

汉麻仁抗血栓活性肽的制备工艺优化

石杰,张正海,魏连会,杨庆丽,李国巍,董艳,姬妍茹

(黑龙江省科学院大庆分院,黑龙江大庆163319)

摘要:为获得具有抗血栓活性的汉麻仁多肽,以汉麻仁蛋白粉为原料,对其进行酶解得到汉麻仁抗血栓活性肽,并通过超滤纯化。通过单因素试验和响应面法优化酶解工艺,并对纯化的汉麻仁抗血栓活性肽的分子量分布进行测定。结果表明:汉麻仁蛋白粉酶解制备汉麻仁抗血栓活性肽的最佳工艺条件为采用胰蛋白酶、酶解温度40℃、料液比1:25、酶添加量5.68%、pH 8.0,在此条件下酶解5 h凝血酶抑制率为84.70%;分子量在3 000 Da以下的汉麻仁抗血栓活性肽在质量浓度为0.01 g/mL时有更高的凝血酶抑制率,可以达到99.38%;分子量在3 000 Da以下的汉麻仁抗血栓活性肽中近70%分子质量为500~1 500 Da。综上,该方法制备并纯化得到的汉麻仁抗血栓活性肽具有高凝血酶抑制活性。

关键词:汉麻仁;抗血栓活性肽;酶解;响应面;凝血酶抑制率

中图分类号:TS229;TS201.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)01-0109-06

Preparation process optimization of hemp kernel antithrombotic active peptide

SHI Jie, ZHANG Zhenghai, WEI Lianhui, YANG Qingli, LI Guowei, DONG Yan, JI Yanru

(Daqing Branch of Heilongjiang Academy of Sciences, Daqing 163319, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to obtain hemp kernel polypeptide with antithrombotic activity, hemp kernel protein powder was used as raw material to obtain hemp kernel antithrombotic active peptide by enzymatic hydrolysis, and it was purified by ultrafiltration. The enzymatic hydrolysis process was optimized by single factor experiment and response surface methodology, and the molecular weight distribution of hemp kernel antithrombotic active peptide purified were identified. The results showed that the optimal conditions for the enzymatic hydrolysis process were obtained as follows: using trypsin, enzymatic hydrolysis temperature 40℃, solid-liquid ratio 1:25, enzyme dosage 5.68%, and pH 8.0. Under these conditions, the thrombin inhibition rate was 84.70% when the enzymatic hydrolysis time was 5 h. The hemp kernel antithrombotic active peptide with a molecular weight below 3 000 Da had a stronger thrombin inhibition rate at a mass concentration of 0.01 g/mL, which could reach 99.38%. Nearly 70% of the peptides with a molecular weight below 3 000 Da were peptides with a molecular weight of 500-1 500 Da. In summary, the hemp kernel antithrombotic active peptide prepared and purified by this method has high thrombin inhibitory activity.

Key words: hemp kernel; antithrombotic active peptide; enzymatic hydrolysis; response surface methodology; thrombin inhibition rate

收稿日期:2023-07-06;修回日期:2024-07-22

基金项目:黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2022-1-C004);黑龙江省科学院重大攻关项目(ZDGG2024DQ01)

作者简介:石杰(1984),女,副研究员,硕士,研究方向为农产品加工(E-mail)shijie0456@163.com。

通信作者:董艳,研究员(E-mail)dy0770@126.com。

血栓类疾病是目前国家重点监控防治的一类疾病^[1]。特别是在新冠病毒出现以来,越来越多的研究发现静脉血栓栓塞可能是导致新冠病毒重症患者死亡的主要原因^[2]。因此,血栓的预防和治疗已成为当今学术界一大热点问题。目前,抗血栓药物主要

分为抗凝血药和溶栓药,其中抗凝血药主要通过抑制凝血酶作用或抗血小板聚集预防血栓的产生^[3]。传统的抗凝药物由于存在出血、药效不够、选择性差等弊端^[4-10],使得安全性高、易吸收、易代谢的食源性抗血栓活性肽受到了研究人员的青睐^[11-14]。

