

花生肽的制备及其美拉德反应产物风味特性研究

于 珍, 布冠好*, 王美月, 赵晨宇

(河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001)

摘 要: **目的** 制备水解度较高的花生肽并研究其美拉德反应产物的风味特性。**方法** 从花生粕中提取花生蛋白, 利用碱性和风味蛋白酶双酶分步酶解制备花生肽, 以水解度和蛋白质回收率为指标, 确定酶解工艺条件。当肽糖质量比为 10:1、温度为 105℃时, 研究美拉德反应时间(0~100 min)对花生肽美拉德产物结构和风味的影响。**结果** 酶解制备花生肽最佳工艺条件为: 6000 U/g 碱性蛋白酶酶解 120 min, 450 U/g 风味蛋白酶酶解 150 min, 在此条件下花生蛋白的水解度为 20.26%; 美拉德反应结果表明, 随着反应时间的增加, 花生肽中游离氨基酸含量逐渐下降, 褐变程度逐渐增加, 美拉德产物风味感官评分呈现先增加后减小的趋势; 光谱分析表明, 美拉德反应后其肽链的空间结构发生改变且产生了一些有色物质前体; 通过气相色谱-质谱仪分析, 共检测出 54 种挥发性物质, 与未添加木糖的花生肽相比, 花生肽-木糖美拉德反应产生更多的吡嗪类、呋喃类、酮类、酯类等挥发性香气化合物。**结论** 本研究通过优化酶解工艺制备花生肽, 并探究花生肽美拉德反应产物的风味特性, 为天然香料的开发提供理论依据。

关键词: 花生肽; 双酶酶解; 美拉德反应; 风味

Preparation of peanut peptides and flavor properties of its Maillard reaction products

YU Zhen, BU Guan-Hao*, WANG Mei-Yue, ZHAO Chen-Yu

(College of Grain, Oil and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: Objective To prepare peanut peptides with higher degree of hydrolysis and study the flavor characteristics of the products of Maillard reaction. **Methods** Peanut protein was extracted from peanut meal, and peanut peptide was prepared by double enzymatic hydrolysis with alkaline and flavor protease. The enzymatic hydrolysis process conditions were determined based on the degree of hydrolysis and protein recovery rates. When the mass ratio of peptide to sugar was 10:1 and the Maillard reaction temperature was 105℃, the effects of Maillard reaction time (0–100 min) on the structure and flavor of peanut peptide Maillard reaction products was studied. **Results** The optimum process conditions for the preparation of peanut peptides by enzymatic hydrolysis were 6000 U/g alkaline protease for 120 min and 450 U/g flavor protease for 150 min. Under these conditions, the degree of hydrolysis of

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871748、31201293)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2019GGJS084)、河南工业大学青年骨干教师培育计划项目(21420064)、郑州市科技协同创新专项(21ZZXTCX17)、中国博士后科学基金面上项目(2021M701112)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31871748, 31201293), the Training Program for Young Backbone Teachers in Higher Education Institutions of Henan Province (2019GGJS084), the Young Backbone Teacher Training Program of Henan University of Technology (21420064), the Zhengzhou Science and Technology Collaborative Innovation Project (21ZZXTCX17), and the China Postdoctoral Science Foundation General Program (2021M701112)

*通信作者: 布冠好, 博士, 教授, 主要研究方向为蛋白质化学与应用。E-mail: buguanhao2008@126.com

*Corresponding author: BU Guan-Hao, Ph.D, Professor, College of Grain, Oil and Food, Henan University of Technology, No.100 Lianhua Street, High-tech Zone, Zhengzhou 450001, China. E-mail: buguanhao2008@126.com

peanut protein was 20.26%. The results of Maillard reaction showed that with the increase of time, the content of free amino acids in peanut peptides gradually decreased, the degree of browning gradually increased, and the sensory scores of Maillard reaction product showed a trend of first increasing and then decreasing. The analysis of spectra showed that the spatial structure of the peptide chain was changed after the Maillard reaction and some colored precursors were produced. A total of 54 kinds of volatile substances were detected by gas chromatography-mass spectrometry. Compared with the peanut peptides without xylose, the peanut peptide-xylose Maillard reaction produced more volatile aroma compounds such as pyrazines, furans, ketones, and esters. **Conclusion** In this study, peanut peptides are prepared by optimizing enzymatic hydrolysis process and the flavor characteristics of Maillard reaction products of peanut peptides are investigated, which provide theoretical basis for the development of natural perfume.

KEY WORDS: peanut peptide; double enzyme hydrolysis; Maillard reaction; flavor

0 引言

目前国内外研究美拉德反应产物(Maillard reaction products, MRPs)大多是以动植物蛋白为原料^[1], 但动物蛋白原料成本较植物蛋白高, 在储存及安全性方面要求较严格。而花生粕蛋白作为一种价格低、来源广的植物基原料^[2-3], 经过酶解后会生成大量呈鲜味、酸味及咸味的小分子肽或游离氨基酸^[4], 不仅具有抗氧化等良好的生物学功能^[5-6], 还具有优异的呈味特性^[7-9], 但目前国内外对于花生蛋白酶解主要集中在抗氧化肽制备方面, 因而利用美拉德反应增强花生肽呈味特性需要进一步研究。

