

酶解联合美拉德反应制备具有抗氧化活性的扇贝裙边调味基料

刘鹏莉*, 遇艳萍, 王晶, 杨爱华, 郭丹

(烟台职业学院食品与生化工程系, 烟台 264670)

摘要: **目的** 探究酶解联合美拉德反应制备具有抗氧化活性的扇贝裙边调味基料的工艺参数。**方法** 以扇贝裙边为原料, 采用酶解法制备扇贝裙边调味基料, 并利用美拉德反应增强调味基料的抗氧化活性。以水解度为指标, 通过单因素实验探索复合蛋白酶添加量、酶解温度、酶解时间和 pH 对扇贝裙边酶解效果的影响, 并通过正交实验对酶解工艺进行优化, 确定扇贝裙边酶解最佳条件。将扇贝裙边酶解液与葡萄糖混合加热进行美拉德反应, 测定样品的褐变度、抗氧化活性, 并进行感官评价。**结果** 扇贝裙边最佳酶解工艺为: 蛋白酶添加量 3%、酶解温度 50°C、酶解时间 8 h、pH 8。扇贝裙边酶解液与葡萄糖 110°C 加热 3.0 h 后, 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基清除能力提高 1.7 倍, 扇贝裙边调味基料滋味鲜美, 香气浓郁, 无腥臭味道。**结论** 在最佳工艺参数条件下, 联合美拉德反应处理制得的扇贝裙边调味基料具有较好的抗氧化活性, 本研究可为功能性调味料的开发及扇贝裙边高值化利用提供理论支持。

关键词: 扇贝裙边; 酶解; 美拉德反应; 抗氧化活性; 调味基料

Preparation of scallop mantle seasoning material with antioxidant activity by enzymolysis coupled with Maillard reaction

LIU Peng-Li*, YU Yan-Ping, WANG Jing, YANG Ai-Hua, GUO Dan

(Department of Food and Biochemical Engineering, Yantai Vocational College, Yantai 264670, China)

ABSTRACT: Objective To explore the process parameters of scallop mantle seasoning material with antioxidant activity by enzymatic hydrolysis coupled with Maillard reaction. **Methods** Scallop mantle was used as raw material to prepare scallop mantle seasoning material by enzymatic hydrolysis, and Maillard reaction was used to enhance the antioxidant activity of seasoning material. Taking degree of hydrolysis as index, the effects of addition amount of compound protease, enzymatic hydrolysis temperature, enzymatic hydrolysis time and pH on the enzymatic hydrolysis effect of scallop mantle were investigated by single factor test, and the optimum conditions of enzymatic hydrolysis of scallop mantle were determined by orthogonal experiment. The scallop mantle hydrolysates mixed with glucose were heated for Maillard reaction, the browning degree, antioxidant activity and sensory evaluation of the sample was determined. **Results** The optimal enzymatic hydrolysis of scallop mantle was as follow: The additive amount of

基金项目: 烟台职业学院横向课题项目(HX2021039)、烟台职业学院博士科研基金项目(2020002)

Fund: Supported by the Horizontal Subject of Yantai Vocational College (HX2021039), and the Doctoral Research Fund of Yantai Vocational College (2020002)

*通信作者: 刘鹏莉, 博士, 讲师, 主要研究方向为功能性食品。E-mail: liupengli2020@163.com

*Corresponding author: LIU Peng-Li, Ph.D, Lecturer, Department of Food and Biochemical Engineering, Yantai Vocational College, No.2018, Binhai Road, Gaoxin District, Yantai 264670, China. E-mail: liupengli2020@163.com

enzyme was 3%, the temperature was 50°C, the time was 8 h, and the pH was 8. After 3.0 h of Maillard reaction with glucose at 110°C, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radical scavenging activity of scallop mantle seasoning material was enhanced by 1.7 fold, and the scallop mantle seasoning material tasted delicious with a strong aroma but not fishy smell. **Conclusion** Under the optimal process parameters, the scallop mantle seasoning material prepared by Maillard reaction has good antioxidant activity. This study can provide theoretical supports for the development of functional seasoning material and high-value utilization of scallop mantle.