汉麻(*Cannabis sativa* L.),又称火麻,关于汉麻,在医学古籍《本草纲目》中曾记载:“治中风汗出……破积血,复血脉,去风痺皮顽,令人心欢。”现代医学研究表明,汉麻仁有较好的降血压、抗炎、抗血栓形成的作用^[15-16]。丛涛等^[17]研究了汉麻仁对生长期大鼠营养生理功能的影响,发现服用汉麻仁蛋白粉的大鼠血清总蛋白水平显著低于服用酪蛋白和大豆蛋白的,但其血清白蛋白占总蛋白的比例最高,血清白蛋白具有抑制血小板聚集、抗凝血以及提高免疫力等多种生理功能,是评价机体内蛋白质营养状况的重要指标。

汉麻仁活性肽一般通过酶解反应获取,不同氨基酸序列、不同结构或酶解物组合具有不同的功能活性,目前国内外已有关于汉麻仁抗氧化活性肽、汉麻仁降血压活性肽、汉麻仁降血脂活性肽、汉麻仁抗炎活性肽等相关研究^[18],但有关汉麻仁抗血栓活性肽的研究较少。本研究以汉麻仁蛋白粉为原料,采用酶解法制备汉麻仁抗血栓活性肽,通过单因素试验及响应面试验优化酶解工艺条件,对酶解产物进一步超滤纯化,并测定了多肽的分子质量分布,以期原发性血栓疾病及其他疾病引致的血栓发生提供一条安全的防治途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

汉麻仁蛋白粉,本实验室以汉麻仁为原料通过超临界 CO₂ 萃取除油后获得,蛋白质含量为 69%。

胰蛋白酶(猪源、EC3.4、酶活力 1:250)、胃蛋白酶(猪源、EC3.4、酶活力 1:3 000)、中性蛋白酶(EC3.4、酶活力 50 U/mg)、凝血酶(EC3.4、酶活力 2 000 U/mg)、纤维蛋白原(牛血浆),上海麦克林生化科技有限公司;木瓜蛋白酶(酶活力 100 000 U/g)、风味蛋白酶(酶活力 20 000 U/g)、氨肽酶(酶活力 5 000 U/g)、碱性蛋白酶(酶活力 200 000 U/g),无锡雪酶酶制剂科技有限公司。

盐酸、氢氧化钠、三羧甲基氨基甲烷(Tris),均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

Epoch 酶标仪,美国 Bio Tek 公司;HH-1 数显恒温水浴锅,金坛市盛蓝仪器制造有限公司;VFD-

6000 真空冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司;ZD-85 恒温振荡箱,常州恒睿仪器设备制造有限公司;FlowMem 0015 超滤设备,厦门福美科技有限公司;pH 计,瑞士梅特勒公司;CT15RT 台式高速冷冻离心机,上海天美科学仪器有限公司;Q Exactive 质谱仪、EASY-n1000 高效液相色谱仪,赛默飞世尔科技公司。

1.2 试验方法

1.2.1 汉麻仁抗血栓活性肽的制备

称取一定质量的汉麻仁蛋白粉,按一定的酶添加量和料液比分别加入蛋白酶和水,采用 1 mol/L 的 NaOH 溶液和 1 mol/L 的 HCl 溶液调节体系 pH 至一定值,在一定温度下酶解 5 h 后,90℃ 灭酶 10 min,5 000 r/min 离心 15 min,取上清液用于凝血酶抑制率的测定。

1.2.2 凝血酶抑制率的测定

采用酶标仪比色法测定凝血酶抑制率。以 Tris-HCl 缓冲液(0.05 mol/L, pH 7.4) 配制纤维蛋白原溶液(1.5 mg/mL)和凝血酶溶液(10 U/mL)。酶标板上加入 140 μL 纤维蛋白原溶液和 40 μL 样品溶液,混匀后于 405 nm 波长处测定吸光值(A_{SB}),加入 20 μL 凝血酶溶液后于 37℃ 反应 20 min,于 405 nm 波长处测定吸光值(A_S)。采用 40 μL Tris-HCl 缓冲液为空白,其他操作同样品管,分别测定吸光值(A_{CB}和 A_C)。按下式计算凝血酶抑制率(Y)。

$$Y = \frac{(A_C - A_{CB}) - (A_S - A_{SB})}{A_C - A_{CB}} \times 100\% \quad (1)$$

1.2.3 汉麻仁抗血栓活性肽的分级纯化

使用 3 000 Da 和 5 000 Da 截留分子质量的超滤膜对 1.2.1 中得到的上清液进行超滤纯化,将滤液进行冻干,得到分子质量分别为 3 000 Da 以下和 5 000 Da 以下两种汉麻仁抗血栓活性肽。

