

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.60059

响应面法优化赤小豆多肽制备 及体外降糖活性研究

辛 婷 索 婷 李长滨 王 钊 许美娟 邹 建

(河南牧业经济学院食品与生物工程学院, 河南 郑州 450046)

摘要: [目的] 利用响应面法优化赤小豆多肽制备工艺, 并分析其体外降血糖活性。[方法] 从 3 种蛋白酶中筛选最适酶, 采用单因素及响应面试验优化最佳酶解工艺; 将酶解多肽液进行超滤分离, 并比较不同组分的降糖活性。[结果] 最佳赤小豆多肽制备工艺条件为碱性蛋白酶添加量 3 860 U/g、底物浓度 2.0%、pH 8.0、酶解时间 3 h、酶解温度 60 ℃, 此时多肽含量为 135 mg/g。酶解多肽液经超滤分离, F1(相对分子质量 < 3 000) 组分的体外降糖活性最高, 10 mg/mL 质量浓度下 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制率分别为 79.1%, 81.0%。[结论] 采用碱性蛋白酶酶解制备的赤小豆多肽展现出显著的体外降血糖效果。

关键词: 赤小豆多肽; 蛋白酶酶解; 响应面优化; 降糖活性

Optimization of rice bean polypeptide preparation by response surface method and its *in vitro* hypoglycemic activity

XIN Ting SUO Ting LI Changbin WANG Zhao XU Meijuan ZOU Jian

(College of Food and Biological Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: [Objective] To optimize the preparation process of rice bean polypeptide by the response surface method and analyze its *in vitro* hypoglycemic activity. [Methods] The optimal enzyme is screened from the three proteases, and the best enzymatic hydrolysis process conditions are optimized by single factor and response surface experiments. Then, the enzymatically hydrolyzed polypeptide solution is subject to ultrafiltration separation, and the hypoglycemic activities of different components are compared. [Results] The optimal preparation process conditions for rice bean polypeptide are: basic protease addition amount of 3 860 U/g, substrate concentration of 2.0%, pH of 8.0, enzymatic hydrolysis time of 3 hours, and enzymatic hydrolysis temperature of 60 ℃, resulting in the polypeptide content of 135 mg/g. After ultrafiltration separation of the enzymatically hydrolyzed polypeptide solution, the *in vitro* hypoglycemic activity is the highest in the F1 (relative molecular weight < 3 000) component, with the α -glucosylase inhibition rate of 79.1% and the α -amylase inhibition rate of 81.0% at a mass concentration of 10 mg/mL. [Conclusion] The rice bean polypeptide prepared by enzymatic hydrolysis with alkaline protease shows a significant *in vitro* hypoglycemic effect.

Keywords: rice bean polypeptide; protease enzymatic hydrolysis; response surface optimization; hypoglycemic activity

糖尿病是一种复杂的慢性代谢病, 其根本原因是胰岛分泌不足或胰岛素抵抗导致血糖升高。抑制 α -葡萄糖苷酶、 α -淀粉酶的活性可有效控制糖尿病^[1]。大量研

究^[2-4]表明, 植物源生物活性肽可以抑制 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶活性, 表现出较好的降糖活性。与其他降糖因子相比, 植物源生物活性肽具有吸收更好、活性更高、用药

基金项目: 河南省科技攻关项目(编号: 232102110138, 242102110139); 河南省高等学校重点科研项目(编号: 24A550009); 河南省重点研发计划项目(编号: 251111113000)

通信作者: 邹建(1981—), 男, 河南牧业经济学院教授, 博士。E-mail: zoujianzz@126.com

收稿日期: 2025-04-05 **改回日期:** 2025-07-11

引用格式: 辛婷, 索婷, 李长滨, 等. 响应面法优化赤小豆多肽制备及体外降糖活性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 180-187.

Citation: XIN Ting, SUO Ting, LI Changbin, et al. Optimization of rice bean polypeptide preparation by response surface method and its *in vitro* hypoglycemic activity[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 180-187.

剂量更小、更安全等优点^[5]。目前开发出的植物源降糖肽包括辣木籽降糖肽^[6]、黑豆降糖肽^[7]、美藤果多肽^[8]、花生降糖肽^[9]和灵芝降糖肽^[10]等。

赤小豆,又叫赤豆、红小豆,是一种历史悠久、应用广泛的药食同源作物,最早记载于《神农本草经》,具有调理人体阴阳平衡、活血化瘀、清热解毒、利尿等功效^[11]。赤小豆富含蛋白质、膳食纤维、矿物质等营养成分^[12]及单宁、多酚、黄酮等生物活性成分^[13],具有抗氧化、抑菌、降血糖等功效^[14]。中国是世界上最大的赤小豆生产国^[15],但其在食品市场上的开发和深加工应用较少,应加大对赤小豆的开发,提高产品附加值。

