董雨飞, 黄翊珺, 王鹏, 等. 花椒籽蛋白美拉德肽的制备、表征及增鲜特性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 115−124. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030114

DONG Yufei, HUANG Yijun, WANG Peng, et al. Preparation, Characterization, and Umami Enhancement Properties of Maillard Peptides from *Zanthoxylum* Seed Protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 115−124. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030114

· 研究与探讨 ·

花椒籽蛋白美拉德肽的制备、表征及增鲜特性

董雨飞[1], 黄翊珺[1], 王　鹏[1], 张润光[1], 耿敬章[2], 田洪磊[1], 何婉莺[1,*], 詹　萍[1,*]

（1.陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 陕西西安 710119;
2.陕西理工大学生物科学与工程学院, 陕西汉中 723001）

摘　要: 为提升花椒籽高值化利用并开发新型花椒基专属调味料，本研究以花椒籽蛋白为原料，利用碱性蛋白酶和风味蛋白酶分步酶解并经美拉德反应制备增鲜肽。以褐变程度和感官评价为指标，通过单因素实验、响应面试验优化美拉德肽制备工艺，结合电子舌、分子量分布、氨基酸含量及肽段序列等特征性指标和评价手段，明确美拉德反应对花椒籽蛋白酶解肽风味特性的影响。结果表明，花椒籽蛋白美拉德肽制备最佳条件为蛋白-糖比例 3∶2（g/g）、反应温度 106 ℃、反应时间 52 min，该条件下产物电子舌响应值为 10.06，感官评分为 8.38，增鲜效果显著（P<0.01），可将谷氨酸钠含量有效降低 44%。酶解肽经美拉德反应后分子量为 500~1000 Da 的肽段占比由 6.14% 增至 14.88%，鲜味氨基酸含量提高了 8.95%，而苦味氨基酸含量减少了 5.32%，以上结果表明美拉德反应能有效增强花椒籽蛋白肽的鲜味特性并丰富其风味层次。本研究为开发可替代钠盐的新型调味品提供了重要理论支持。

关键词: 花椒籽蛋白, 酶解, 美拉德反应, 增鲜肽, 高效液相色谱-串联质谱法

中图分类号: TS209　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0115−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030114

本文网刊:

Preparation, Characterization, and Umami Enhancement Properties of Maillard Peptides from *Zanthoxylum* Seed Protein

DONG Yufei[1], HUANG Yijun[1], WANG Peng[1], ZHANG Runguang[1], GENG Jingzhang[2], TIAN Honglei[1], HE Wanying[1,*], ZHAN Ping[1,*]

（1.College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;
2.School of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China）

Abstract: To enhance the high-value utilization of *Zanthoxylum* seeds and develop novel *Zanthoxylum*-based specialized seasonings, this study utilized *Zanthoxylum* seed protein as the raw material, subjecting it to sequential enzymatic hydrolysis with alkaline protease and flavor protease, followed by the Maillard reaction to synthesize umami peptides. The Maillard peptide preparation process was optimized by single-factor experiments and response surface methodology with browning degree and sensory evaluation as indicators. The effects of Maillard reaction on the flavor characteristics of *Zanthoxylum* seed protein hydrolysates were investigated using an electronic tongue in combination with the analysis of molecular weight distribution, amino acid content, peptide sequence, and other characteristic indicators. The results indicated that the optimal conditions for preparing *Zanthoxylum* seed protein Maillard peptides were as follows: Protein-to-sugar ratio of 3∶2 (g/g), reaction temperature of 106 ℃, and reaction time of 52 min. Under these conditions, the product exhibited an electronic tongue response value of 10.06 and a sensory evaluation score of 8.38. The umami-enhancing effect

收稿日期: 2025−03−10

基金项目: 中国博士后面上项目（2023M742189）; 陕西省重点研发一般项目（2024NC-YBXM-069）; 大学生创新创业大赛项目（202410718022）。

作者简介: 董雨飞（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 植物蛋白肽风味化学, E-mail: zyufeiy@163.com。

*** 通信作者:** 何婉莺（1994−）（ORCID: 0000−0002−7629−6480）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: hewanyinghzau@163.com。
詹萍（1981−）（ORCID: 0000−0003−3649−1860）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: zhanping0993@126.com。

was statistically significant (P<0.01), achieving an effective 44% reduction in monosodium glutamate content. Following the Maillard reaction, the proportion of peptides within the 500~1000 Da molecular weight range increased from 6.14% to 14.88%, while the content of umami amino acids increased by 8.95% and the content of bitter amino acids decreased by 5.32%. These results suggest that the Maillard reaction effectively enhances the umami taste of *Zanthoxylum* seed protein peptides and enriches their flavor complexity. This study provides important theoretical support for the development of novel seasonings that can replace sodium salts.

Key words: *Zanthoxylum* seed protein; enzymatic hydrolysis; Maillard reaction; umami peptides; high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)是芸香科(Rutaceae)花椒属(*Zanthoxylum*)植物,因其独特的椒香风味和浓郁的麻味,成为烹饪中不可或缺的香辛料,尤其在中国及东南亚国家广受欢迎[1]。作为花椒主产国,中国花椒年产量超 30 万吨[2]。花椒籽约占花椒产量的 60%,其压榨后的副产品花椒籽粕富含蛋白质、脂肪及矿物质,蛋白质含量高达 20%,精氨酸占比超 10%,是优质的呈味肽制备资源[3−4]。然而,当前花椒籽粕主要被用作低附加值饲料,导致蛋白资源浪费和利用率低下的问题亟待解决。

当前研究主要集中于花椒籽蛋白功能活性肽的制备领域,市场上产品大多局限于抗氧化肽、降压肽及抗菌肽等传统类别,导致产品线缺乏多样性,同质化现象显著[5]。鲜味肽作为一种创新天然鲜味增强剂,是一类补充或提升食品本味的新型呈味肽类物质[6]。鉴于此,以“味料同源、咸鲜融组”的现代调味基料加工理念为导向,利用酶解技术将花椒籽蛋白转化为兼具鲜味与活性的功能性肽类已成为研究新趋势,既可满足我国高品质多功能调味基料产品的消费需求,亦可为花椒传统预制食品专属调味基料领域提供新的选择。

美拉德肽是蛋白质/多肽经美拉德反应生成的一类具有怡人风味的肽类衍生物,可赋予食品不同的风味特征以提升其风味品质。目前已发现多种由植物基水解蛋白制得的风味肽具有显著的增味潜力。据报道,大豆、豌豆和葵花籽美拉德肽不仅具有咸味、鲜味增强的作用,同时赋予产品不同的呈香特性,其中木糖在美拉德反应过程中可产生肉味并提高鲜味[7−10]。Wei 等[11] 发现由葵花蛋白水解物和木糖产生的美拉德肽不仅呈现较好的醇厚味、鲜味和肉香。Ogasawara 等[12] 发现分子量为 1~5 kDa 的大豆蛋白肽与木糖发生美拉德反应后呈现显著的增鲜效果。Yan 等[13] 发现低分子量豌豆蛋白深度酶解物与木糖等还原糖反应得到的美拉德产物均具有鲜味增强的作用。

