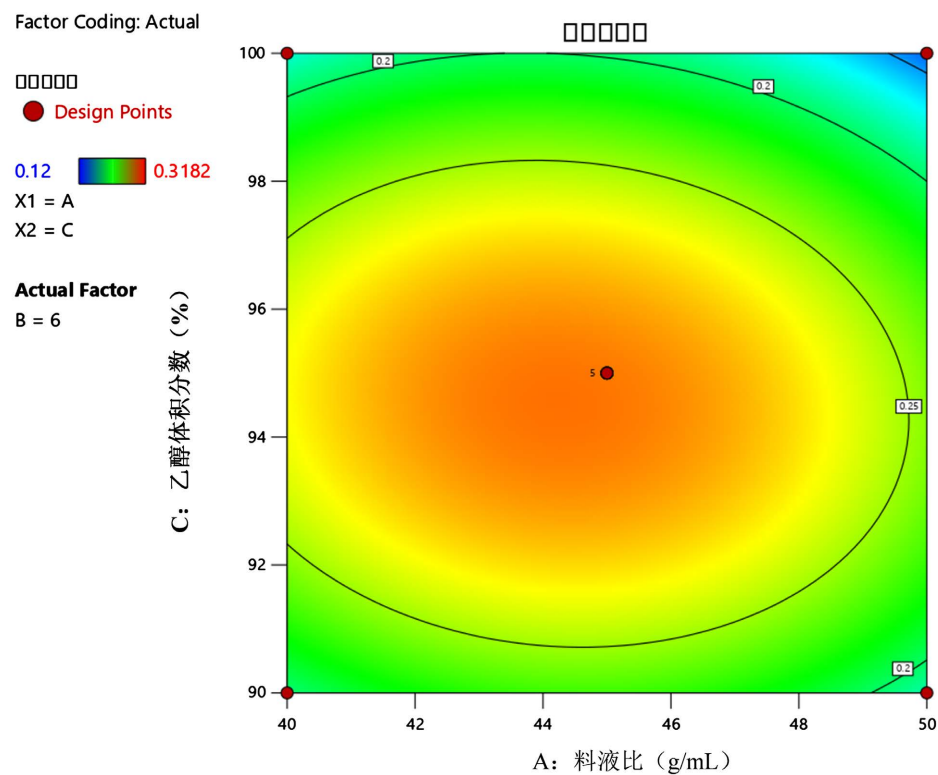


Figure 7. Contours of the effects of different solid-liquid ratios and ethanol volume fractions on the extraction rate of quinoa polyphenols