赤小豆中蛋白质含量约占20%^[16],高于大多数的豆类,富含18种氨基酸且1/3为必需氨基酸^[17]。目前,有关赤小豆活性成分的研究主要集中在多酚、糖苷等,对其蛋白质的研究较少,有关赤小豆多肽的提取制备及活性研究尚未见报道。相较于蛋白质,多肽的相对分子量更小、更利于人体吸收且生理活性更强^[18-19]。张慧荣等^[20]研究发现,相较于刀豆和绿豆,赤小豆多肽的抗氧化和抗炎能力最强。Padhi等^[21]用枯草芽孢杆菌发酵制备赤小豆多肽,表现出了很好的ACE抑制活性。而国内外有关降糖活性赤小豆多肽的提取制备研究尚处于空白。试验拟选择适宜的酶来制备赤小豆生物活性肽(RBPPs),通过单因素试验和响应面法优化最佳酶解条件,并对多肽液进行超滤分离,筛选最佳降血糖活性的分子段,以期对赤小豆的高值利用及开发新型天然降糖功能产品提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

赤小豆:五常市彩桥米业有限公司;

胰蛋白酶(250 U/mg)、木瓜蛋白酶(800 U/mg)、碱性蛋白酶(200 U/mg)、 α -葡萄糖苷酶(200 U/mL)、 α -淀粉酶(3 700 U/g)、pNPG、DNS:上海源叶生物科技有限公司;

牛血清蛋白:纯度>99%,天津市众联化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

分光光度计:723PC型,上海菁华科技仪器有限公司;

真空冷冻干燥机:HD-LG20型,山东环美分析仪器有限公司;

医用离心机:JW-2018H型,南京贝登贝登医疗器械有限公司;

酶标仪:ReadMax-1500型,上海闪谱生物科技有限公司;

微孔板孵育器:MB100-2A型,常州金坛良友仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 赤小豆蛋白提取 参照孔彩羽^[22]的方法。

1.3.2 RBPPs制备 取3 g赤小豆蛋白粉置于250 mL锥形瓶,加入100 mL蒸馏水,在一定温度下水浴保温20 min,调节至最适pH,加入适量蛋白酶,充分搅拌且酶解一定时间,100℃灭酶5 min,冷却至室温,4 000 r/min离心20 min,取上清液冷冻干燥,得到RBPPs。

1.3.3 蛋白酶筛选 选取胰蛋白酶、碱性蛋白酶和木瓜蛋白酶对赤小豆蛋白进行酶解,以多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率为指标,按表1条件选择最适蛋白酶^[23-25]。

表1 3种蛋白酶的酶解条件

Table 1 Enzymatic hydrolysis conditions of three proteases

酶种类	最适温度/℃	最适pH	底物浓度/%	酶添加量/(U·g ⁻¹)	酶解时间/h
胰蛋白酶	45	8.0	2.0	4 000	3.0
碱性蛋白酶	60	8.5	2.0	4 000	3.0
木瓜蛋白酶	60	6.5	2.0	4 000	3.0

1.3.4 单因素试验 选择碱性蛋白酶酶解制备RBPPs,固定底物质量浓度2.0%,酶解pH 8.5,酶添加量4 000 U/g,酶解时间3 h,酶解温度60℃,考察酶解时间(1,2,3,4,5 h)、底物浓度(1.0%,1.5%,2.0%,2.5%,3.0%)、酶添加量(2 000,3 000,4 000,5 000,6 000 U/g)、酶解pH(7.5,8.0,8.5,9.0,9.5)、酶解温度(50,55,60,65,70℃)5个因素对多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响。

1.3.5 响应面法 在单因素试验基础上,选取酶添加量、底物浓度和酶解pH 3个因素为自变量,以多肽含量为响应值,进行三因素三水平响应面法。

1.3.6 RBPPs超滤 将最佳条件下得到的RBPPs命名为RBPPs-1,使用截留相对分子质量分别为3 000,5 000,10 000的超滤管进行截留分离,得到3个组分:F1(<3 000)、F2(3 000~5 000)、F3(5 000~10 000),将各组分收集浓缩并冷冻干燥。每个组分复溶后配成10 mg/mL的质量浓度,测定各组分对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的抑制率。

1.3.7 多肽含量测定 参照姜东^[26]的方法略有修改。以OD值为纵坐标,多肽浓度为横坐标,绘制标准曲线方程为 $y=0.0457x+0.0151$, $R^2=0.9988$ 。按式(1)计算多肽含量。

$$R = \frac{C \times V}{m}, \quad (1)$$

式中:

R ——多肽含量,mg/g;

C ——酶解液中多肽质量浓度,mg/mL;