本研究以花椒籽蛋白为原料,利用酶解后与木糖发生美拉德反应制备增鲜肽,采用响应面试验优化花椒籽蛋白美拉德肽最佳制备工艺。通过分析产物的褐变程度、电子舌、分子量分布、氨基酸含量和序列鉴定,明确美拉德反应对花椒籽蛋白酶解肽分子结构及其呈味特性的具体调控策略,为花椒籽蛋白美拉德肽在调味品领域的创新应用提供新思路,为进一步挖掘其增鲜效应的分子机制及风味前体追溯奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

花椒籽蛋白(蛋白含量≥95%) 陕西为康生物科技股份有限公司;碱性蛋白酶(200000 U/g)、风味蛋白酶(10000 U/g)、胰酶(4000 U/g)、中性蛋白酶(200000 U/g)、D-木糖、谷氨酸钠 南宁庞博生物工程有限公司;食用纯碱 菱花集团有限公司;无水柠檬酸 河南万邦实业有限公司;其他分析所用试剂均为国产分析纯。

RIGOL L-3000 高效液相色谱系统 北京普源精电科技有限公司;SA402B 型电子舌 日本 Insent 公司;GPC50 型凝胶渗透色谱仪 美国 Agilent 公司;WH260-H 型磁力搅拌器 德国 WIGGENS GmbH 公司;DF-101S 型集热式恒温加热磁力搅拌器 巩义市予华仪器有限责任公司;DGJ-9C 型真空冷冻干燥机 上海博登生物科技有限公司;普析 T9CS 型紫外分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;BSA224S-CW 型电子天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;ST3100 型 pH 计 奥豪斯仪器(常州)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 花椒籽蛋白酶解液的制备 称取 4.5 g 花椒籽蛋白溶于 75 mL 的碱性水,混匀得到蛋白溶液,放至磁力搅拌器上室温搅拌 1 h。将溶液加热至蛋白酶的最适温度,用 10%(w/w)纯碱溶液调节 pH 至最适 pH,分别加入一定量碱性蛋白酶、风味蛋白酶、胰酶和中性蛋白酶酶解 4 h,具体条件如表 1 所示。复合酶酶解液制备方法为:先添加 18000 U/g 碱性蛋白酶反应 2 h 后,将溶液 pH 调至 7.10,再加入 4500 U/g

表 1 不同蛋白酶的最适酶解条件及添加量

Table 1 Optimal enzymatic conditions and addition levels for different proteases

蛋白酶	pH	温度(℃)	添加量(U/g)
碱性蛋白酶	8.70	55	18000
风味蛋白酶	7.10	50	4500
胰酶	7.40	50	1800
中性蛋白酶	7.30	45	18000

风味蛋白酶酶解 2 h，在 90 ℃ 下加热灭酶 10 min 得到花椒籽蛋白酶解液，冻干后粉末储存在-20 ℃ 下备用。

1.2.2　花椒籽蛋白酶解液水解度(DH)的测定　水解度(DH)的测定采用 pH-stat 法。在酶解过程中每间隔 30 min 测定 pH，并用 1 mL 注射器加入 0.1 mol/L NaOH 溶液直至 pH 达到初始 pH，记录加入碱液的体积。加碱的量可直接表征蛋白质水解程度，计算公式如下：

$$DH(\%) = \frac{BC}{M\alpha h_{tot}} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中，B 为水解过程中消耗的碱液的体积(mL)；C 为 NaOH 溶液的摩尔浓度(mol/L)；M 是底物中蛋白质的质量(g)；α 为氨基的解离度，根据计算所得为 0.99；h_{tot} 为单位质量蛋白质中的肽键总数(mmol/g)，花椒籽蛋白的 h_{tot} 为 6.44 mmol/g[14]。

1.2.3　花椒籽蛋白美拉德肽的制备　花椒籽蛋白美拉德肽的制备基于前人的方法并改进[15]。称取 2.5 g 花椒籽蛋白酶解肽和 D-木糖于 100 mL 耐压瓶中，加入 50 mL 水使其溶解。调节 pH 至 7.5，将盖旋紧，置于磁力搅拌器的油浴中加热一定时间，反应结束后常温冷却 10 min，再冰水冷却 10 min，8000 r/min 离心 10 min 后取上清液，即为花椒籽蛋白酶解液美拉德反应产物，冻干后粉末储存在−20 ℃ 下用于分析及感官评定。

1.2.4　花椒籽蛋白美拉德肽制备工艺单因素实验　选取蛋白-糖比例、反应温度和反应时间，进行美拉德肽制备工艺单因素实验，分别研究 3 个因素对美拉德反应产物的褐变程度(A_{420}、A_{294})和感官评分的影响。每个单因素设置七个水平，其中固定因素水平为蛋白-糖比例3∶2、反应温度 110 ℃ 和反应时间 60 min。蛋白-糖比例设定为：5∶2、2∶1、3∶2、1∶1、2∶3、1∶2、2∶5；反应时间设定为：40、60、80、100、120、140、160 min；反应温度设定为：90、100、110、120、130、140、150 ℃。依据单因素实验结果确定响应面设计的因素水平。

1.2.5　花椒籽蛋白美拉德肽制备工艺响应面优化设计　在单因素实验基础上，采用 Box-Behnken 响应面设计，以美拉德反应产物的感官评分为响应值，选择蛋白-糖比例、反应温度和反应时间 3 个因素进行优化，其因素水平及编码见表 2。

表 2　响应面试验设计因素水平编码表

Table 2　Factor level coding table for response surface experimental design

因素	水平		
	−1	0	1
蛋白-糖比例	6∶5	3∶2	9∶5
反应温度(℃)	100	110	120
反应时间(min)	50	60	70

1.2.6　褐变程度测定　以蒸馏水为参比，使用双光束紫外分光光度计测定样品在 294 nm 和 420 nm 处的吸光度。

1.2.7　感官分析

1.2.7.1　感官强度　感官方法参照 Li 等[16] 的方法改进。由 10 名具有丰富感官评价经验人员(20~30 岁)组成感官评定小组，实验开始前需进行相关感官培训。采用 9 分制对样品溶液的味道特征的强度进行评定，包括焦糊味、酸味、甜味、苦味、咸味和鲜味(主要为增鲜)。0 分表示无味道，9 分表示味道最强。对照溶液为 1.0%(w/v)谷氨酸钠和 0.5%(w/v)氯化钠(NaCl)组成的混合溶液，鲜味和咸味的分值为 5。

1.2.7.2　鲜味增强度　为确定鲜味增强效果，采用 9 分法对 6 种不同浓度(0、1、3、5、7、9 mg/mL)的谷氨酸钠溶液进行评价，并建立鲜味强度标准曲线，得到公式为 y=0.835x+0.3659，R^2=0.9932。将不同浓度的美拉德肽加至 5 mg/mL 谷氨酸钠参比溶液中，评价其增鲜效果并根据如下线性方程计算出鲜味增强率。

$$鲜味增强率(\%) = \frac{x_2 - x_1}{x_1} \times 100 \qquad 式（2）$$

式中，x_1 是 5 mg/mL 谷氨酸钠溶液的鲜味强度；x_2 是样品的鲜味强度。

1.2.8　电子舌测定　本次分析采用分析系统为苦味分析系统 C00、AE1、CA0、CT0、AAE 共 5 个传感器及 2 个标准电极见表 3。传感器经活化、校正后测样。样品溶于 5 mg/mL 的谷氨酸钠溶液，4000 r/min 离心 3 min，经滤纸过滤后取 70 mL 上机检测。谷氨酸钠溶液(5 mg/mL)为对照样品。