图 7. 不同料液比和乙醇体积分数对藜麦多酚提取率影响的等高线图

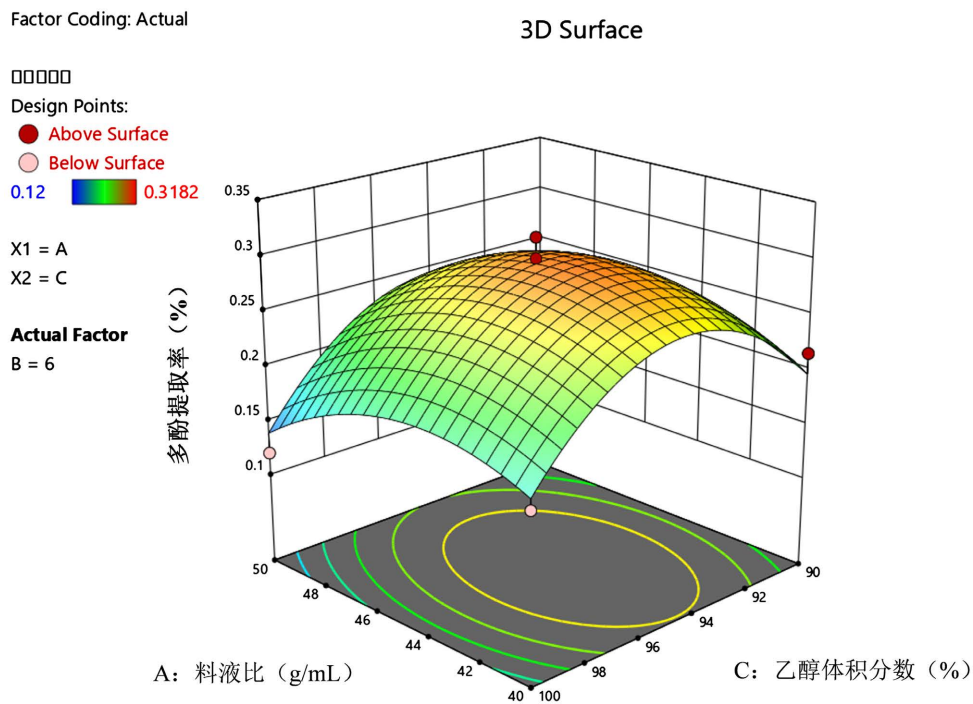


Figure 8. Response surface plots of the effects of different solid-liquid ratios and ethanol volume fractions on the extraction rate of quinoa polyphenols

图 8. 不同料液比和乙醇体积分数对藜麦多酚提取率影响的响应面图

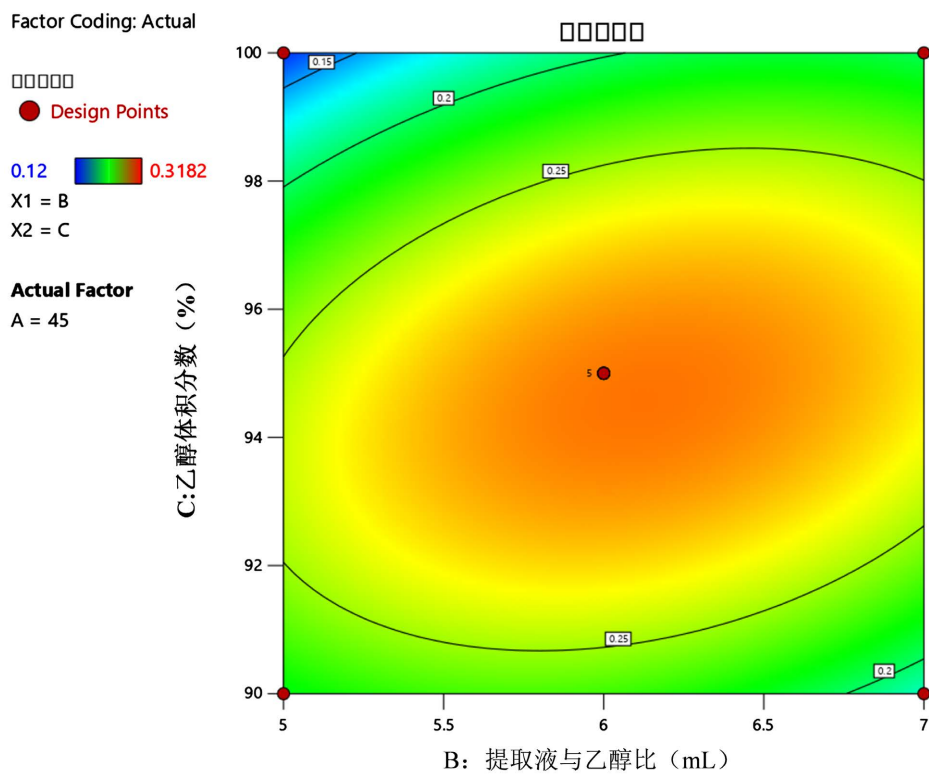


Figure 9. Contours of the effects of different extract to ethanol ratio and ethanol volume fraction on the extraction rate of quinoa polyphenols