V ——酶解液总体积,mL;

m ——赤小豆蛋白质量,g。

1.3.8 体外降糖活性测定

(1) α -葡萄糖苷酶抑制率:参照韩鹏薇等^[27]的方法。

(2) α -淀粉酶抑制率:参照 Wang 等^[28]的方法。

1.4 数据处理与绘图

每组试验设 3 次平行。采用 Design Expert 13.0 软件设计响应面试验,采用 Origin 2019 软件进行数据处理和绘图。

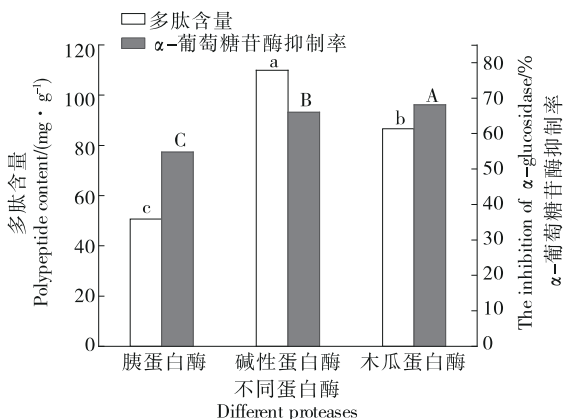
2 结果与分析

2.1 蛋白酶筛选

不同蛋白酶的酶切位点不同,所制备的多肽类型、产量及生物活性也存在差异,因此,筛选适宜的蛋白酶是试验的关键步骤^[29]。由图 1 可知,酶解多肽含量大小顺序为碱性蛋白酶>木瓜蛋白酶>胰蛋白酶,其中碱性蛋白酶的多肽含量为 128.4 mg/g,显著高于其余两种酶。3 种酶解产物均具有一定的体外降糖活性,木瓜蛋白酶和碱性蛋白酶的 α -葡萄糖苷酶抑制率均接近 70%。综合考虑,选择碱性蛋白酶进行后续试验。

2.2 单因素试验

由图 2(a)可知,随着酶添加量的提高,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率均表现出先上升后下降的变化规律。当酶添加量为 4 000 U/g 时,多肽含量达到峰值 127.44 mg/g,进一步增大酶添加量反而导致多肽得率降低。这可能是底物浓度不变的情况下,酶添加量达到一定量时,部分多肽产物被水解为氨基酸,使得多肽含量下降。当酶添加量为 5 000 U/g 时, α -葡萄糖苷酶抑制率达到最大,为 69.35%。随着酶添加量的继续增大, α -葡萄糖



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 3 种蛋白酶的多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率

Figure 1 Peptide content and α -glucosidase inhibition of three proteases

苷酶抑制率逐渐下降,可能是随着酶添加量的增加,赤小豆多肽被过度降解,分解为无降糖活性的小分子^[30]。考虑到酶成本,选择最适酶添加量为 4 000 U/g。

由图 2(b)可知,随着底物质量浓度的增加,多肽含量上升趋势显著。当底物浓度为 2% 时,多肽含量达到峰值 140 mg/g,继续增大底物浓度,多肽含量缓慢下降。这是由于适量的底物可以充分地酶结合,而过量的底物会影响酶解反应,底物与蛋白酶扩散速率降低,蛋白质链断

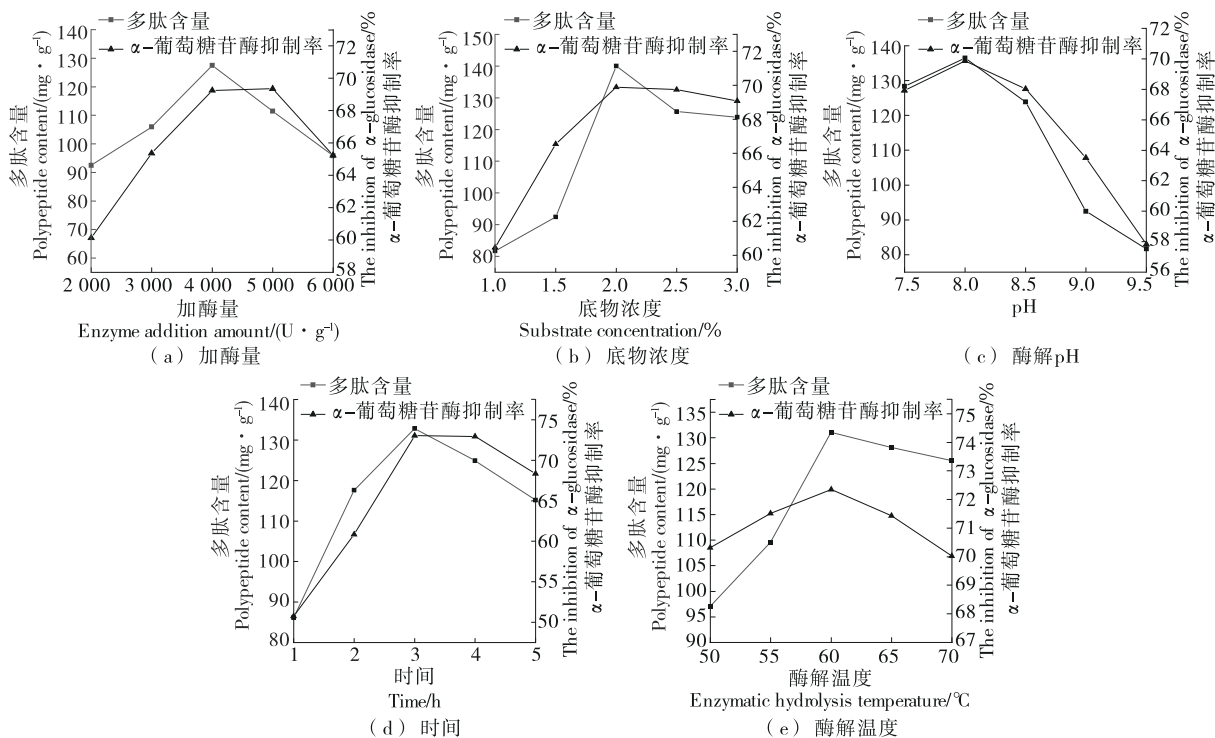


图 2 酶解制备 RBPPs 的单因素试验

Figure 2 Single factor experiment of the enzymatic hydrolysis process to prepare RBPPs