KEY WORDS: scallop mantle; enzymolysis; Maillard reaction; antioxidant activity; seasoning material

0 引言

扇贝又称海扇蛤,属于软体动物门双壳纲珍珠目扇贝科^[1],是我国水产养殖业的重要品种。2020年,我国扇贝海水养殖面积为38.2万公顷,养殖产量为174.6万t^[2]。扇贝肉质鲜美,富含蛋白质、碳水化合物、不饱和脂肪酸等营养成分^[3-5],具有抗氧化、抗肿瘤等多种保健功效^[6-8],是一种集食用、药用为一体的健康食品。目前,扇贝的大宗加工产品主要为干贝。河北省海湾扇贝毛贝加工率在95%以上,主要加工品以鲜贝柱、干贝柱为主^[9]。在干贝加工过程中会产生大量副产物,其中最主要的副产物为外套膜,即扇贝裙边,占扇贝总重的9%^[6]。由于水产品精深加工技术滞后,扇贝裙边的加工利用率极低,除了加工成饲料、化肥等低值产品及初加工休闲食品外,大部分扇贝裙边被直接丢弃,不仅造成资源浪费,而且带来严重的环境问题。扇贝裙边中粗蛋白含量高达69%(干重)^[10],可以作为海洋动物蛋白的来源,具有很大的开发价值。蛋白质酶解后形成的多肽和氨基酸具有鲜美的滋味^[11],可用于制作调味品。多肽或氨基酸与还原糖混合加热能够发生美拉德反应^[12],产物不仅具有独特的香气和诱人的色泽,还能提高其功能性,如抗氧化活性^[13]。刘冰等^[14]利用双酶法水解条浒苔,并初步分离出具有明显鲜味的多肽成分;王思婷等^[15]以单环刺螠为原料,通过酶解法制备具有抗氧化活性的功能性调味料,制得的调味料对·OH和(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基(DPPH·)具有较好的清除能力;方旭波等^[16]利用沙丁鱼酶解液和木糖的美拉德反应制备的海鲜风味调味料具有浓郁的海鲜风味和鲜味;蒋迪等^[17]以海带酶解冻干粉和核糖为底物,通过美拉德反应制备的调味料具有明显的增香效果。综上,通过酶解联合美拉德反应制备具有抗氧化活性的调味基料,能够有效提高扇贝裙边的附加值,具有重要的经济和社会效益。

目前对于扇贝裙边的研究主要集中于酶解法制备活性肽及调味料上。ZHANG等^[18]采用复合蛋白酶水解栉孔扇贝裙边,制得的酶解液具有降压、降血脂和抗氧化活性;秦雨等^[19]以扇贝裙边取代豆粕,采用高盐稀态发酵工艺制作海鲜酱油,总氮和氨基酸态氮含量均高于GB/T 18186—

2000《酿造酱油》中一级酱油要求,且含有牛磺酸、氨基多糖等功能性成分;HAN等^[20]采用中性蛋白酶水解栉孔扇贝裙边,并将酶解液与核糖进行美拉德反应,美拉德反应产物使扇贝裙边酶解液·OH清除能力略有提高[半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC₅₀)由15.30降至14.60 mg/mL]。目前,将酶解联合美拉德反应应用到扇贝裙边制备具有抗氧化活性的扇贝裙边调味基料未见报道。本研究以扇贝裙边为原料,利用酶解联合美拉德反应制备具有抗氧化活性的调味基料,采用单因素实验和正交实验优化酶解工艺,并对扇贝裙边调味基料体外抗氧化活性进行研究,为扇贝裙边的高值化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

扇贝裙边购于山东省烟台市莱州圣峰农业有限公司。

盐酸、氢氧化钠、葡萄糖、37%~40%甲醛(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);碱性蛋白酶(200 U/mg)、风味蛋白酶(150 U/mg)(河南万邦化工科技有限公司);DPPH(纯度97%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

T6新世纪紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限公司);Orion868型pH测试仪(瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司);Sorvall ST8离心机[赛默飞世尔科技(中国)有限公司];JJ-2B组织捣碎机(上海助蓝仪器科技有限公司);HH-6恒温水浴锅(上海捷呈实验仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 扇贝裙边调味基料制备方法

参照孙世广^[10]的方法略作改动。称取50g扇贝裙边,加100mL去离子水均质1min。用1mol/L氢氧化钠调节至所需pH后放入恒温水浴锅中加热至所需温度。向匀浆中加入一定量复合蛋白酶(根据实验室前期研究基础选择碱性蛋白酶:风味蛋白酶=3:1),置于恒温水浴中酶解。酶解反应结束后调节水浴锅温度至95°C,加热15min灭酶。将酶解液冷却至室温,8000r/min离心15min。向扇贝裙边酶解上清液中添加2%葡萄糖,混合均匀,将混合溶液放入具塞锥形瓶中,盖好瓶塞,放入烘箱中110°C加热4.5h。