表 3　传感器与味觉值的匹配信息

Table 3　Matching information between sensors and taste values

传感器	对应的味觉	味觉信息	
		先味	回味
C00	酸性苦味	苦味	酸性苦味回味
AE1	涩味	涩味	涩味回味
CA0	酸味	酸味	×
CT0	咸味	咸味	×
AAE	鲜味	鲜味	丰富度

1.2.9　多肽分子量分布测定　采用凝胶渗透色谱法测定样品的分子量范围。样品通过 0.45 μm 的薄膜过滤后注入 Waters 2695 高效液相色谱系统(Waters, Milford, MA, U.S.A.)中的 TSK-GEL G2000 SWXL 柱(7.8×300 mm)。流动相为 40%(V/V)乙腈加 0.1%(V/V)三氟乙酸，流速为 0.5 mL/min，检测 220 nm 处吸光度。

1.2.10　氨基酸含量测定　参照 Liyanaarachchi 等[17] 的方法并改进。取适量样本于 2 mL 离心管中，准确

加入 600 μL 10% 甲酸甲醇溶液-水(1∶1, V/V)。涡旋振荡 30 s 后,在组织研磨器中 55 Hz 研磨 90 s。12000 r/min、4 ℃ 离心 5 min。取上清液 100 μL,加入 20 ng/mL 的 Trp-d3 内标 100 μL,涡旋振荡 30 s,过 0.22 μm 滤膜后加至检测瓶中。采用 ACQUITY UPLC ® BEH C_{18} 色谱柱(2.1×100 mm, 1.7 μm),进样量 5 μL,柱温 40 ℃,流动相 A: 50% 甲醇水(含 0.1% 甲酸),B: 10% 甲醇水(含 0.1% 甲酸)。

1.2.11 多肽序列测定分析 参照陈荣荣等[18]的方法并稍作修改。色谱条件:流动相 A 液为 0.1% 甲酸溶液,B 液为 0.125% 甲酸-乙腈溶液。使用 10 μL A 液溶解冻干粉末,4 ℃ 下 14000×g 离心 20 min,取上清 1 μg 进样,液质检测。梯度洗脱:0~7 min, 92%~88% A, 8%~12% B; 7~55 min, 88%~70% A, 12%~30% B; 55~65 min, 70%~60% A, 30%~40% B; 65~66 min, 60%~5% A, 40%~95% B; 66~80 min, 5% A, 95% B。质谱条件:使用 Orbitrap Exploris™ 480 质谱仪,采用数据依赖型采集模式,质谱全扫描范围为 m/z 350~1500,一级质谱分辨率设为 120000,离子最大注入时间为 50 ms;二级质谱检测采用“Top Speed”模式,分辨率设为 15000,离子最大注入时间为 22 ms,肽段碎裂碰撞能量设为 33%,生成质谱检测原始数据。

1.3 数据处理

每组实验至少重复 3 次。测量的数据结果表示为平均值±标准差,并均使用 IBM SPSS Statistics 20 确定显著性差异。进行单因素方差分析(ANOVA),平均值之间的差异采用 Duncan 的多范围检验来确定。在 $P<0.05$ 水平上有显著性差异则具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 不同蛋白酶对花椒籽蛋白酶解液水解度的影响

水解度是蛋白质分解的关键指标,表明裂解的肽键相对于蛋白质底物中键总数的程度[19]。如图 1 所示,水解 4 h 后,单酶水解中碱性蛋白酶酶解效果最好,水解度达到 11.69%,胰酶次之,中性蛋白酶的酶解效果最差,仅有 1.97%。这可能由于碱性蛋白酶是具有广泛作用位点的内切酶,能够水解肽键、酯键、酰胺键,从而切割羧基侧链的疏水性氨基酸和芳香族氨基酸[20]。然而,其水解过程中会生成含疏水性氨基酸的多肽末端,导致苦味等不良风味[21]。风味蛋白酶含有多种外切酶,可在肽链末端破坏肽键,将苦味肽降解为氨基酸,并使精氨酸和赖氨酸等暴露,从而实现苦味降低、鲜味增强[22−23]。图 1 中所示复合酶为碱性蛋白酶和风味蛋白酶依次分步酶解 2 h,水解度可达到 13.45%,显著高于中性蛋白酶等单酶酶解($P<0.05$)。因此,选择复合酶酶解花椒籽蛋白制备酶解肽。

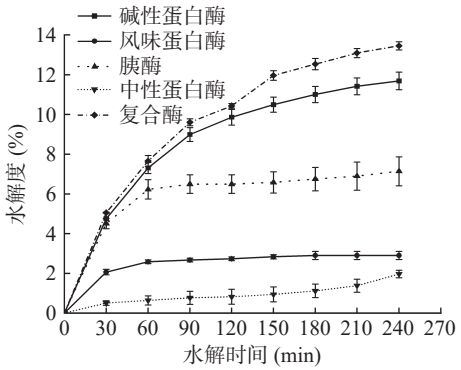


图 1 不同蛋白酶对花椒籽蛋白酶解液水解度的影响

Fig.1 Effects of different proteases on the hydrolysis degree of enzymatic hydrolysate of *Zanthoxylum* seed protein

2.2 花椒籽蛋白酶解肽美拉德反应工艺条件的优化

2.2.1 单因素实验 紫外可见光谱反映美拉德反应的进程,其中 A_{420} 值表明美拉德反应产物(Maillard reaction products, MRP)的褐变程度,而 A_{294} 值则表明美拉德反应中间产物的形成[24]。如图 $2A_1$ 所示,A_{294} 和 A_{420} 随糖添加比例增大而逐渐增加,表明美拉德反应效率增加且伴随焦糖化反应使类黑精素逐渐累积,褐变程度加深,同时图 $2B_1$ 显示鲜味强度随糖添加量增加而呈现先增加后降低的趋势,当蛋白-糖比例为 3∶2 时,鲜味评分最高($P<0.01$)。当蛋白-糖比例小于 2∶3 后,焦糊味明显增加($P<0.01$),酸味亦小幅增加。因此选择蛋白-糖比例为 3∶2 时花椒籽蛋白美拉德肽整体风味最佳。

图 $2A_2$ 和图 $2B_2$ 反映了反应时间对 MRP 的反应程度和感官评分的影响。反应时间为 60 min 时鲜味和咸味的感官评分均显著高于其他反应时间($P<0.01$),且产物在 294 nm 处的吸光度达到最大,说明此时中间产物生成最多,最有利于美拉德反应的发生。从 40 min 开始,反应时间越长,A_{420} 值越大,表明在反应过程中终产物类黑素的积累逐渐增加,并生成含氮杂环化合物和有害物质,不仅影响最终产物色泽,还伴有苦味和焦糊味等杂味生成[25]。由此可见,60 min 为花椒籽蛋白肽美拉德反应的最适反应时间。

反应温度影响美拉德反应进行的不同途径,进而生成不同风味的产物[26]。由图 $2A_3$ 和图 $2B_3$ 可见,反应温度超过 130 ℃ 后,产物在 294 nm 和 420 nm 处的吸光值均明显增加,焦糊味显著增加($P<0.01$),这是由于反应温度过高破坏了美拉德反应产物的稳定性导致最终产物类黑素快速累积[27]。反应温度较低时如 90 ℃ 和 100 ℃,反应速率较慢,产物较少,呈味物质较少。当反应温度为 110 ℃ 时,产物在 294 nm 处的吸光值最高,且鲜味评分最高($P<0.01$)。综上,选择 110 ℃ 作为最适反应温度。