裂,反应受到抑制,酶解效率降低,多肽含量随之下降^[31]。当底物浓度由1.0%增大到2.0%时, α -葡萄糖苷酶抑制率先缓慢上升而后快速上升,当底物浓度为2.0%时, α -葡萄糖苷酶抑制率达到最大值69.89%;当底物浓度>2.0%时, α -葡萄糖苷酶抑制率呈下降趋势。说明过高的底物浓度会抑制酶解,降低功能性肽释放量^[31]。故选择最适底物浓度为2.0%。

由图2(c)可知,随着酶解pH的升高,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率均表现出先增大后减小的变化规律。当酶解pH为8.0时,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率同时达到最佳水平,分别为136.4 mg/g和69.86%。当酶解pH>8.0时,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率逐渐降低。过量的碱性条件可能改变蛋白酶的活性中心构象,从而抑制碱性蛋白酶的催化活性^[32]。故选择最适酶解pH为8.0。

由图2(d)可知,随着酶解时间的延长,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率均先显著增长后逐渐降低。当酶解时间为3 h时,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率达到最佳水平,分别为132.8 mg/g和73.05%。随着酶解时间的继续延长,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率逐渐下降。这可能是因为酶解一定时间后,赤小豆蛋白酶解位点被完全反应,部分多肽产物进一步降解为低活性氨基酸^[33],从而表现为多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率缓慢下降的趋势。故选择最适酶解时间为3 h。

由图2(e)可知,随着酶解温度的增加,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率先不断增加,当酶解温度为60℃时,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率达到最大值,分别为130 mg/g和72.35%;继续升高酶解温度,多肽含量和 α -葡萄糖苷酶抑制率逐渐下降。这是由于酶解温度过高会改变酶结构,使酶活力逐渐下降甚至失活。故选择最适酶解温度为60℃。高翔等^[34]采用碱性蛋白酶酶解玉米胚芽粕制备降糖肽,经优化得最佳酶解温度为59.5℃,与试验结果基本吻合。

2.3 响应面试验

2.3.1 响应面试验设计与结果 基于单因素试验结果,固定酶解温度60℃、酶解时间3 h。选取酶添加量、底物浓度和酶解pH为自变量,以多肽含量为响应指标,采用三因素三水平响应面试验设计方法进行优化研究^[35]。试验因素水平见表2,试验设计及结果见表3。

2.3.2 模型建立与方差分析 利用Design-Expert 13.0软

表2 响应面试验因素与水平			
Table 2 Factors and levels of response surface experiment			
水平	A 酶添加量/(U·g ⁻¹)	B 底物浓度/%	C 酶解 pH
—1	3 000	1.5	7.5
0	4 000	2.0	8.0
1	5 000	2.5	8.5

表3 响应面试验设计及结果

Table 3 Design and results of response surface experiment

试验号	A	B	C	多肽含量/(mg·g ⁻¹)
1	—1	0	—1	76.56
2	1	—1	0	69.56
3	1	0	1	59.39
4	0	1	1	107.49
5	0	—1	1	78.50
6	1	1	0	71.84
7	—1	—1	0	80.03
8	—1	1	0	94.70
9	0	0	0	130.49
10	0	0	0	136.42
11	0	1	—1	80.58
12	1	0	—1	69.20
13	0	0	0	136.39
14	0	0	0	135.68
15	—1	0	1	89.85
16	0	—1	—1	89.88
17	0	0	0	133.37

件进行多元回归拟合,得到酶添加量、底物浓度、酶解pH 3个因素对多肽含量的影响拟合回归模型方程:

$$Y=134.47-8.89A+4.58B+2.38C-3.10AB-5.78AC+9.57BC-35.40A^2-20.04B^2-25.32C^2。$$
 (2)

由表4可知,模型的决定系数 $R^2=0.996\ 1$, $P<$

表4 响应面回归模型方差分析†

Table 4 Analysis of variance of response surface regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	1 2101.68	9	1 344.63	197.69	<0.000 1	**
A	632.79	1	632.79	93.03	<0.000 1	**
B	167.81	1	167.81	24.67	0.001 6	**
C	45.17	1	45.17	6.64	0.036 6	*
AB	38.38	1	38.38	5.64	0.049 2	*
AC	133.40	1	133.40	19.61	0.003 0	**
BC	366.53	1	366.53	53.89	0.000 2	**
A ²	5 276.46	1	5 276.46	775.75	<0.000 1	**
B ²	1 690.53	1	1 690.53	248.54	<0.000 1	**
C ²	2 699.38	1	2 699.38	396.87	<0.000 1	**
总残差	47.61	7	6.80			
失拟项	21.61	3	7.20	1.11	0.443 8	不显著
纯误差	26.00	4				
总回归	1 2149.29	16				