1.3.2 扇贝裙边酶解液水解度测定

水解度定义为水解过程中断裂肽键数与底物中肽键总数的百分比,是衡量蛋白质水解程度的重要指标。采用甲醛滴定法测定扇贝裙边水解度^[21]。取 5 mL 扇贝裙边酶解液,加 50 mL 蒸馏水混合均匀,用 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液调节 pH 至 7.0。向溶液中加入 10 mL 38% (V:V) 甲醛溶液混合均匀,在室温下放置 5 min,然后用 0.1 mol/L 氢氧化钠标准溶液滴定至 pH 8.5。记录消耗氢氧化钠标准溶液的体积。按公式(1)计算水解度:

$$\text{水解度}/\%=(V \times c \times 0.014) / N \times 100 \quad (1)$$

式中, V 为滴定消耗 0.1 mol/L 氢氧化钠标准溶液的体积, mL; c 为氢氧化钠标准溶液浓度, mol/L; 0.014 为氮毫克当量; N 为样品中含氮总量, g, 总氮含量采用 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法凯氏定氮法测定。

1.3.3 扇贝裙边酶解工艺优化

以水解度作为指标,考察复合蛋白酶添加量(1%、2%、3%、4%、5%)、酶解温度(30、40、50、60、70°C)、酶解时间(2、4、6、8、10 h)、pH (7、8、9、10、11)对扇贝裙边酶解效果的影响。在单因素试验基础上,选取蛋白酶添加量(A)、酶解温度(B)、酶解时间(C)和 pH (D) 4 个因素进行 $L_9(3^4)$ 正交实验,以水解度作为指标,对扇贝裙边酶解工艺进行优化。正交实验因素水平设定情况如表 1 所示。

表 1 扇贝裙边酶解正交实验因素与水平表
Table 1 Factors and levels table of orthogonal test for enzymolysis of scallop mantle

因素	水平		
	1	2	3
A/%	2	3	4
B/°C	40	50	60
C/h	4	6	8
D	8	9	10

1.3.4 褐变度测定

褐变度用 420 nm 处吸光度表征,采用分光光度计测定扇贝裙边调味基料在 420 nm 处的吸光度,以去离子水作为空白对照^[22],吸光度越大代表样品褐变度越大。

1.3.5 DPPH·清除能力测定

向 4 mL 0.1 mmol/L DPPH 溶液中加入 4 mL 样品液混合均匀,37°C 避光放置 1 h,测定混合溶液在 517 nm 波长处的吸光度记为 A_1 ; 4 mL 无水乙醇溶液中加入 4 mL 样品液混合均匀,37°C 避光放置 1 h,测定混合溶液在 517 nm 波长处的吸光度记为 A_2 ; 4 mL 0.1 mmol/L DPPH 溶液中加入 4 mL 无水乙醇溶液混合均匀,37°C 避光放置 1 h,测定混合溶液在 517 nm 波长处的吸光度记为 A 。按公式(2)计算 DPPH·清除率^[23]。

$$\text{DPPH} \cdot \text{清除率}/\%=1-(A_1-A_2)/A \times 100 \quad (2)$$

1.3.6 感官评价

通过问卷调查和面试的方法从食品专业学生中招募感官评价人员,并按照 GB/T 16291.1—2012《感官分析选拔、培训与管理评价员一般导则第 1 部分:优选评价员》进行感官评价人员的筛选和培训,最终选取 10 人(男性 5 人、女性 5 人)组成感官评价小组。感官评价人员分别品尝扇贝裙边调味基料样品并进行评分,参考张婷婷等^[24]研究方法制定感官评价标准,感官评价得分标准见表 2。

表 2 感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation criteria

项目	评分标准
色泽(30 分)	棕黑色(1~7 分)
	淡黄色(8~16 分)
	金黄色(17~22 分)
	浅褐色(23~30 分)
滋味(40 分)	腥味明显(1~10 分)
	略有腥味(11~20 分)
	略有鲜味(21~30 分)
组织状态(30 分)	鲜味明显(31~40 分)
	有沉淀(1~7 分)
	浑浊(8~16 分)
	较混浊(17~22 分)
	均一稳定(23~30 分)

1.4 数据处理

每组实验重复 3 次,结果以平均值±标准偏差表示,采用 Excel 2019 软件进行数据分析与制图,采用 SPSS 26 软件进行显著性分析($P < 0.05$ 表示差异显著)。

2 结果与分析

2.1 扇贝裙边酶解单因素实验结果

2.1.1 蛋白酶添加量对扇贝裙边酶解效果的影响

酶解反应速度受酶浓度的影响,酶浓度增加,酶与底物接触机会增多,酶促反应速率增大。当酶浓度过大时,在一定反应时间内,酶与底物充分反应,继续增加酶浓度底物的水解度不再增加^[25]。结果显示,随着蛋白酶添加量增加,扇贝裙边水解度不断增大。侯钰柯等^[26]采用风味蛋白酶对肉杂鸡鸡骨架进行酶解,其水解度随蛋白酶添加量变化情况与本研究结果一致。当蛋白酶添加量小于 3% 时,水解度随酶添加量变化显著,当蛋白酶添加量超过 3% 时,继续增加酶用量,水解度变化已不明显($P > 0.05$)。因此,本研究选择蛋白酶添加量 2%、3%、4% 进行优化实验。