图 9. 不同提取液与乙醇比和乙醇体积分数对藜麦多酚提取率影响的等高线图

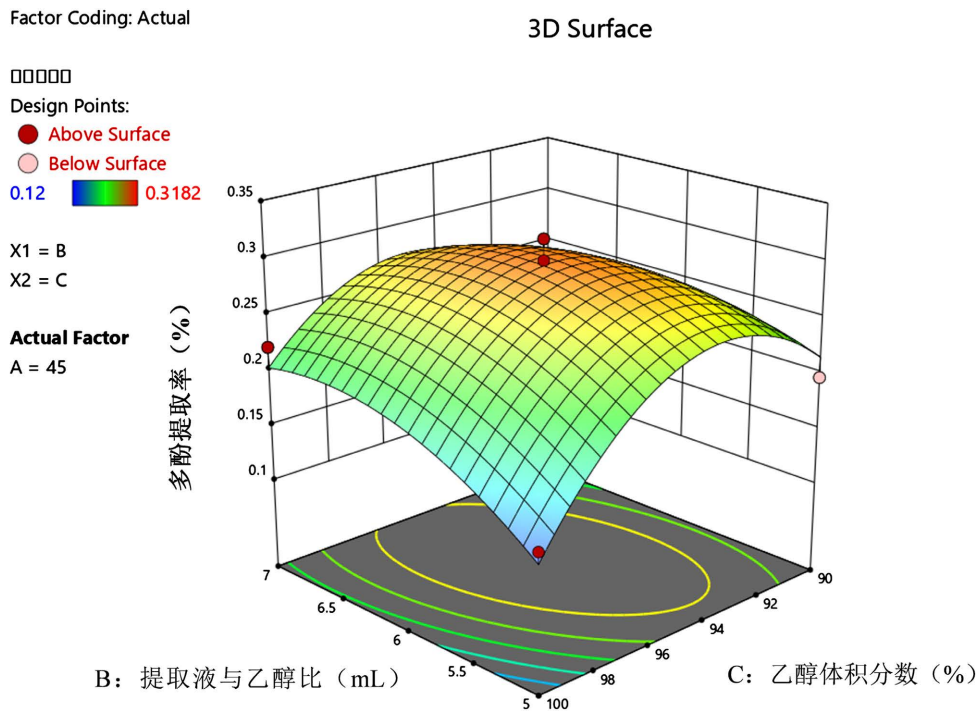


Figure 10. Response surface plots of the effects of different extract to ethanol ratios and ethanol volume fractions on the extraction rate of quinoa polyphenols

图 10. 不同提取液与乙醇比和乙醇体积分数对藜麦多酚提取率影响的响应面图

5. 结论

本次关于藜麦中多酚的提取工艺研究，采用回流和有机溶剂法提取多酚，通过单因素试验得到多酚提取率数据，利用响应面软件进行数据分析，结果表明不同料液比和提取液与乙醇比在藜麦多酚的提取方面交互性较小，且交互作用对藜麦多酚提取率的影响较弱。而不同料液比和乙醇体积分数以及不同提取液与乙醇比和乙醇体积分数在藜麦多酚的提取方面交互性较大，且交互作用对藜麦多酚提取率的影响较强。

最终得出藜麦中多酚提取的最佳工艺条件为：料液比 1:45 g/mL、提取液与乙醇比 1:6 mL、乙醇的体积分数 95%。在此条件下，得到多酚的最佳提取率为 0.4146%。

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] 胡洁, 陈树俊, 庞震鹏, 等. 藜麦萌发过程中营养物质变化规律及藜麦芽乳制浆工艺研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(19): 136-142.
- [2] 李佳妮, 白宝清, 金晓第, 等. 酶解超声波协同提取藜麦多糖及体外活性评价[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(8): 57-64.
- [3] 游新勇, 崔利华, 周亚丽, 等. 响应面法优化藜麦种子中多酚提取工艺[J]. 食品工业, 2020, 41(10): 118-122.
- [4] 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.

-
- [5] 索习东, 李润青, 乔洪涛, 等. 响应面法优化藜麦壳色素的提取工艺[J]. 忻州师范学院学报, 2022, 38(2): 32-37.
 - [6] 王桂林, 董晶, 弓志花, 等. 超声波辅助提取藜麦多酚及其活性的研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(6): 68-71.
 - [7] 朱孔飞, 吴榕珍, 吴子威, 等. 响应面优化超声辅助浸提藜麦多酚工艺及其抗氧化研究[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(24): 173-177.
 - [8] 芦晓芳, 李亚诺, 宋兵泽, 等. 藜麦黄酮提取及其抗氧化活性研究[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(5): 135-141.
 - [9] 阙淼琳, 蒋玉蓉, 曹美丽, 等. 响应面法优化藜麦种子多酚提取工艺及其品种差异[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 7-12.
 - [10] 郭怡, 杨璇, 肖萍. 响应面法优化藜麦多糖提取工艺条件[J]. 天津农学院学报, 2020, 27(4): 43-48+77.
 - [11] 杨敏, 周蕊, 奚军伟. 青海藜麦总黄酮及多酚共提工艺及其抗氧化活性[J]. 中南农业科技, 2023, 44(8): 62-67.