† *表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$);
 $R^2=0.996\ 1$, $R^2_{Adj}=0.991\ 0$ 。

0.000 1, 极显著, 表明该回归模型有意义; 失拟项 $P=0.443\ 8>0.05$, 不显著, 表明回归模型与实际拟合程度良好; 校正系数 $R^2_{Adj}=0.991\ 0$, 可用该模型预测 99.1% 的响应值, 表明模型可信度高。一次项 A、B, 交互项 AC、BC 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对多肽含量影响极显著 ($P<0.01$), 交互项 AC、BC、AC 对多肽含量影响显著 ($P<0.05$)。各因素对多肽含量影响大小排序为酶添加量>底物浓度>酶解 pH。综上, 可用该模型来优化酶解制备 RBPPs 的最佳工艺参数。

2.3.3 交互作用分析 由图 3~图 5 可知, 酶添加量、底物浓度、酶解 pH 对多肽含量的三维立体抛物面图开口均向下, 有峰值, 响应面坡度较陡; 各等高线图均近似椭圆, 等高线较为密集, 说明各因素之间交互作用显著, 与方差分析结果一致。

2.3.4 验证实验 根据模型得到酶解制备 RBPPs 的最佳工艺条件为酶添加量 3 860.413 U/g, 底物浓度 2.074%, 酶解 pH 8.046, 此时 RBPPs 预测值为 135.533 mg/g。为便于

实际操作, 将最佳工艺调整为酶添加量 3 860 U/g, 底物浓度 2.0%, 酶解 pH 8.0, 按此条件进行 3 次验证实验, 测得多肽含量为 135 mg/g, 与预测值无显著性差异, 证实所建立的响应面模型具有较高的可靠性。

2.4 赤小豆多肽液的初步分离纯化及体外降血糖活性

酶解多肽液通过截留超滤离心管分离得 F1 (<3 000)、F2 (3 000~5 000)、F3 (>5 000) 3 个超滤组分。由图 6 可知, F1 (<3 000) 组分的 α -葡萄糖苷酶抑制率和 α -淀粉酶抑制率显著高于分离纯化前及 F2 和 F3 两种组分 ($P<0.05$), 分别达到 79.1% 和 81.0%。说明赤小豆多肽截留相对分子质量越小, 降糖效果越好。Valencia 等^[36]研究表明, 菜豆来源的低相对分子质量多肽组分 (<3 000) 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶表现出最强的抑制活性; 魏光强等^[6]研究表明, 辣木籽来源的 <3 000 降糖肽组分对 α -葡萄糖苷酶表现出最优抑制活性, 与试验结果一致。

3 结论

通过酶解法制备了赤小豆多肽并对其体外降血糖活

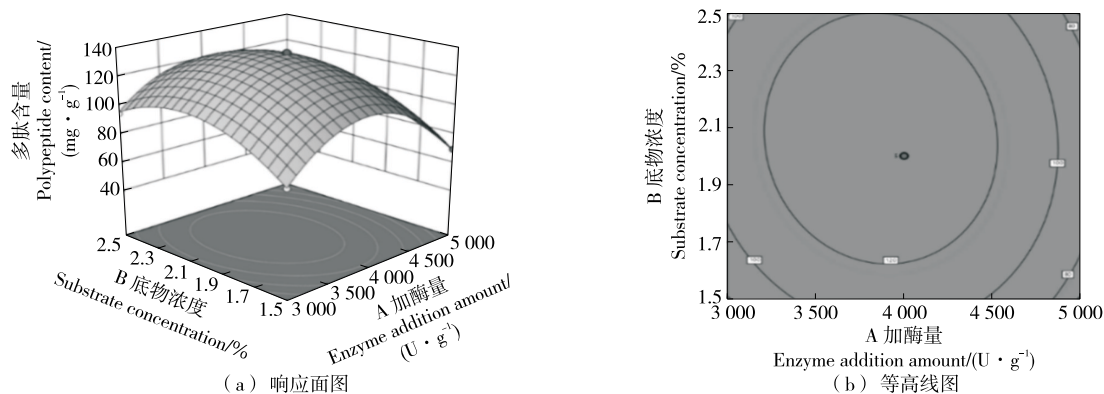


图 3 酶添加量和底物浓度对 RBPPs 含量影响的响应面图及等高线图

Figure 3 Response surface plots and contour plots of the effect of enzyme dosage and substrate concentration on RBPPs content