2.1.2 酶解温度对扇贝裙边酶解效果的影响

蛋白酶的活性受到温度的影响,温度过高或过低都

会使酶的活性受到抑制^[27]。结果显示, 在本研究设定范围内, 扇贝裙边水解度随温度的升高呈先增大后减小的趋势。当酶解温度小于 50°C 时, 随温度升高, 分子热运动速率增大, 酶促反应速率增加, 水解度不断增大, 当酶解温度为 50°C 时, 扇贝裙边水解度显著高于其他酶解温度 ($P < 0.05$), 达到最大值 (38.43±4.74)%。当酶解温度超过 50°C 时, 蛋白酶的活性受到抑制, 且温度越高, 碱性蛋白酶活性损失越大, 因此造成扇贝裙边水解度降低。因此, 本研究选择酶解温度 40、50、60°C 进行优化实验。

2.1.3 初始 pH 对扇贝裙边酶解效果的影响

溶液 pH 会对底物蛋白及酶的空间结构和溶解性造成影响, 从而影响酶促反应速率^[28]。结果显示, 随着溶液初始 pH 增大, 扇贝裙边水解度先升高后降低。与许家宝等^[29]对芝麻蛋白水解研究结果一致。当 pH 为 9 时, 扇贝裙边水解度达到最大值, 在 pH 为 8 和 9 时, 水解度无显著差异 ($P > 0.05$)。因此, 本研究选择初始 pH 8、9、10 进行优化实验。

2.1.4 酶解时间对扇贝裙边酶解效果的影响

蛋白质的酶解过程是蛋白质在蛋白酶催化下水解为小分子肽和游离氨基酸, 在酶解不同时期, 由于底物浓度、结构发生变化, 造成酶解速度的改变^[30]。结果显示, 随着酶解时间延长, 扇贝裙边酶解度不断提高。水解 6 h 内, 水解度随时间变化明显 ($P < 0.05$), 当水解时间超过 6 h 后, 随着酶解时间延长, 扇贝裙边水解度上升速度趋于平缓 ($P > 0.05$), 该变化趋势与张婷婷等^[24]研究结果一致。因此, 本研究选择酶解时间 4、6、8 h 进行优化实验。

2.2 扇贝裙边酶解正交优化结果

在单因素实验的基础上, 选取蛋白酶添加量(A)、酶解温度(B)、酶解时间(C)、pH(D) 4 个因素进行正交实验, 以扇贝裙边水解度作为评价指标对酶解条件进行优化。结果见表 3。4 个因素对扇贝裙边水解度的影响程度为: 酶解时间>蛋白酶添加量>pH>酶解温度。扇贝裙边酶解条件最优组合为 $C_3A_2D_1B_2$, 即酶解时间 8 h, 蛋白酶添加量 3%, pH 8, 酶解温度 50°C, 在此条件下扇贝裙边水解度为 (40.36±1.27)%。

2.3 美拉德反应对扇贝裙边酶解液的影响

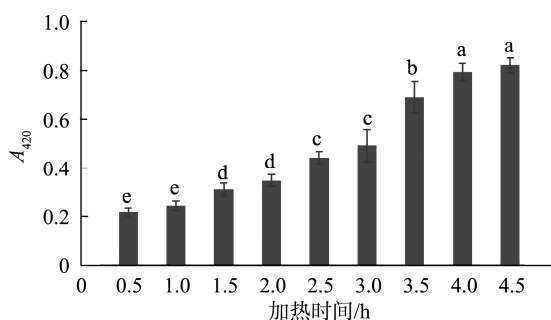
2.3.1 美拉德反应对扇贝裙边酶解液褐变度的影响

美拉德反应以羰基化合物和氨基化合物为底物, 在加热条件下发生缩合反应, 并经一系列中间反应最终生成类黑精^[31]。类黑精的积累使反应体系发生褐变, 颜色加深^[32]。由图 1 可知, 扇贝裙边酶解产物与葡萄糖混合加热时, 随着加热时间的延长, 混合物颜色逐渐加深, 说明扇贝裙边酶解液中的氨基酸、多肽等和葡萄糖发生了美拉德反应。当加热时间超过 4.0 h 后, 底物浓度降低造成反应速率减小, 继续延长加热时间, 混合物褐变度增加趋势减缓。值得注意的是, 加热时间超过 3.0 h 时, 样品溶液褐变严重, 呈现黑褐色, 影响产品感官品质, 故加热时间应控制在 3.0 h 以内。