1.2.4 汉麻仁抗血栓活性肽鉴定及分子质量分布的测定

采用 LC-MS/MS 对分子质量在 3 000 Da 以下的汉麻仁抗血栓活性肽(冻干粉)进行分子质量分布测定。

LC 分离:样品由自动进样器上样到 Zorbax 300SB-C18 peptide traps,再经过液相色谱柱分离。分离条件:RP-C18 液相色谱柱(0.15 mm × 150 mm, 5 μm),以 95% 的流动相 A 进行平衡;流动相 A 为 0.1% 甲酸水溶液,流动相 B 为 0.1% 甲酸乙腈水溶液(乙腈体积分数 84%),梯度洗脱程序为 0~55 min 4%~50% B,55~59 min 50%~100% B,59~60 min 100% B。

MS 鉴定:分析时长 60 min,检测方式正离子;多

肽和多肽碎片的质量电荷比每次全扫描(Full scan)后采集 10 个碎片图谱(MS2 scan)。

检索数据库:质谱测试原始文件(Raw File)用软件 MaxQuant 1.5.5.1 检索相应的数据库。

1.2.5 数据处理

分别采用 SPSS 软件和 Design Expert V8.0.6 软件进行方差分析及响应面分析。

2 结果与分析

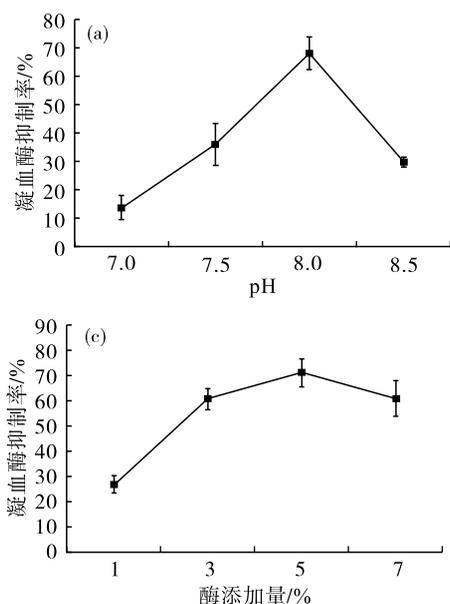
2.1 蛋白酶的筛选

称取汉麻仁蛋白粉 5 g,在酶添加量 5%、料液比 1:16、各蛋白酶的最适 pH 和温度(见表 1)条件下酶解 5 h,测定不同酶解液的凝血酶抑制率,结果见图 1。

表 1 各蛋白酶的最适 pH 和温度

Table 1 The optimal pH and temperature for each protease

蛋白酶	最适 pH	最适温度/℃
中性蛋白酶	6.8	55
木瓜蛋白酶	6.8	55
碱性蛋白酶	8.0	55
风味蛋白酶	6.8	50
氨肽酶	6.8	50
胃蛋白酶	3.5	37
胰蛋白酶	8.0	37



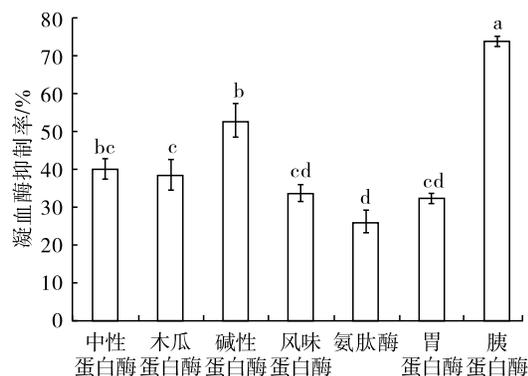
注:基础条件为汉麻仁蛋白粉质量 1.5 g,酶解时间 5 h,酶解 pH 8.0,料液比 1:16,酶添加量 5%,酶解温度 37 ℃

Note: Basic conditions are hemp kernel protein mass 1.5 g, enzymatic hydrolysis time 5 h, pH 8.0, solid - liquid ratio 1:16, enzyme dosage 5% and enzymatic hydrolysis temperature 37 ℃

图 2 汉麻仁蛋白粉酶解的单因素试验结果

Fig. 2 Single factor experiment results of enzymatic hydrolysis of hemp kernel protein powder