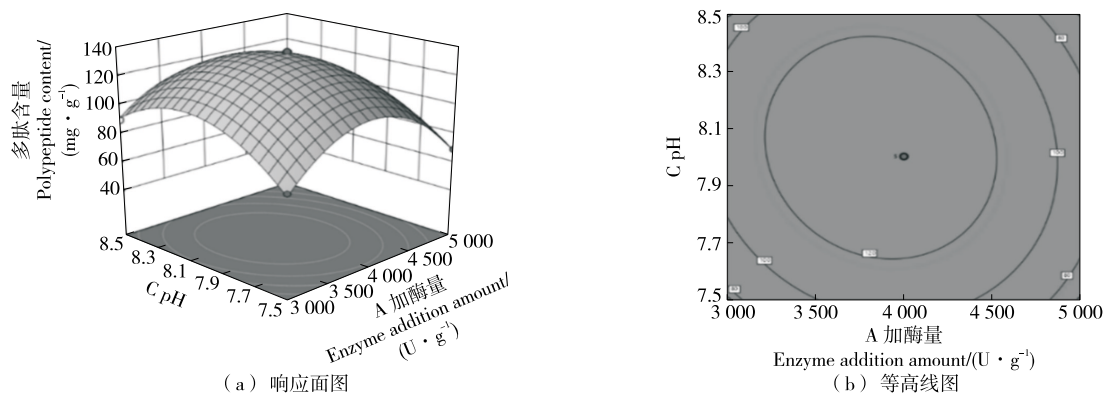


图 4 酶添加量和酶解 pH 对 RBPPs 含量影响的响应面图及等高线图

Figure 4 Response surface plots and contour plots of the effect of enzyme dosage and enzymatic hydrolysis pH on RBPPs content

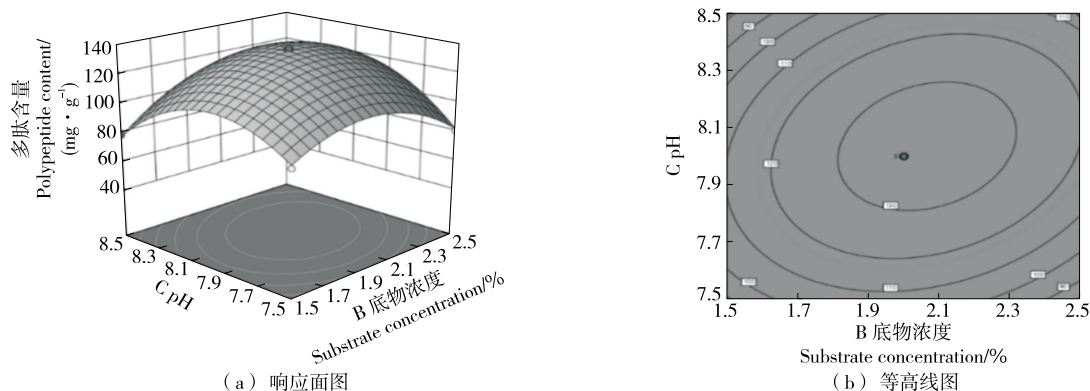


图5 底物浓度和酶解pH对RBPPs含量影响的响应面图及等高线图

Figure 5 Response surface plots and contour plots of the effect of substrate concentration and enzymatic hydrolysis pH on the RBPPs content

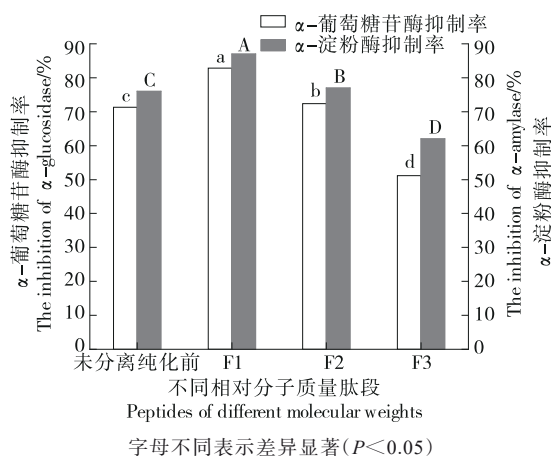


图6 超滤前后RBPPs各组分体外降血糖活性

Figure 6 *In vitro* hypoglycemic activities of each component of RBPPs before and after ultrafiltration

性进行了评价。结果表明,相较于胰蛋白酶和木瓜蛋白酶,碱性蛋白酶更适合用于赤小豆降糖肽的制备。最佳赤小豆多肽酶解工艺条件为酶添加量3 860 U/g、底物浓度2.0%、酶解pH 8.0、酶解时间3 h、酶解温度60℃,此条件下多肽得率为135 mg/g。该多肽液经超滤分离得F1(<3 000)、F2(3 000~5 000)、F3(>5 000)3种组分,其中F1(<3 000)组分的 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制率最好,在10 mg/mL质量浓度下分别达到79.1%和81.0%。综上,利用碱性蛋白酶酶解制备的赤小豆多肽具有良好的降糖活性,其中经超滤制得的小分子肽具有最佳的降糖活性,可作为新的植物源降糖肽进行开发应用。

参考文献

[1] 吴彤. 核桃降血糖活性肽的分离纯化、结构鉴定及降血糖作用机理研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020: 1-8.

WU T. Purification, identification and hypoglycemic mechanism of hypoglycemic peptides from walnut protein hydrolysate[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020: 1-8.

[2] WEI R T, LIN L K, LI T T, et al. Separation, identification, and design of α -glucosidase inhibitory peptides based on the molecular mechanism from *Paeonia ostii* 'Feng Dan' seed protein[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(11): 4 892-4 904.