表 3 扇贝裙边酶解正交实验结果

Table 3 Orthogonal test results for enzymolysis of scallop mantle

实验号	因素				水解度/%
	A/%	B/°C	C/h	D	
1	1	1	1	1	35.96±0.54
2	1	2	2	2	37.26±1.21
3	1	3	3	3	38.96±1.08
4	2	1	2	3	38.46±0.94
5	2	2	3	1	40.36±1.27
6	2	3	1	2	36.18±1.16
7	3	1	3	2	39.46±0.75
8	3	2	1	3	36.76±0.38
9	3	3	2	1	38.45±1.06
k_1	37.393	37.960	36.300	38.257	
k_2	38.333	38.127	38.057	37.633	
k_3	38.223	37.863	39.593	38.060	
R	0.940	0.264	3.293	0.624	



注: 不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$, 下同。

图 1 美拉德反应对扇贝裙边酶解液褐变度的影响 ($n=3$)

Fig.1 Effects of Maillard reaction on browning degree of scallop mantle enzymolysis liquid ($n=3$)

2.3.2 美拉德反应对扇贝裙边酶解液 DPPH·清除能力的影响

由图 2 可知, 随着加热时间的延长, 反应体系 DPPH·清除率显著升高, 说明美拉德反应生成了具有 DPPH·清除能力的产物。加热时间延长至 4.0 h 时, 产物 DPPH·清除率达到最大值 (74.61±1.24)%。继续延长加热时间, 产物的 DPPH·清除率开始下降。美拉德反应是由一系列连续反应组成的复杂反应, 其反应过程分为初始阶段、中间阶段和最终阶段, 在反应中间阶段可产生 5-羟甲基糠醛 (5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF) 等具有抗氧化活性的中间产物, 这些中间产物随后在最终阶段发生聚合或缩合反应生成类黑精^[33]。中间产物形成类黑精聚合物时, 分子量增加, 产物溶解性降低可能造成其水溶液抗氧化活性减弱。由图 2 可知, 加热时间超过 4.0 h 后, 产物 DPPH·清除能力下降可能是由于 5-HMF 等活性中间产物因参与最终阶段类黑精生成而消耗。

综合考虑产物 DPPH·清除能力和样品褐变度, 扇贝

裙边酶解液与葡萄糖混合加热 3.0 h 得到的扇贝裙边调味基料具有较高抗氧化活性且未发生严重褐变造成色泽品质劣变, 经 3.0 h 加热处理后, 制得的扇贝裙边调味料对 DPPH· 的清除能力由 $(15.46 \pm 3.57)\%$ 提高到 $(42.37 \pm 2.88)\%$, 提高 1.7 倍。

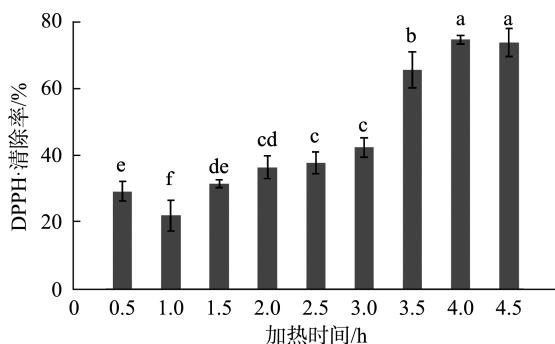


图 2 美拉德反应对扇贝裙边酶解液 DPPH·清除能力的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of Maillard reaction on DPPH· scavenging capacity of scallop mantle enzymolysis liquid ($n=3$)

2.3.3 美拉德反应对扇贝裙边酶解液感官品质的影响

美拉德反应是食品热加工过程中重要的化学反应, 在反应过程中生成大量挥发性成分及色素物质, 从而对食品的色泽和风味造成显著的影响, 赋予产品特殊的色泽和风味, 如焙烤食品金黄色泽、烤肉的香气等^[34]。美拉德反应广泛应用于食品行业, 在调味品生产中尤其重要^[35-36]。美拉德反应对扇贝裙边酶解液感官评分的影响如图 3 所示, 随反应时间的延长, 样品感官评分呈先升高后降低的趋势。加热 3.0 h 时, 样品溶液色泽呈浅褐色、鲜味明显、组织状态均已稳定。随着加热时间继续延长, 由于美拉德反应终产物类黑精的不断积累, 造成样品溶液颜色加深, 呈现棕黑色, 且鲜味减弱, 出现焦糊味, 影响了产品的可接受度。

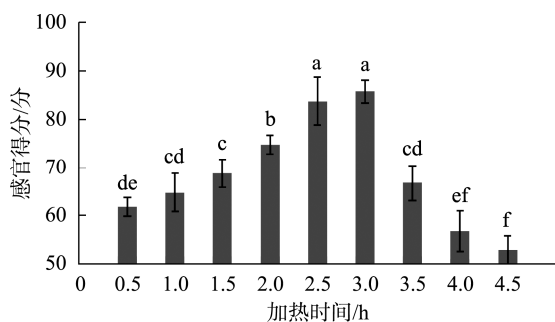


图 3 美拉德反应对扇贝裙边酶解液感官得分的影响($n=10$)