由图 2a 可知,随着酶解 pH 的升高,酶解液的凝血酶抑制率逐渐升高,酶解 pH 8.0 时达到 67.86%,但是当酶解 pH 为 8.5 时凝血酶抑制活性又有所下降,这可能是由于 pH 过高导致汉麻仁蛋白或胰蛋



注:不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). The same below

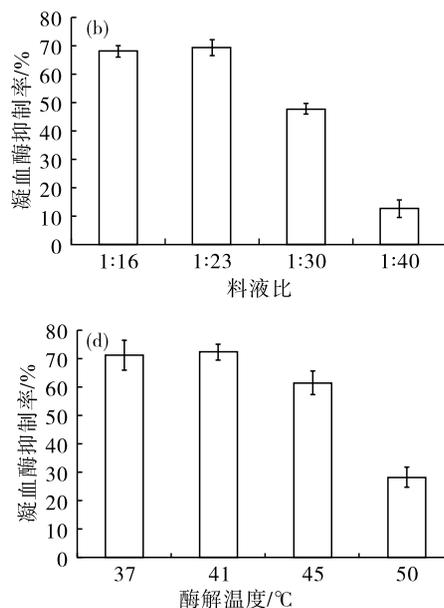
图 1 不同酶解液的凝血酶抑制率

Fig. 1 Thrombin inhibition rate of different enzymatic hydrolysate

由图 1 可见,各酶解液对凝血酶均具有一定的抑制作用,其中胰蛋白酶酶解液对凝血酶的抑制作用显著高于其他蛋白酶,其凝血酶抑制率达到 73.65%。因此,选择胰蛋白酶进行酶解工艺优化试验。

2.2 汉麻仁蛋白粉酶解单因素试验

汉麻仁蛋白粉酶解的单因素试验结果见图 2。



白酶部分变性引起的酶解效率下降,使得酶解获得的抗血栓肽减少。

由图 2b 可知,较高的料液比有利于凝血酶抑制活性升高,特别是在料液比为 1:16 和 1:23 时,酶解

液的凝血酶抑制率均达到 70% 左右,过低的料液比降低了酶解液的凝血酶抑制活性,这可能是由于过多的水稀释了体系中汉麻仁抗血栓活性肽的浓度导致的。

由图 2c 可知,当酶添加量为 1% 时凝血酶抑制率较低,只有 26%,这是由于反应体系中胰蛋白酶浓度较低,从而导致水解度较低,生成的汉麻仁抗血栓活性片段也较少。在酶添加量为 5% 时凝血酶抑制率达到最大,为 71.55%,随后随着酶添加量继续增加,凝血酶抑制率反而下降,分析原因可能是由于酶添加量过高导致了底物过度酶解,降低了体系中具有汉麻仁抗血栓活性的肽片段的浓度。

由图 2d 可知,随着酶解温度的升高,凝血酶抑制率从平稳逐渐降低,在 41 °C 时达到最大值,随后开始下降,在 50 °C 时凝血酶抑制率降至 27.98%,这可能是由于过高的温度导致胰蛋白酶活性下降,使汉麻仁抗血栓活性肽的浓度降低。

2.3 汉麻仁蛋白粉酶解的响应面优化试验

根据单因素试验结果,固定汉麻仁蛋白粉质量 1.5 g,酶解时间 5 h,选取酶解温度、料液比、酶添加量和酶解 pH 为影响因素,以凝血酶抑制率为响应值,设计四因素三水平的响应面试验,利用 Design Expert V8.0.6 软件进行响应面优化。响应面试验因素与水平见表 2,响应面试验设计及结果见表 3,方差分析见表 4。

表 2 响应面试验因素与水平

Table 2 Factor and level of response surface methodology

水平	A 酶解温度/°C	B 料液比	C 酶添加量/%	D 酶解 pH
-1	37	1:16	3	7.5
0	41	1:23	5	8.0
1	45	1:30	7	8.5

表 3 响应面试验设计及结果

Table 3 Design and result of response surface methodology

试验号	A	B	C	D	凝血酶抑制率/%
1	-1	-1	0	0	30.16
2	1	-1	0	0	29.26
3	-1	1	0	0	40.77
4	1	1	0	0	30.28
5	0	0	-1	-1	55.94
6	0	0	1	-1	57.98
7	0	0	-1	1	67.21
8	0	0	1	1	80.34
9	-1	0	0	-1	45.07
10	1	0	0	-1	48.44
11	-1	0	0	1	81.33
12	1	0	0	1	49.15
13	0	-1	-1	0	35.75