2.2.2 响应面试验 根据 Box-Behnken 响应面设计,结合单因素实验数据结果,以蛋白-糖比例(A)、反应温度(B)、反应时间(C)为自变量,鲜味评分为响应值,所得三因素三水平试验结果如表 4 所示。利用 Desingn-Expert 软件对上述结果进行多元二次回归拟合,得到鲜味感官评分的二次多项回归方程为:

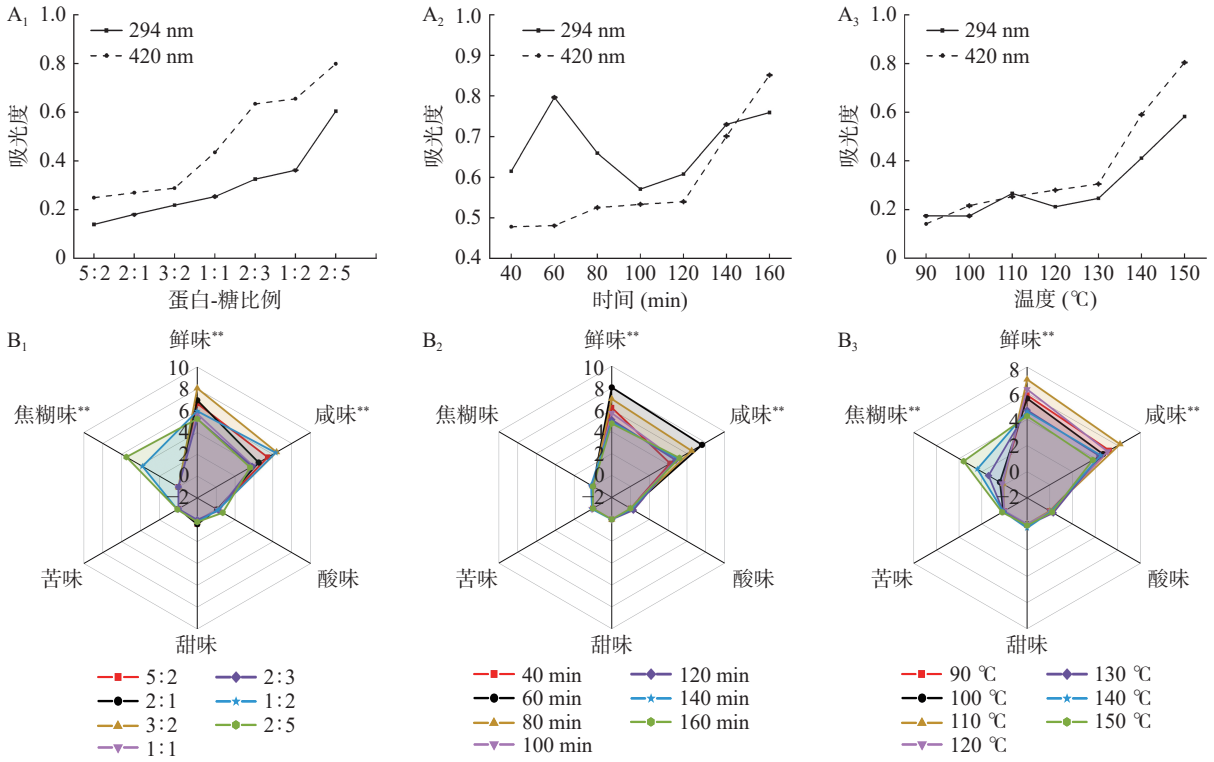


图 2　花椒籽蛋白酶解肽美拉德反应单因素实验结果

Fig.2　Single factor test results of enzymatic hydrolysate of *Zanthoxylum* seed protein Maillard reaction

注：A.不同因素对美拉德反应产物在 294 nm 和 420 nm 处吸光度的影响；B.美拉德反应产物感官结果雷达图；下标 1~3 分别表示蛋白-糖比例、反应时间、反应温度；*表示酶解肽与美拉德肽组间差异显著，$P<0.05$；**表示差异极显著，$P<0.01$。

$Y=7.98-0.5574A-0.7598B-1.1971C-0.5745AB+0.4173AC+0.372BC-0.9951A^2-1.9624B^2-1.2056C^2$，其中 R^2 值为 0.9688。为验证方程的可靠性，对相关实验数据进行方差分析，结果如表 5 所示，B、C、A^2、B^2、C^2 对响应值的影响极显著（$P<0.01$），A 显著（$P<0.05$），交互项 AB 显著（$P<0.05$）。模型极显著（$P<0.01$），失拟项不显著（$P>0.05$），表明回归方程极显著，说明根据该回归方程拟合得到的最优条件可靠。根据 F 值可得三因素对鲜味评分的主次影响依次为 C>B>A。根据数据结果绘制各因素响应面交互作用如图 3 所示，交互项响应面坡度陡峭且等高线较密集接近椭圆形，其中坡度陡峭程度 AB>BC>AC，则蛋白-糖比和反应温度的交互作用对鲜味感官评分具有较大影响。回归方程模型预测最佳工艺条件为蛋白-糖比 36:25，反应温度 106.43 ℃，反应时间 52.21 h，预测此时鲜味评分为 8.40 分。为验证模型预测准确性，根据实际情况将预测条件调整

表 4　响应面试验设计及结果

Table 4　Design and results of response surface test

实验号	A蛋白-糖比例	B反应温度(℃)	C反应时间(min)	鲜味评分(分)
1	3:2	110	60	7.667
2	9:5	110	70	4.023
3	6:5	100	60	5.354
4	3:2	120	70	3.235
5	3:2	110	60	7.971
6	6:5	120	60	5.125
7	3:2	110	60	8.459
8	3:2	100	70	4.152
9	6:5	110	50	8.37
10	6:5	110	70	4.984
11	3:2	110	60	7.536
12	3:2	120	50	4.728
13	9:5	110	50	5.74
14	3:2	100	50	7.133
15	9:5	120	60	3.542
16	9:5	100	60	6.069
17	3:2	110	60	8.267

表 5　回归模型方差分析

Table 5　Analysis of variance of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	50.39	9	5.60	24.15	0.0002
A蛋白-糖比例	2.49	1	2.49	10.72	0.0136
B反应温度	4.62	1	4.62	19.91	0.0029
C反应时间	11.46	1	11.46	49.44	0.0002
AB	1.32	1	1.32	5.69	0.0485
AC	0.6964	1	0.6964	3.00	0.1267
BC	0.5535	1	0.5535	2.39	0.1663
A^2	4.17	1	4.17	17.98	0.0038
B^2	16.21	1	16.21	69.92	<0.0001
C^2	6.12	1	6.12	26.39	0.0013
残差	1.62	7	0.2319		
失拟项	1.02	3	0.3388	2.23	0.2268
误差	0.6070	4	0.1517		
总和	52.02	16			