Fig.3 Effects of Maillard reaction on sensory score of scallop mantle enzymolysis liquid ($n=10$)

3 结 论

本研究通过单因素实验和正交实验优化酶解工艺,

得到扇贝裙边调味基料最佳酶解参数为蛋白酶添加量 3%, 酶解温度 50°C、酶解时间 8 h、pH 8。酶解液与葡萄糖混合加热后发生美拉德反应, 抗氧化活性显著提高, 110°C 加热反应 3.0 h 后, 制得的产品具有较高的感官评价得分, 色泽诱人, 鲜味充沛, 其对 DPPH· 的清除能力增加了 1.7 倍。本研究以扇贝裙边为原料开发功能性调味基料, 为扇贝裙边高值化利用提供了参考。但同时也发现, 美拉德反应虽会使产品抗氧化活性显著增强, 但反应时间过长, 产品颜色加深呈棕黑色, 且具有焦糊味, 严重影响产品的感官品质。如何通过控制美拉德反应条件使样品抗氧化活性增强, 同时抑制产品褐变程度, 还需进一步探索。此外, 本研究仅以 DPPH· 清除能力为指标评价样品体外抗氧化活性, 后续仍需开展动物水平实验验证扇贝裙边调味基料的体内抗氧化活性。

参考文献

- 李成林, 宋爱环, 胡炜, 等. 山东省扇贝养殖产业现状分析与对策[J]. 海洋科学, 2011, 35(3): 92-98.
- LI CL, SONG AIH, HU W, *et al.* Status analyzing and developing counter-measure of cultured scallop industry in Shandong Province [J]. Mar Sci, 2011, 35(3): 92-98.
- 农业农村部渔业渔政管理局. 2021 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs Fisheries Administration. 2021 China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- 张晴, 田元勇, 姜明慧, 等. 虾夷扇贝肌原纤维蛋白热稳定性的季节性差异[J]. 水产学报, 2020, 44(11): 1883-1892.
- ZHANG Q, TIAN YY, JIANG MH, *et al.* Seasonal variation of myofibrillar protein thermal stability of scallop (*Patinopecten yessoensis*) [J]. J Fish China, 2020, 44(11): 1883-1892.
- 冯丁丁, 李楠, 高雨, 等. 虾夷扇贝裙边多糖提取物细胞抗氧化活性的研究[J]. 食品科技, 2017, 4: 188-193.
- FENG DD, LI N, GAO Y, *et al.* Cellular antioxidant activity of polysaccharide from the skirt of *Patinopecten yessoensis* [J]. Food Sci Technol, 2017, 4: 188-193.
- 李丽, 曹亚男, 姜雯, 等. 栉孔扇贝中蛋白质的提取条件优化[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2021, 37(2): 157-161.
- LI L, CAO YN, JIANG W, *et al.* Optimized extraction conditions of protein from scallop *Chlamys farreri* [J]. J Ludong Univ (Nat Sci Ed), 2021, 37(2): 157-161.
- 马丽艳, 胡昂, 刘志东, 等. 扇贝抗氧化肽对衰老小鼠体内抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(19): 5159-5163.
- MA LY, HU ANG, LIU ZD, *et al.* Antioxidant function of peptides from scallop by-product in aged mice *in vivo* [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(19): 5159-5163.
- 魏婉露, 牟雅甜, 李智博, 等. 虾夷扇贝柱粗多糖不同提取工艺优化及