续表 3

试验号	A	B	C	D	凝血酶抑制率/%
14	0	1	-1	0	42.17
15	0	-1	1	0	35.81
16	0	1	1	0	45.74
17	-1	0	-1	0	51.76
18	1	0	-1	0	44.49
19	-1	0	1	0	59.48
20	1	0	1	0	53.87
21	0	-1	0	-1	44.20
22	0	1	0	-1	36.75
23	0	-1	0	1	35.63
24	0	1	0	1	72.32
25	0	0	0	0	78.63
26	0	0	0	0	76.18
27	0	0	0	0	74.72
28	0	0	0	0	74.93
29	0	0	0	0	75.94

利用 Design Expert V8.0.6 软件对表 3 数据进行多元回归拟合,得到各因素与响应值凝血酶抑制率(Y)回归模型拟合方程为 $Y = 76.08 - 4.42A + 4.77B + 2.99C + 8.13D - 2.40AB + 0.41AC - 8.89AD + 0.88BC + 11.03BD + 2.77CD - 16.45A^2 - 27.10B^2 - 8.14C^2 - 2.66D^2$ 。

表 4 方差分析

Table 4 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	方差	F	p
模型	8 043.35	14	574.53	53.07	<0.000 1 **
A	234.95	1	234.95	21.70	0.000 4 **
B	272.74	1	272.74	25.19	0.000 2 **
C	107.40	1	107.40	9.92	0.007 1 **
D	793.93	1	793.93	73.33	<0.000 1 **
AB	22.99	1	22.99	2.12	0.167 1
AC	0.69	1	0.69	0.06	0.804 9
AD	315.90	1	315.90	29.18	<0.000 1 **
BC	3.07	1	3.07	0.28	0.602 4
BD	486.94	1	486.94	44.98	<0.000 1 **
CD	30.70	1	30.70	2.84	0.114 3
A ²	1 754.32	1	1 754.32	162.04	<0.000 1 **
B ²	4 763.72	1	4 763.72	440.00	<0.000 1 **
C ²	429.40	1	429.40	39.66	<0.000 1 **
D ²	45.82	1	45.82	4.23	0.058 8
残差	151.57	14	10.83		
失拟项	141.87	10	14.19	5.85	0.051 7
纯误差	9.70	4	2.43		
总和	8 194.92	28			

注: * 表示显著($p < 0.05$), ** 表示极显著($p < 0.01$)

Note: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

由表4可知:回归模型 p 小于0.01,极显著;失拟项 p 为0.0517,大于0.05,不显著。模型回归决定系数(R^2)为0.9815,说明所建模型拟合效果较好,可以解释98.15%的响应值变化。模型校正决定系数(R_{Adj}^2)为0.9630,说明模型的准确性较好。因此,该方法可用于分析和预测汉麻仁抗血栓活性肽的酶解制备工艺。4个因素对凝血酶抑制率的影响极显著,交互项 AD 和 BD 影响极显著。根据 F 值大小得出4个因素对凝血酶抑制率的影响大小依次为酶解 $pH >$ 料液比 $>$ 酶解温度 $>$ 酶添加量。通过回归模型的预测,得到酶解工艺的最佳条件为酶解温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、料液比1:25、酶添加量5.68%、酶解 pH 8.0,该条件下凝血酶抑制率的预测值为87.83%。

在最佳工艺条件下进行了3次验证试验,凝血酶抑制率平均值为84.70%,与回归模型预测值相比,相对误差为3.57%,表明本方法具有较好的预测性和准确性,能够预测和分析汉麻仁蛋白粉酶解的最佳工艺。

2.4 汉麻仁抗血栓活性肽的纯化

2.4.1 汉麻仁抗血栓活性肽的分级纯化

采用超滤膜技术分离最佳工艺条件下得到的汉麻仁抗血栓活性肽,分别得到分子质量3000 Da以下和5000 Da以下两种汉麻仁抗血栓活性肽,分别将其配制成质量浓度为0.005、0.01、0.02 g/mL的溶液,测定其凝血酶抑制率,结果如表5所示。