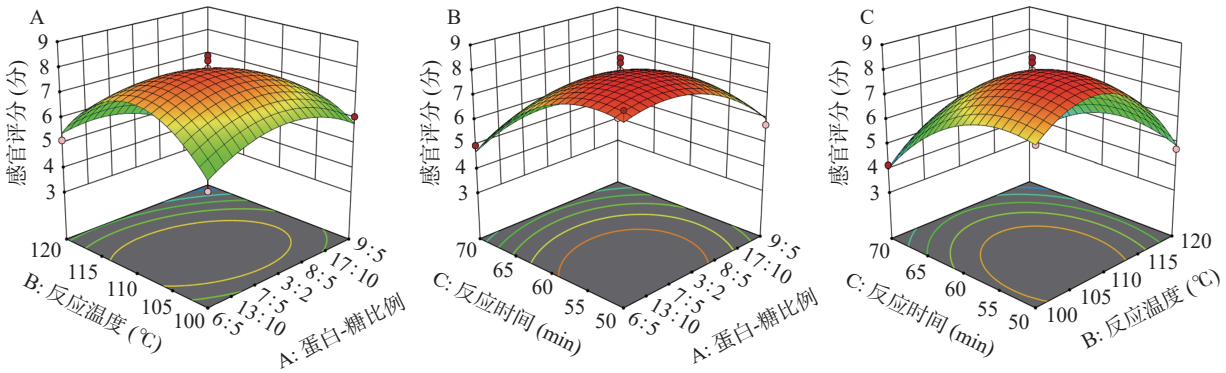


图 3 蛋白-糖比例、反应温度和反应时间对花椒籽蛋白美拉德肽感官评分的影响

Fig.3 Effects of protein sugar ratio, reaction temperature, and reaction time on sensory evaluation of Maillard peptides from *Zanthoxylum* seed protein

注: A: 蛋白-糖比例和反应温度; B: 蛋白-糖比例和反应时间; C: 反应温度和反应时间。

为: 蛋白-糖比例 3∶2(g/g), 反应温度 106 ℃, 反应时间 52 min, 在此条件下测得产物平均鲜味感官评分为 8.38 分, 与模型预测值无显著差异, 表明该方程具有实际意义。

2.3 美拉德反应对花椒籽蛋白酶解肽电子舌风味特征的影响

电子舌可通过传感器模仿人类的味觉来客观定量地评价样品的滋味差异[28]。使用电子舌设备测定样品的酸味、苦味、涩味、苦味回味、涩味回味、鲜味、丰富性和咸味, 结果如图 4 所示。与空白对照组(5 mg/mL 的谷氨酸钠溶液)相比, 酶解肽和美拉德肽的鲜味和咸味均极显著提高(P<0.01), 且经美拉德反应后花椒籽蛋白肽的鲜味、咸味及丰富性的响应值均极显著提高(P<0.01), 表明美拉德肽可表现出更强的鲜味和更高的丰富性, 这与感官结果一致。美拉德反应前后酸味、涩味及涩味回味值均低于无味点值(响应值为 0 的点), 说明不呈现酸味和涩味。综上, 美拉德反应产物, 即含鲜味氨基酸的肽类和糖基

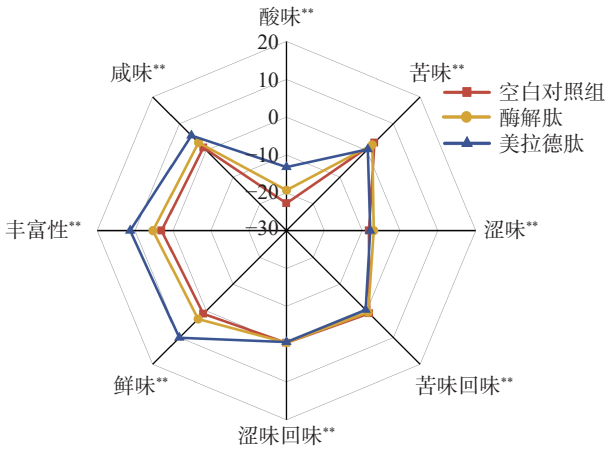


图 4 花椒籽蛋白酶解肽和美拉德肽电子舌结果雷达图

Fig.4 Radar image of enzymatic peptides and Maillard peptides from *Zanthoxylum* seed protein electronic tongue response

注: *表示酶解肽与美拉德肽之间差异显著, P<0.05; **表示差异极显著, P<0.01。

化多肽可在与谷氨酸钠协同作用下增强鲜味, 使风味层次更加丰富而不会带来负面味觉影响, 整体风味更趋平衡和鲜美, 因此作为鲜味调味剂具有良好的市场前景。

2.4 花椒籽蛋白美拉德肽鲜味增强分析

图 5 为根据公式(2)计算得出的鲜味增强率。结果表明, 花椒籽蛋白美拉德肽具有明显增鲜作用, 当肽添加量为 3.5 mg/mL 时, 鲜味增强率达到 61.69%, 鲜味感官评分接近 9 mg/mL 谷氨酸钠溶液(P>0.05), 表明浓度为 3.5 mg/mL 的花椒籽蛋白美拉德肽增鲜效果显著, 可将谷氨酸钠含量有效降低 44%。鲜味增强源于美拉德反应过程中产生的呈味肽, Zhang 等[29] 从花生分离蛋白美拉德肽中鉴定出鲜味肽和鲜味增强肽, 因此利用花椒籽蛋白 MRP 的增鲜作用实现减盐减钠不减味的新型增鲜调味品创制具有重要意义。

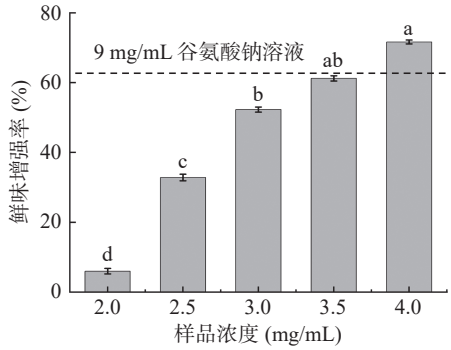


图 5 花椒籽蛋白美拉德肽的感官评价鲜味增强度

Fig.5 Sensory evaluation of Maillard peptides from *Zanthoxylum* seed protein for enhancing umami taste

注: 不同字母表示具有显著性差异, P<0.05。

2.5 美拉德反应对花椒籽蛋白酶解肽分子量分布的影响

采用 GPC 法评估花椒籽蛋白肽美拉德反应前后产物的分子量分布情况如图 6 所示。与酶解肽相比, 经美拉德反应后分子量>5000 Da 的肽段占比显著降低(P<0.05), 而分子量为<500 Da、500~1000 Da、

1000~2000 Da、2000~3000 Da 和 3000~5000 Da 五个组分占比均显著增加(P<0.05)。在美拉德反应进程中，一方面高温条件致使大分子量肽链发生断裂、降解和重组，生成新低分子量肽段和游离氨基酸，使得高分子量肽段含量降低；另一方面部分肽链发生结构重排和交联作用，或肽链中氨基酸残基与木糖发生糖肽交联反应，致使中间段分子量产物含量增加[30]。分子量为 500~1000 Da 的产物经美拉德反应后含量占比由 6.14% 增至 14.88%(P<0.05)，Zhang 等[31] 分离鉴定出呈鲜味的肽段一般为<1000 Da 的小分子量肽段，这可能与花椒籽蛋白肽经美拉德反应后鲜味增强有关。