[3] XU Y, YANG Y, MA C M, et al. Characterization of the structure, antioxidant activity and hypoglycemic activity of soy (*Glycine max* L.) protein hydrolysates[J]. Food Research International, 2023, 173: 113473.

[4] 赵婉宏, 郑喜群, 刘晓兰, 等. 玉米降血糖活性肽结构分析及对糖尿病斑马鱼糖脂代谢的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(3): 115-123.

ZHAO W H, ZHENG X Q, LIU X L, et al. Structure analysis of corn hypoglycemic peptide and its effect on glucose and lipid metabolism of diabetic zebrafish[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(3): 115-123.

[5] 程素娇, 张英, 王立, 等. 天然资源功能因子降血糖研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 387-391.

CHENG S J, ZHANG Y, WANG L, et al. Review of the natural functional ingredients for decreasing blood glucose level[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(12): 387-391.

[6] 魏光强, 赵娜, 范尧珠, 等. 响应面法优化辣木籽降糖肽的酶法制备工艺及其体外活性评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 136-143.

WEI G Q, ZHAO N, FAN Y Z, et al. Optimization of enzymatic preparation process of hypoglycemic peptide from moringa oleifera seeds by response surface methodology and its hypoglycemic activities evaluation *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24): 136-143.

- [7] 李元程. 黑豆 α -葡萄糖苷酶抑制肽的制备研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024: 1-10.
- LI Y C. Preparation of peptides with anti- α -glucosidase activity from black beans[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2024: 1-10.
- [8] 王凯. 美藤果粕多肽降血糖和降血脂活性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021: 1-12.
- WANG K. Hypoglycemic and hypolipidemic activity of peptides from the meal of *Plukenetia volubilis* L. [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021: 1-12.
- [9] 张晓瑞. 酶法制备花生肽及其降血糖活性的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023: 1-61.
- ZHANG X R. Study on enzymatic preparation of peanut peptides and their hypoglycemic activity[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023: 1-61.
- [10] 包焜, 陈萍, 毕云枫, 等. 灵芝活性组分在小鼠体内的降糖功效研究[J]. 中国兽药杂志, 2015, 49(1): 29-32.
- BAO K, CHEN P, BI Y F, et al. Hypoglycemic effect of *Ganoderma lucidum* active component[J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2015, 49(1): 29-32.
- [11] 樊志强. 赤小豆活性成分及种植条件研究[J]. 农业科技与装备, 2023(2): 42-43.
- FAN Z Q. Study on active components and cultivation conditions of rice bean[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2023(2): 42-43.
- [12] 林栋, 张爱民, 王绍校, 等. 赤小豆蛋白的提取工艺优化及其功能性质[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(1): 75-82.
- LIN D, ZHANG A M, WANG S J, et al. Extraction optimization and functional properties of protein isolates from red bean (*Vigna umbellata*) [J]. China Food Additives, 2022, 33(1): 75-82.
- [13] 弓彦珍. 两种药食两用赤小豆幼苗类黄酮与酚类物质含量及抗旱性差异研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021: 1-56.
- GONG Y Z. Differences in flavonoid and phenolic contents and drought resistance of two varieties of medicine and food dual-use *Adzuki* bean seedlings[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2021: 1-56.
- [14] 王晶, 刘鹏莉, 肖海滨. 功能性乳酸菌发酵赤小豆乳的理化及抗氧化特征[J]. 食品科技, 2022, 47(11): 172-178.
- WANG J, LIU P L, XIAO H B. Physicochemical and antioxidant characteristics of rice bean milk fermented by functional lactic acid bacteria[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(11): 172-178.
- [15] 陈俏, 刘晓月, 石亚囡, 等. 赤小豆化学成分的研究[J]. 中成药, 2017, 39(7): 1419-1422.
- CHEN Q, LIU X Y, SHI Y N, et al. Chemical constituents from *Vigna umbellata*[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2017, 39(7): 1419-1422.
- [16] KAUR A, KAUR P, SINGH N, et al. Grains, starch and protein characteristics of rice bean (*Vigna umbellata*) grown in Indian Himalaya regions[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 102-110.
- [17] WU S, LU S, LIU J, et al. Physicochemical properties and bioactivities of rice beans fermented by *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. Engineering, 2021, 7(2): 219-225.
- [18] 毕晓娟. 元宝枫籽粕酶解多肽的提取及活性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022: 1-15.
- BI X J. Study on extraction of enzymatic hydrolyzed polypeptide from acer *Truncatum* seed meal and its activity [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022: 1-15.
- [19] 田雪峰. 翅果油粕 α -葡萄糖苷酶抑制肽的制备、分离及其作用机理的研究[D]. 太原: 山西大学, 2024: 1-30.
- TIAN X F. Preparation and isolation of *Elaeagnus mollis* oil meal α -glucosidase inhibitory peptide and its mechanism of action[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024: 1-30.
- [20] 张慧荣, 郭苗苗, 陈晨, 等. 三种豆类植物多肽的制备工艺及其活性研究[J]. 日用化学工业(中英文), 2023, 53(4): 423-429.
- ZHANG H R, GUO M M, CHEN C, et al. The preparation process of three leguminous plant peptides and their activities [J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2023, 53(4): 423-429.
- [21] PADHI S, CHOURASIA R, KUMARI M, et al. Production and characterization of bioactive peptides from rice beans using *Bacillus subtilis*[J]. Bioresource Technology, 2022, 351: 126932.
- [22] 孔彩羽. 黑豆生物活性肽的提取制备及抗衰老、降糖活性研究[D]. 太原: 山西大学, 2024: 1-54.
- KONG C Y. Extraction and preparation of black bean bioactive peptides and their anti-aging and hypoglycemic activities[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024: 1-54.
- [23] 郝晓华, 郑凯南, 刘可心. 碱性蛋白酶酶解藜麦芽制备多肽工艺的研究[J]. 中国饲料, 2022(9): 104-107, 112.
- HAO X H, ZHENG K N, LIU K X. Study on preparation of peptides from Quinoa malt by alkaline protease[J]. China Feed, 2022(9): 104-107, 112.
- [24] 李昱菲. 鹰嘴豆 α -葡萄糖苷酶抑制肽的酶法制备及其稳定性初探[D]. 石河子: 石河子大学, 2016: 3-16.
- LI Y F. Preparation of α -glucosidase inhibitory peptides by enzymatic hydrolysis from chickpea protein and its stability research[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016: 3-16.
- [25] 郑天芝. 茶渣多肽的制备及其活性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018: 1-85.
- ZHENG T Z. Study on preparation and activity of tea-residue polypeptide[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018: 1-85.
- [26] 姜东. 茶籽多肽制备及其抗氧化活性研究[D]. 芜湖: 安徽工