表5 不同分子质量、不同质量浓度汉麻仁抗血栓活性肽的凝血酶抑制率

Table 5 Thrombin inhibition rate of hemp kernel antithrombotic active peptide with different molecular weight and mass concentrations

质量浓度/(g/mL)	凝血酶抑制率/%	
	3 000 Da 以下	5 000 Da 以下
0.005	83.55	48.39
0.01	99.38	62.44
0.02	97.23	59.64

由表5可知,相较分子质量在5000 Da以下的汉麻仁抗血栓活性肽,分子质量在3000 Da以下的汉麻仁抗血栓活性肽有着更高的凝血酶抑制率,且在质量浓度为0.01 g/mL时最高,达到99.38%,抗血栓活性远超过涂茂林等^[19]制备的酪蛋白水解液(76.25%)和冯立婷^[20]制备的贻贝抗血栓肽(72.51%)。随着汉麻仁抗血栓活性肽质量浓度的继续升高,凝血酶抑制率变化不明显。

2.4.2 汉麻仁抗血栓活性肽的分子质量分布

采用LC-MS/MS对分子质量3000 Da以下的

汉麻仁抗血栓活性多肽进行鉴定,结果得到多肽序列1741个,氨基酸数量均在25个以下,汉麻仁抗血栓活性肽中不同分子质量多肽占比见图3。

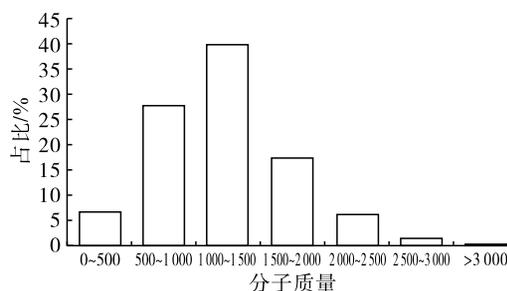


图3 分子质量3000 Da以下的汉麻仁抗血栓活性肽的分子质量分布

Fig. 3 Molecular weight distribution of hemp kernel antithrombotic active peptide with molecular weight below 3000 Da

由图3可知,分子质量在1000~1500 Da之间的多肽丰度约占总体肽段丰度的40%,数量为677个,统计发现多数为13个氨基酸以下的多肽。分子质量在500~1000 Da的多肽丰度约占总体肽段丰度的27.5%,数量为302个。由此可见,酶解后汉麻仁蛋白分解成了小分子多肽,这些小分子多肽的抗血栓活性较高。但酶解后仍有小部分大分子的汉麻仁多肽,会降低汉麻仁多肽的抗血栓活性。

3 结论

本文以汉麻仁蛋白粉为原料,通过酶解法得到汉麻仁蛋白抗血栓多肽,并进行超滤纯化。通过单因素试验和响应面法得到汉麻仁蛋白的最佳酶解条件为酶解温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、料液比1:25、酶添加量5.68%、酶解 pH 8.0,在此条件下凝血酶抑制率最大,为84.70%。通过超滤膜技术得到分子质量3000 Da以下和5000 Da以下两种汉麻仁抗血栓活性肽,发现分子质量在3000 Da以下的汉麻仁抗血栓活性肽在质量浓度为0.01 g/mL时有更强的凝血酶抑制率,可以达到99.38%。同时,分子质量在3000 Da以下的肽中近70%分子质量为500~1500 Da。本研究为下一步进行汉麻仁抗血栓活性肽体内评价和抗血栓机制方面的研究奠定了基础,为黑龙江特色农产品的营养化、功能化及增值开发提供了重要的理论支撑。

参考文献:

- [1] 张筱杉,刘明,刘春龙,等. 中医药预防静脉血栓栓塞的研究概述[J]. 山东中医药大学学报, 2023, 47(1): 116-120.
- [2] AHMED S, ZIMBA O, GASPARYAN A Y. Thrombosis in Coronavirus disease 2019 (COVID-19) through the prism