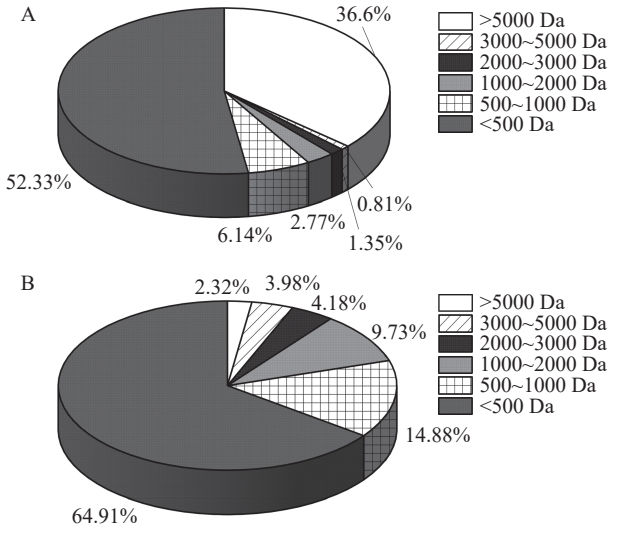


图 6　花椒籽蛋白酶解肽(A)与美拉德肽(B)分子量分布

Fig.6　Molecular weight distribution of enzymatic peptides (A) and Maillard peptides (B) from *Zanthoxylum* seed protein

2.6　美拉德反应对花椒籽蛋白酶解肽游离氨基酸含量的影响

美拉德反应后氨基酸组成可以反映游离氨基酸参与反应的程度，并通过氨基酸比例的改变揭示经美拉德反应后产物味觉特性的变化[32]。表 6 为美拉德反应前后游离氨基酸组成及含量占比。美拉德肽中共检测出 21 种氨基酸，比反应前减少 1 种，这是由于高半胱氨酸中的硫原子使其参与反应而不再以氨基酸的形式存在[33]。反应后各游离氨基酸含量占比大部分呈降低趋势，表明花椒籽蛋白酶解肽在美拉德反应进程中，游离氨基酸与木糖发生羰氨反应，致使游离氨基酸被消耗[34−35]。值得注意的是，谷氨酰胺含量显著增加 10.28%(P<0.05)，谷氨酰胺分解后可产生吡嗪类物质并呈现鲜味，结合感官评定结果表明经美拉德反应后花椒籽蛋白肽的整体风味特性有效提升，尤其是鲜味和风味的丰富性[36]。有研究表明疏水性氨基酸(Pro、Tyr、Val、Met、Ile、Leu 和 Phe)在加热时会产生苦味[16]。美拉德反应后，总疏水性氨基酸含量占比由 37.08% 下降至 33.08%，表明更多的疏水性氨基酸参与了美拉德反应，这也是苦味减少、风味

表 6　花椒籽蛋白酶解肽和美拉德肽游离氨基酸含量占比

Table 6　Amino acid content of enzymatic peptides and Maillard peptides from *Zanthoxylum* seed protein

氨基酸种类	酶解肽含量(%)	美拉德肽含量(%)
谷氨酸(Glu)	2.87±0.07^a	2.47±0.03^b
天冬氨酸(Asp)	1.25±0.00^a	0.94±0.01^b
谷氨酰胺(Gln)	11.37±0.14^b	21.54±0.16^a
赖氨酸(Lys)	3.56±0.04^a	3.61±0.03^a
脯氨酸(Pro)	0.65±0.01^a	0.43±0.00^b
苏氨酸(Thr)	4.03±0.16^a	3.27±0.04^b
亮氨酸(Leu)	7.37±0.17^a	6.63±0.02^b
异亮氨酸(Ile)	3.87±0.01^a	3.37±0.01^b
缬氨酸(Val)	6.04±0.06^a	5.43±0.02^b
丙氨酸(Ala)	2.46±0.03^a	1.79±0.00^b
甘氨酸(Gly)	0.87±0.01^a	0.59±0.00^b
丝氨酸(Ser)	4.39±0.07^a	3.40±0.01^b
甲硫氨酸(Met)	2.61±0.02^a	2.45±0.01^a
天冬酰胺(Asn)	2.94±0.08^a	2.42±0.03^b
精氨酸(Arg)	24.15±0.09^a	22.17±0.05^b
组氨酸(His)	3.00±0.022^a	2.84±0.02^a
苯丙氨酸(Phe)	4.79±0.05^a	4.27±0.02^b
酪氨酸(Tyr)	11.76±0.29^a	10.50±0.02^b
色氨酸(Trp)	1.22±0.08^a	1.23±0.01^a
鸟氨酸盐酸盐(Orn)	0.59±0.01^a	0.59±0.00^a
γ-氨基丁酸(GABA)	0.08±0.00^a	0.06±0.00^a
高半胱氨酸(Hcy)	0.17±0.00^a	–
疏水性氨基酸(HAA)	37.08±0.12^a	33.08±0.04^b
鲜味氨基酸(UAA)	18.43±0.01^b	27.38±0.20^a
苦味氨基酸(BAA)	57.54±0.06^a	52.22±0.09^b

注：不同小写字母表示同行数据差异显著，P<0.05；“–”表示未检出。

改善的原因之一[37−38]。同时，美拉德反应后鲜味氨基酸(Glu、Asp、Gln 和 Asn)占比增加 8.95%(P<0.05)，苦味氨基酸(Arg、His、Phe、Tyr、Met、Leu 和 Ile)占比减少 5.32%(P<0.05)，进一步表明美拉德肽可呈现出更加鲜美的风味。这一变化主要归因于美拉德反应过程中肽与还原糖或糖降解产物进行热降解反应和交联反应，改变游离氨基酸的组成，增强鲜味并降低苦味，从而提升产物整体风味质量[13,39]。

2.7　花椒籽蛋白美拉德肽序列鉴定

利用 HPLC-MS/MS 对花椒籽蛋白美拉德肽进行序列鉴定分析，结果如表 7 所示，经鉴定多肽含有 6~16 个氨基酸，分子量分布于 791.4177~1752.81 Da。根据感官评价与电子舌分析结果证实花椒籽蛋白美拉德肽确实对味觉特征尤其是鲜味和咸味存在关键增强作用。而已有研究表明豌豆蛋白、大米蛋白美拉德肽能有效增强咸味、鲜味或肉味，且糖基化反应的关键修饰位点位于 Asn 残基[15,40]。所得肽段序列中均含有亲水性氨基酸尤其是谷氨酸(E)、天冬氨酸(D)、丝氨酸(S)和天冬酰胺(N)中的一种或几种，且大多具有连续酸性氨基酸结构(DD、DE、ED、EE)，据报道上述氨基酸残基是鲜味蛋白受体结合的活性位点且有助于肽呈鲜[41−42]。为进一步探究花椒籽

表 7 花椒籽蛋白美拉德肽的 LC-MS/MS 鉴定

Table 7 Results of LC-MS/MS identification of Maillard peptides from *Zanthoxylum* seed protein

序列	分子质量(Da)	长度	m/z	带电荷数	保留时间(min)	峰面积(×10^5)	前体蛋白名称
AVEDVLRQQ	1056.556	9	529.288	2	39.7032	1.87	甘氨酸富集蛋白
EADSNDFRPL	1162.525	10	582.2727	2	45.047	1.90	Cupin型蛋白
EEDENPYVF	1140.461	9	571.2411	2	67.1127	21.0	Cupin型蛋白
EEEEDENPY	1152.409	9	577.2136	2	21.7268	5.17	Cupin型蛋白
EEFRVL	791.4177	6	792.4257	1	65.0235	5.30	11S球蛋白X4
FDTRILAE	963.5025	8	482.7601	2	59.8349	11.5	Cupin型蛋白
FNVNPEIIR	1100.598	9	551.308	2	67.5168	4.75	11S球蛋白X3
GFDERLLAE	1048.519	9	525.2698	2	62.0887	3.05	11S球蛋白X4
VEEEFRVL	1019.529	8	510.7704	2	65.0235	2.77	11S球蛋白X4
VEEELEVLR	1114.587	9	558.3048	2	57.5058	2.48	11S球蛋白X3