- 其化学性质与抗氧化活性的比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1224–1231.
- WEI WL, MU YT, LI ZB, *et al.* Optimization of different extraction processes of crude polysaccharide from *Patinopecten yessoensis* adductor and comparison of its chemical properties and antioxidant activity [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(4): 1224–1231.
- [8] 高缘, 范文斌, 王远红, 等. 栉孔扇贝不同部位多糖的提取分离及抗肿瘤活性研究[J]. 中国海洋药物, 2020, 39(6): 31–38.
- GAO Y, FAN WB, WANG YH, *et al.* Extraction and isolation of polysaccharides from different parts of *Chlamys farreri* and its antitumor activity [J]. *Chin J Mar Drug*, 2020, 39(6): 31–38.
- [9] 张黎, 张丽敏, 史艳红, 等. 2016 年河北省扇贝产业形势分析[J]. 河北渔业, 2017, (6): 23–25, 45.
- ZHANG L, ZHANG LM, SHI YH, *et al.* Analysis of scallop industry situation in Hebei Province in 2016 [J]. *Hebei Fish*, 2017, (6): 23–25, 45.
- [10] 孙世广. 栉孔扇贝裙边酶解物美拉德反应产物特性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2016.
- SUN SG. Characterization of Maillard reaction products of hydrolysates from scallop *Chlamys farreri* skirt [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016.
- [11] 张维, 胡馨月, 赵行, 等. 响应面法优化紫贻贝鲜味肽酶法制备工艺[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 206–214.
- ZHANG W, HU XY, ZHAO X, *et al.* Response surface methodology for optimization of enzymatic preparation of umami peptides from *Mytilus edulis* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(8): 206–214.
- [12] 章银良, 黄天琪, 张陆燕, 等. 基于电子顺磁共振波谱法的美拉德反应产物抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(5): 55–59.
- ZHANG YL, HUANG TQ, ZHANG LY, *et al.* Study on antioxidant activity of Maillard reaction products by electron spin resonance spectroscopy [J]. *China Cond*, 2022, 47(5): 55–59.
- [13] 吴靖娜, 靳艳芬, 陈晓婷, 等. 鲍鱼蒸煮液美拉德反应制备海鲜调味基料工艺优化[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 69–76.
- WU JN, JIN YF, CHEN XT, *et al.* Optimization of preparation of seafood flavor condiment base from cooked abalone juice by Maillard reaction [J]. *Food Sci*, 2016, 37(22): 69–76.
- [14] 刘冰, 周振, 李若敏, 等. 双酶法制备条浒苔鲜味肽工艺研究[J]. 中国调味品, 2021, 4: 102–110, 113.
- LIU B, ZHOU Z, LI RM, *et al.* Research on the process of *Enteromorpha clathrate* umami peptides prepared by double-enzyme method [J]. *China Cond*, 2021, 4: 102–110, 113.
- [15] 王思婷, 薛蕊, 宋晨, 等. 单环刺螠功能性调味料的研制[J]. 农产品加工, 2019, (23): 5–8.
- WANG ST, XUE R, SONG C, *et al.* Development of functional *Urechis unicinctus* seasoning [J]. *Farm Prod Process*, 2019, (23): 5–8.
- [16] 方旭波, 宋诗军, 沈钊, 等. 海鲜风味调味料的制备及其氨基酸组成分析[J]. 食品科技, 2021, 46(11): 269–273.
- FANG XB, SONG SJ, SHEN D, *et al.* Preparation and amino acid analysis of seafood flavor seasoning [J]. *Food Sci Technol*, 2021, 46(11): 269–273.
- [17] 蒋迪, 张晓羽, 奚倩, 等. 海带酶解物美拉德反应制备调味料[J]. 食品工业, 2019, 40(12): 60–64.
- JIANG D, ZHANG XY, XI Q, *et al.* Preparation of seasoning based on Maillard reaction of kelp enzymatic hydrolysis products [J]. *Food Ind*, 2019, 40(12): 60–64.
- [18] ZHANG L, LIU YZ, LU D, *et al.* Angiotensin converting enzyme inhibitory, antioxidant activities, and antihyperlipidaemic activities of protein hydrolysates from scallop mantle (*Chlamys farreri*) [J]. *Int J Food Prop*, 2015, 18: 33–42.
- [19] 秦雨, 张彩凤, 辛梦茹, 等. 高盐稀态发酵法制作扇贝裙边海鲜酱油的工艺研究[J]. 中国酿造, 2021, 40(4): 122–126.
- QIN Y, ZHANG CF, XIN MR, *et al.* Preparation technology of seafood scallop skirt soy sauce by high-salt dilute fermentation [J]. *China Brew*, 2021, 40(4): 122–126.
- [20] HAN JR, YAN JN, SUN SG, *et al.* Characteristic antioxidant activity and comprehensive flavor compound profile of scallop (*Chlamys farreri*) mantle hydrolysates-ribose Maillard reaction products [J]. *Food Chem*, 2018, 261: 337–347.
- [21] 董彩虹, 温青玉, 李天齐, 等. 复合酶法制备小麦面筋蛋白咸味酶解液的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 222–230.
- DONG CH, WEN QY, LI TQ, *et al.* Optimization of the technology for preparing salty wheat gluten protein hydrolysate by compound enzyme method [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(3): 222–230.
- [22] 魏玉娇, 郭晓强, 周婷. 酪蛋白-羧甲基壳聚糖美拉德产物的制备及表征[J]. 中国调味品, 2021, 46(2): 19–22.
- WEI YJ, GUO XQ, ZHOU T. Preparation and characterization of casein-carboxymethyl chitosan Maillard products [J]. *China Cond*, 2021, 46(2): 19–22.
- [23] 刘鹏莉, 王晶, 于金换, 等. 美拉德反应对无花果营养成分及抗氧化活性影响[J]. 食品工业, 2021, 42(12): 112–115.
- LIU PL, WANG J, YU JH, *et al.* Effect of Maillard reaction on nutrient composition and antioxidant activity of *Ficus carica* [J]. *Food Ind*, 2021, 42(12): 112–115.
- [24] 张婷婷, 詹妙新, 张宾乐, 等. 牡蛎干酶法制备海鲜调味基料的研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(9): 105–111.
- ZHANG TT, ZHAN MX, ZHANG BL, *et al.* Study on the preparation of seafood seasoning by enzymatic method of dried oyster [J]. *China Cond*, 2021, 46(9): 105–111.
- [25] 周宇, 徐春梅, 刘苏琴, 等. 松茸水解蛋白肽制备及其抗氧化活性的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2947–2955.
- ZHOU Y, XU CM, LIU SQ, *et al.* Study on preparation and antioxidant activity of *Tricholoma matsutake* hydrolytic protein peptide [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(9): 2947–2955.
- [26] 侯钰柯, 陆逸峰, 蒋宇飞, 等. 肉杂鸡鸡骨架酶解工艺优化及其分析评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 232–242.
- HOU YK, LU YF, JIANG YF, *et al.* Optimization and evaluation of enzymatic hydrolysis process of hybrid broilers skeleton [J]. *Sci Technol*