- 程大学, 2020: 1-15.
- JIANG D. Preparation and antioxidant activity of tea seed polypeptides[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2020: 1-15.
- [27] 韩鹏薇, 易彤, 李虹辉, 等. 虾壳源蛋白水解物降糖降脂活性评价及肽序分析[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 148-157.
- HAN P W, YI T, LI H H, et al. Study on hypoglycemic and lipid-lowering activity of shrimp shell-derived enzymatic hydrolysate and peptide sequence function analysis[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 148-157.
- [28] WANG S, LI Y, HUANG D J, et al. The inhibitory mechanism of chlorogenic acid and its acylated derivatives on α -amylase and α -glucosidase[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131334.
- [29] 张靖, 苏琳, 陈晓雨, 等. 羊骨抗氧化肽酶解法制备和响应面工艺优化[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(3): 18-27.
- ZHANG J, SU L, CHEN X Y, et al. Optimization of enzymatic preparation of antioxidant peptides from sheep bone by response surface methodology[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(3): 18-27.
- [30] ZENG Y, CHENG H Y, SHEN J P, et al. Response surface optimization of active peptides of *Rana spinosa* (Quasipaa spinosa) meat process and evaluation of immunomodulatory activity[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(4): 2 573-2 586.
- [31] 张志国, 孙晓燕. 碱性蛋白酶与外切蛋白酶酶解大豆分离蛋白及脱苦工艺的研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(8): 53-57.
- ZHANG Z G, SUN X Y. Study on enzymolysis and debittering process of soybean protein isolate by alkaline protease and circumscribed protease[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(8): 53-57.
- [32] 吕小京, 操德群, 徐年军. 响应面法优化酶解法制备海洋微藻微拟球藻抗氧化肽工艺[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 183-188.
- LÜ X J, CAO D Q, XU N J. Optimization of enzymatic preparation of antioxidant peptides from protein hydrolysate of the marine microalgae *nannochloropsis* by response surface methodology[J]. Food Science, 2018, 39(6): 183-188.
- [33] ZHENG Z J, SI D Y, AHMAD B, et al. A novel antioxidative peptide derived from chicken blood corpuscle hydrolysate[J]. Food Research International, 2018, 106: 410-419.
- [34] 高翔, 刘晓兰, 李冠龙, 等. 玉米胚芽粕降血糖功能肽的制备及其体外降血糖活性[J/OL]. 食品工业科技. (2025-04-15) [2025-05-13]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025010220>.
- GAO X, LIU X L, LI G L, et al. Preparation of hypoglycemic functional peptides from corn germ meal and its hypoglycemic activity *in vitro*[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. (2025-04-15) [2025-05-13]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025010220>.
- [35] 毕晓娟, 魏亮, 杨慧莹, 等. 响应面法优化元宝枫籽粕酶解工艺及多肽功能特性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 204-214.
- BI X J, WEI L, YANG H Y, et al. Optimization of the enzymatic hydrolysis process of acer *truncatum* seed meal by response surface methodology and the functional characteristics of the polypeptide obtained[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 204-214.
- [36] VALENCIA-MEJÍA E, BATISTA K A, FERNÁNDEZ J J A, et al. Antihyperglycemic and hypoglycemic activity of naturally occurring peptides and protein hydrolysates from easy-to-cook and hard-to-cook beans (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Food Research International, 2019, 121: 238-246.