蛋白美拉德肽的关键前体蛋白，借助 Peaks 8 软件数据库进行了肽序列来源分析，经拟合比对 AQ-9、EL-10、EF-9、EY-9、EL-6、FE-8、FR-9、GE-9、VL-8、VR-9 由 Cupin 型蛋白、甘氨酸富集蛋白和 11S 球蛋白 X3、X4 中释放，这与先前的研究一致，Bao 等[43]也发现葵花籽水解蛋白鲜味肽来源于 11S 球蛋白。

3 结论

本研究以花椒籽蛋白为原料，通过优化酶解与美拉德反应条件制备花椒籽蛋白美拉德反应增鲜肽。结果显示：以水解度为指标，筛选出碱性蛋白酶和风味蛋白酶进行分步酶解；以褐变度和感官评分为指标，通过单因素实验和响应面试验得到花椒籽蛋白美拉德肽最佳制备工艺条件为蛋白-糖比例 3∶2(g/g)，反应温度 106 ℃，反应时间 52 min。花椒籽蛋白美拉德肽以 3.5 mg/mL 的浓度加入谷氨酸钠溶液中，鲜味增强率可达到 61.69%。电子舌结果与感官评价结果一致，鲜味均显著提高。经美拉德反应后，分子量分布于 500~1000 Da 的肽段含量占比由 6.14% 增至 14.88%，其中鲜味氨基酸占比增加 8.95%，苦味氨基酸占比减少 5.32%，进一步表明美拉德反应使花椒籽蛋白肽增鲜能力增强且整体风味更加协调。序列鉴定分析结果表明鲜味肽的关键前体蛋白源于 Cupin 型蛋白、甘氨酸富集蛋白和 11S 球蛋白，其氨基酸残基分布模式存在多个利于呈鲜的鲜味受体结合的活性位点。然而由于美拉德反应的复杂性及鲜味物质存在的多样性，美拉德肽与鲜味受体蛋白间的具体作用机制仍需进一步探索，未来需结合计算模拟与组学技术，建立从分子结构到感官特性的系统性评价方法，以期为呈味机理的解析提供新视角。本研究为花椒籽蛋白精深加工及花椒基专属咸鲜融组调味基料的创制提供了理论基础与实践依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] ZHU X, WU D, ZHAO L, et al. Unveiling the flavor and quality variations in dried Zanthoxylum bungeanum maxim from China's diverse regions[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102017.

[2] 李宁, 梁世岳, 刘正群, 等. 花椒籽对蛋鸡生产性能、血清指标及蛋品质的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(18): 35−39. [LI N, LIANG S Y, LIU Z Q, et al. Effect of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim seeds on production performance, serum indicators, and egg quality of laying hens[J]. Feed Research, 2024, 47(18): 35−39.]

[3] 刘玉兰, 李锦, 王格平, 等. 花椒籽油与花椒油风味及综合品质对比分析[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 195−201. [LIU Y L, LI J, WANG G P, et al. Comparative study on flavor and overall quality of *Zanthoxylum bungeanum* seed oil and *Zanthoxylum bungeanum* oil[J]. Food Science, 2021, 42(14): 195−201.]

[4] LI C M, KONG Q, MOU H J, et al. Biotransformation of alkylamides and alkaloids by lactic acid bacteria strains isolated from *Zanthoxylum bungeanum* meal[J]. Bioresource Technology, 2021, 330: 124944.

[5] 姜太玲. 花椒籽蛋白抗菌肽的制备及其性质研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015. [JIANG T L. Preparation and characteristies of antimicrobial peptides from prickly ash (*Zanthoxylum Bungeanum* Maxim.) seed protein[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015.]

[6] 李荣, 于君, 姜子涛, 等. 微波辅助分步酶解紫苏饼粕蛋白制备鲜味肽[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 169−175. [LI R, YU J, JIANG Z T, et al. Preparation of umami peptide by microwave-assisted stepwise enzymatic hydrolysis of Perilla seed meal protein[J]. Food Science, 2017, 38(20): 169−175.]

[7] ZOU T T, KANG L, YANG C, et al. Flavour precursor peptide from an enzymatic beef hydrolysate Maillard reaction-II: Mechanism of the synthesis of flavour compounds from a sulphur-containing peptide through a Maillard reaction[J]. Agriculture Week, 2019, 110: 8−18.

[8] ERIC K, RAYMOND L V, HUANG M, et al. Sensory attributes and antioxidant capacity of Maillard reaction products derived from xylose, cysteine and sunflower protein hydrolysate model system[J]. Food Research International, 2013, 54(2): 1437−1447.

[9] LIU P, HUANG M G, SONG S Q, et al. Sensory characteristics and antioxidant activities of Maillard reaction products from soy protein hydrolysates with different molecular weight distribution[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(5): 1775−1789.

[10] 谢宇希, 宋雪盈, 赵谋明, 等. 豌豆蛋白酶解-美拉德反应产物的制备及其提升低钠植物肉风味及储藏稳定性的研究[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 183−193. [XIE Y X, SONG X Y, ZHAO M M, et al. Preparation of Maillard reaction products derived from pea protein enzymatic hydrolysate and improvement of