- Food Ind, 2022, 43(9): 232–242.
- [27] 姜森, 李欣怡, 宋志远, 等. 酶法联合 Plastein 反应制备海参肠调味料[J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 107–114.
JIANG M, LI XY, SONG ZY, *et al.* Preparation of sea cucumber intestinal seasoning by enzymatic hydrolysis coupled with Plastein reaction [J]. China Cond, 2020, 45(4): 107–114.
- [28] 丁琳, 余运波, 闫景坤. 复合蛋白酶水解河蚬肉的工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(23): 9226–9232.
DING L, YU YB, YAN JK. Study on hydrolysis technology of *Corbicula fluminea* with complex proteases [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(23): 9226–9232.
- [29] 许家宝, 贾晓彤, 陆世海, 等. 芝麻多肽螯合钙的制备及其补钙效果研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(5): 106–114.
XU JB, JIA XT, LU SH, *et al.* Preparation and calcium supplement effect of sesame peptide chelated calcium [J]. Food Res Dev, 2022, 43(5): 106–114.
- [30] 许劲, 孙丽滢, 郭吉泰. 扇贝裙边酶解过程中呈味组分的变化规律研究[J]. 现代食品科技, 2019, 7: 121–126.
XU J, SUN LY, GUO JT. Study on the changes in taste-active components during enzymatic hydrolysis of scallop brim [J]. Mod Food Sci Technol, 2019, 7: 121–126.
- [31] LIU PL, LU XM, LI NY, *et al.* Characterization, variables, and antioxidant activity of the Maillard reaction in a fructose-histidine model system [J]. Molecules, 2018, 24(1): 56.
- [32] 李芳香, 杨婷婷, 张稳, 等. 酱香型白酒丢糟中类黑精的检测及提取工艺研究[J]. 中国酿造, 2022, 41(2): 92–97.
LI FX, YANG TT, ZHANG W, *et al.* Determination and extraction technology of melanoidin in sauce-flavor *Baijiu* distiller's grains [J]. China Brew, 2022, 41(2): 92–97.
- [33] 刘鹏莉. 基于果糖-组氨酸模拟体系的黑蒜褐变机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
LIU PL. Study of the browning mechanism of black garlic based on fructose-histidine model system [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.
- [34] 徐睿, 胡冰, 麻荣荣, 等. 焙烤糯米粉的关键风味物质分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 203–208.
XU R, HU B, MA RR, *et al.* Key flavor substances of baked glutinous rice powder [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(14): 203–208.
- [35] 布威佐合热·艾科热木, 王德萍, 敬思群, 等. 羊肉风味料微胶囊制备工艺优化[J]. 中国调味品, 2022, 3: 121–125.
BUWEIZUOHERE AKRM, WANG DP, JING SQ, *et al.* Optimization of preparation technology of mutton flavoring microcapsules [J]. China Cond, 2022, 3: 121–125.
- [36] 高娟, 杜佳馨, 吴限, 等. 羊肚菌酶解液制备美拉德反应肉味调味基料[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 242–250.
GAO J, DU JX, WU X, *et al.* Preparation of meaty flavoring base from enzymatic hydrolysate of morel mushroom by Maillard reaction [J]. Food Sci, 2020, 41(24): 242–250.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



刘鹏莉, 博士, 讲师, 主要研究方向为功能性食品。

E-mail: liupengli2020@163.com