- of Virchow's triad[J]. Clin Rheumatol, 2020, 39(9): 2529-2543.
- [3] 张珀, 邓云, 桂阳, 等. 抗血栓药物作用机制的研究进展[J]. 基层医学论坛, 2020, 24(25): 3682-3685.
- [4] 杨沁雨, 章泽恒. 血小板在炎症型血栓形成中的作用[J]. 中南药学, 2022, 20(3): 649-656.
- [5] 于莹. 浅析阿司匹林抗血小板治疗的药学服务[J]. 中国医药指南, 2018, 16(3): 296.
- [6] NARAN N H, CHETTY N. The *in vitro* effect of ridogrel on platelet function in normocholesterolaemic and familial hypercholesterolaemic type IIa subjects[J]. Thromb Res, 1997, 88(5): 399-407.
- [7] 杨颖, 蒋金法. 新型抗血小板药物研究进展[J]. 外科研究与新技术, 2014, 3(4): 263-266.
- [8] LEE D H, CHUN E J, HUR J H, et al. Effect of sarpogrelate, a selective 5-HT_{2A} receptor antagonist, on characteristics of coronary artery disease in patients with type 2 diabetes[J]. Atherosclerosis, 2017, 257: 47-54.
- [9] DE LUCA G, SAVONITTO S, VAN'T HOF A W J, et al. Platelet GP IIb-IIIa receptor antagonists in primary angioplasty: Back to the future[J]. Drugs, 2015, 75(11): 1229-1253.
- [10] 朱德昊. 浅谈华法林的抗凝作用[J]. 临床医药文献电子杂志, 2016, 3(40): 8091-8092.
- [11] TU M, CHENG S, LU W, et al. Advancement and prospects of bioinformatics analysis for studying bioactive peptides from food-derived protein: Sequence, structure, and functions[J]. Trac Trends Anal Chem, 2018, 105: 7-17.
- [12] CHABANCE B, JOLLÈS P, IZQUIERDO C, et al. Characterization of an antithrombotic peptide from kappa-casein in newborn plasma after milk ingestion[J]. Br J Nutr, 1995, 73(4): 583-590.
- [13] NASRI R, AMOR I B, BOUGATEF A, et al. Anticoagulant activities of goby muscle protein hydrolysates[J]. Food Chem, 2012, 133(3): 835-841.
- [14] ZHANG W, TIAN G, GENG X, et al. Isolation and characterization of a novel lectin from the edible mushroom *Stropharia rugosoannulata* [J]. Molecules, 2014, 19(12): 19880-19891.
- [15] 张明发, 沈雅琴, 朱自平, 等. 火麻仁的镇痛、抗炎、抗血栓形成作用研究[J]. 基层中药杂志, 1999(1): 13-15.
- [16] 魏月媛, 李理. 火麻仁的功效及使用安全性研究进展[J]. 食品工业, 2015, 36(7): 256-260.
- [17] 丛涛, 江雪媛, 赵霖, 等. 火麻仁蛋白质粉对生长期大鼠营养生理功能的影响研究[J]. 中国食品学报, 2011, 11(2): 60-69.
- [18] 卫萍, 游向荣, 张雅媛, 等. 火麻蛋白加工特性、改性及其活性肽研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 231-242.
- [19] 涂茂林, 冯立婷, 刘宏伟, 等. 酪蛋白抗血栓活性肽的制备及其鉴定[C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第十三届年会论文摘要集. 北京: 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 大连工业大学食品科学与工程学院, 国家海洋食品工程技术研究中心, 2016.
- [20] 冯立婷. 酶解制备贻贝抗血栓肽及其作用机制初探[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

.....

(上接第 96 页)

- [25] 颜蕾. 大豆蛋白水解物/黄原胶低脂冰淇淋制备及抗融品质研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
- [26] 杨焜婷. 豌豆蛋白结构修饰对冷冻充气乳液品质特性影响研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [27] 许馨予, 杨鹤隽, 贾斌, 等. 大豆分离蛋白-高酯柑橘果胶-没食子酸复合 Pickering 乳液制备及其稳定性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 42-51.
- [28] 李天赐, 陈毅保, 刘昆仑, 等. 界面蛋白对水酶法提取植物油过程中乳状液稳定性影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 188-195.
- [29] ZIAEIFAR L, LABBAFI MAZRAE SHAHI M, SALAMI M, et al. Effect of casein and inulin addition on physico-chemical characteristics of low fat camel dairy cream[J]. Int J Biol Macromol, 2018, 117: 858-862.
- [30] 聂云青. 植物基酸性冷冻搅打乳液及其品质特性研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2022.