the flavor and storage stability of low-sodium plant-based meat[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 183−193.]
[11] WEI C K, THAKUR K, LIU D H, et al. Enzymatic hydrolysis of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) protein and sensory characterization of Maillard reaction products[J]. Food Chemistry, 2018, 263: 186−193.
[12] OGASAWARA M, KATSUMATA T, EGI M J F C. Taste properties of Maillard-reaction products prepared from 1000 to 5000 Da peptide[J]. Food Chemistry, 2006, 99(3): 600−604.
[13] YAN F, CUI H P, ZHANG Q, et al. Small peptides hydrolyzed from pea protein and their Maillard reaction products as taste modifiers: saltiness, umami, and kokumi enhancement[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(6): 1132−1141.
[14] DONG S Y, LI Y Q, SUN X, et al. Structure, physicochemical properties, and biological activities of protein hydrolysates from *Zanthoxylum* seed[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2024, 104(6): 3329−3340.
[15] ZHANG Z Y, CHEN J Y, ZHENG L, et al. The potential meat flavoring derived from Maillard reaction products of rice protein isolate hydrolysate-xylose via the regulation of temperature and cysteine[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101491.
[16] LI L X, LIU S, SUN N, et al. Effects of sucrase enzymatic hydrolysis combined with Maillard reaction on soy protein hydrolysates: bitterness and functional properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 256(P1): 128344.
[17] LIYANAARACHCHI G, MAHANAMA K, SOMASIRI H, et al. Development and validation of a method for direct, underivatized analysis of free amino acids in rice using liquid chromatography–tandem mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2018, 1568: 131−139.
[18] 陈荣荣, 李文, 吴迪, 等. 大球盖菇酶解液中鲜味肽的分离鉴定及其协同增鲜效果分析[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 65−74. [CHEN R R, LI W, WU D, et al. Separation and identification of umami peptides from the enzymatic hydrolysate of stropharia rugosoannulata and their synergistic umami-enhancing effect[J]. Food Science, 2024, 45(1): 65−74.]
[19] TABARESTANI H S, SHAHRAM H, MAHOONAK A S, et al. Enzymatic hydrolysis of white-cheek shark skin gelatin: optimization, structural transformations, functional characteristics, and antioxidant potential[J]. LWT, 2024, 213: 117060.
[20] 郭少莉, 赵嘉馨, 杨舒寒, 等. 基于响应面法优化鲍鱼内脏蛋白酶解工艺[J]. 食品工业, 2024, 45(12): 42−47. [GUO S L, ZHAO J X, YANG S H, et al. Optimization of abalone viscera protein hydrolysis process by response surface methodology[J]. The Food Industry, 2024, 45(12): 42−47.]
[21] LIU B Y, LI N N, CHEN F S, et al. Review on the release mechanism and debittering technology of bitter peptides from protein hydrolysates[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(6): 5153−5170.
[22] 戴梦萍, 段涵怡, 陈晓萌, 等. 风味蛋白酶酶解桑葚制备抗氧化肽的工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(2): 116−120. [DAI M P, DUAN H Y, CHEN X M, et al. Study on the enzymolysis process of mulberry with flavor protease to prepare antioxidant peptides[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(2): 116−120.]
[23] 李梦卓, 段雪妍, 王俊娟, 等. 蛋白质水解物的苦味形成机制及其酶解脱苦和风味改善的研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 417−426. [LI M Z, DUAN X Y, WANG J J, et al. Research progress on the bitter taste formation mechanism in protein hydrolysates and their enzymatic debittering and flavor improvement[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 417−426.]
[24] 吴爽, 王涵, 王展, 等. 米糠多糖-乳清分离蛋白美拉德反应及其产物表征[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 131−138. [WU S, WANG H, WANG Z, et al. Maillard reaction between rice bran polysaccharide and whey protein isolate and characterization of the reaction product[J]. Food Science, 2023, 44(4): 131−138.]
[25] 薛瑞, 徐婷, 付宣, 等. 模糊数学法优化小龙虾虾壳酶解液美拉德反应条件及其风味分析[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(1): 108−114. [XUE R, XU T, FU X, et al. Optimization of Maillard reaction conditions for crayfish shell enzymatic hydrolysate using fuzzy mathematics method and analysis of its flavor[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(1): 108−114.]
[26] 刘海梅, 安孝宇, 陈静, 等. 牡蛎酶解液美拉德反应体系优化及产物营养评价[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 178−182. [LIU H M, AN X Y, CHEN J, et al. Optimization of the Maillard reaction conditions of enzymatic hydrolysate of oyster and nutritional evaluation of Maillard reaction products[J]. Food Science, 2017, 38(16): 178−182.]
[27] 李文伟, 贲亚楠, 刘慧, 等. “半胱氨酸-葡萄糖”美拉德反应产物中肉香味工艺优化及结构表征[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(12): 71−81. [LI W W, WENG Y N, LIU H, et al. Process optimization and structural characterization of meat flavorcompounds in cysteine-glucose Maillard reaction products[J]. China Food Additives, 2024, 35(12): 71−81.]
[28] GAO B H, HU X B, LI R L, et al. Screening of characteristic umami substances in preserved egg yolk based on the electronic tongue and UHPLC-MS/MS[J]. LWT, 2021, 152: 112396.
[29] ZHANG J N, SUN-WATERHOUSE D X, FENG Y Z, et al. The umami intensity enhancement of peanut protein isolate hydrolysate and its derived factions and peptides by Maillard reaction and the analysis of peptide (EP) Maillard products[J]. Food Research International, 2019, 120: 895−903.
[30] ZAMORA R, LEÓN M M, HIDALGO F, et al. Oxidative versus non-oxidative decarboxylation of amino acids: conditions for the preferential formation of either Strecker aldehydes or amines in amino acid/lipid-derived reactive carbonyl model systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(36): 8037−8043.
[31] ZHANG L X, SUN X J, LU X, et al. Characterization of peanut protein hydrolysate and structural identification of umami-enhancing peptides[J]. Molecules, 2022, 27(9): 2853.
[32] SUN A, CHEN L N, WU W, et al. The potential meat flavoring generated from Maillard reaction products of wheat gluten protein hydrolysates-xylose: Impacts of different thermal treatment temperatures on flavor[J]. Food Research International, 2023, 165: 112512.
[33] ZHANG W W, HAN Y Q, SHI K X, et al. Effect of different sulfur-containing compounds on the structure, sensory properties and antioxidant activities of Maillard reaction products obtained from *Pleurotus citrinopileatus* hydrolysates[J]. LWT, 2022, 171: 114144.
[34] 张青祥, 陈传奇, 娄湘琴, 等. 基于 GA-BP 神经网络的鲅鱼鲜味肽美拉德反应增鲜研究[J]. 南方农业学报, 2024, 55(6): 1733−1743. [ZHANG Q X, CHEN C Q, LOU X Q, et al. Maillard reaction freshening of Spanish mackerel umami peptides based on GA-BP neural network[J]. Journal of Southern Agriculture, 2024, 55(6): 1733−1743.]
[35] LAN X H, LIU P, XIA S Q, et al. Temperature effect on the non-volatile compounds of Maillard reaction products derived from

xylose–soybean peptide system: Further insights into thermal degradation and cross-linking[J]. Food Chemistry, 2009, 120(4): 967−972.

[36] 邱敏, 陈智琦, 纪虹宇, 等. 大豆蛋白美拉德反应风味产物在碧根果加工中的减盐应用[J]. 中国调味品, 2024, 49(3): 33−38. [QIU M, CHEN Z Q, JI H Y, et al. Application of Maillard reaction flavor products of soy proteins in salt reduction during processing of Pecan[J]. China Condiment, 2024, 49(3): 33−38.]

[37] SENTANDREU M A, STOEVA S, ARISTOY M C, et al. Identification of small peptides generated in Spanish dry-cured ham[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1): 64−69.

[38] CHO M J, UNKLESBAY N, HSIEH F-H, et al. Hydrophobicity of bitter peptides from soy protein hydrolysates[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2004, 52(19): 5895−5901.

[39] FU Y, ZHANG Y H, SOLADOYE O P, et al. Maillard reaction products derived from food protein-derived peptides: Insights into flavor and bioactivity[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(20): 3429−3442.

[40] FU B F, XU X B, ZHANG X, et al. Identification and characterisation of taste-enhancing peptides from oysters (*Crassostrea gigas*) via the Maillard reaction[J]. Food Chemistry, 2023, 424: 136412.

[41] WANG W L, CUI Z Y, NING M H, et al. *In-silico* investigation of umami peptides with receptor T1R1/T1R3 for the discovering potential targets: A combined modeling approach[J]. Biomaterials, 2022, 281: 121338.

[42] ZHU J W, XIA X, ZHANG F X, et al. Taste characteristic and the mechanism of light-colored Maillard reaction products derived from gluten hydrolysate[J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102394.

[43] BAO X L, MA S, FU Y N, et al. Sensory and structural characterization of umami peptides derived from sunflower seed[J]. CyTA-Journal of Food, 2020, 18(1): 485−492.