美拉德反应是指氨基(蛋白质、肽或氨基酸)和羰基(还原糖)之间的反应, 能产生大量的挥发性风味化合物, 是食品中生产良好风味的主要来源^[10-12]。美拉德反应中还原糖对其反应速率影响较大但对其风味影响相对较小, 因此氨基的选择对生产的风味起重要作用。本研究以花生粕为原料, 以碱溶酸沉法提取花生蛋白, 通过双酶分步酶解技术制备出水解度较佳的花生肽, 并将其花生肽作为美拉德反应氨基的来源, 木糖作为其羰基来源, 采用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)分析其风味成分, 探究在一定条件下花生肽经美拉德反应后产生的风味特性, 为花生肽的资源开发提供理论依据, 同时为天然香料的开发提供新途径和方法。

1 材料与方法

1.1 材料

低温花生粕(蛋白含量 49%, 实验室自制); 木糖(食品级, 河南东顺化工产品有限公司); 碱性蛋白酶(200 U/mg)、风味蛋白酶(20 U/mg)(上海源叶生物科技有限公司); 邻苯二甲醛、L-赖氨酸、2-甲基-3 庚酮(分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

UV-1901 紫外分光光度计(北京普析通用仪器有限公

司); F-7000 荧光分光光度计(日立高新技术公司); HSHZ-B 水浴恒温振荡器(上海跃进医疗器械有限公司); Kjeltac8400 凯氏定氮仪(丹麦 FOSS 公司); LGJ-10C 型冷冻干燥机(北京四环科技发展有限公司); GC-MS 仪器、TG-5SICMS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国赛默飞世尔科技有限公司)。

1.3 方法

1.3.1 花生蛋白的提取

取适量花生粕按一定比例加去离子水并调节 pH 至 9.0, 50℃恒温水浴振荡 2 h, 4500 r/min 离心 10 min, 取上清调节 pH 至 4.5, 4500 r/min 离心 10 min, 将沉淀冷冻干燥即可得到花生蛋白(凯氏定氮法测得蛋白质含量为 88.32%)。

1.3.2 花生肽的制备

(1) 双酶分步酶解

花生蛋白 3 g→去离子水 100 mL→调 pH 至 8.0→加入适量碱性蛋白酶→55℃水浴一定时间→90℃灭酶 10 min→冷却至室温→调 pH 为 7.5→加入风味蛋白酶→50℃水浴一定时间→90℃升温灭酶 10 min→冷却至室温→5000 r/min 离心 10 min→取上清→冷冻干燥→花生肽。

(2) 水解度测定

采用茚三酮比色法测定水解度^[13]。

(3) 蛋白回收率的测定

花生蛋白酶解液经离心后取上清, 凯氏定氮法测定其水溶性蛋白质的含量^[14], 蛋白质回收率(protein recovery, PR)按公式(1)计算:

$$PR/\% = \frac{A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, A_1 : 上清液中所测得的蛋白质含量, g; A_0 : 原料中总的蛋白质含量, g。

1.3.3 花生肽美拉德反应产物的制备

将水解度最高的花生肽与木糖按照一定的质量比溶于蒸馏水中, 磁力搅拌 30 min, 混匀后冻干, 取适量花生肽与木糖的混合物, 将其在 105℃烘箱中反应一定的时间(0、20、40、60、80、100 min), 反应结束后立即降至室温,

并储存于-20℃保存备用。

1.3.4 褐变程度及中间产物的测定

称取适量的 MRP_s 溶于去离子水中, 分别稀释相应的倍数, 褐变程度以 420 nm 处的吸光度表示, 中间产物以 294 nm 处的吸光度表示^[15]。

1.3.5 游离氨基酸含量的测定

参考张瑶^[16]的邻苯二甲醛法并稍作修改来测定游离氨基酸含量。

1.3.6 感官评定

参考袁桥娜等^[17]的方法对 MRP_s 挥发性风味进行感官评价。评价小组由 10 名(5 男 5 女)年龄在 20~29 岁之间经过感官培训的成员, 根据表 1 的评定标准对样品进行评分, 主要从形态、色泽、焦味、香味 4 个项目评分, 每个项目 10 分, 总分 40 分, 最终结果取平均值, 感官总分越高则表示其可接受度越高。

1.3.7 紫外光谱测定

用蒸馏水将 MRP_s 稀释为质量浓度 0.4 mg/mL, 设置波长为 220~400 nm^[18], 并以蒸馏水作为空白进行基线校准。

1.3.8 荧光光谱测定

用蒸馏水将 MRP_s 稀释为 0.4 mg/mL, 在激发波长 280 nm、发射波长 320~500 nm 条件下测定。

1.3.9 GC-MS 的测定

萃取条件: 将 2 g 左右的 MRP_s 溶于 25 mL 饱和食盐

水中, 并加入 20 μL 2-甲基-3-庚酮(0.8 mg/mL), 混匀后密封。60℃下吸附 30 min 后进样, 230℃解析 5 min。

GC-MS 条件: 参照 ZHAO 等^[19]的方法稍作修改。挥发性化合物在 TG-5SICMS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)分离; 载气 He, 流速 1 mL/min, 分流比 20:1 (*V_i:V_f*); 电子轰击 (electron impact, EI) 电离源, 离子源温度: 280℃, 传输温度: 250℃; 扫描质量范围: 35~450 amu, 扫描速率 0.2 amu/s。

采用内标法对挥发性成分进行半定量, 测定各个挥发性成分的质量浓度。

1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0 和 Origin 2021 软件进行统计分析及作图, 结果用平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

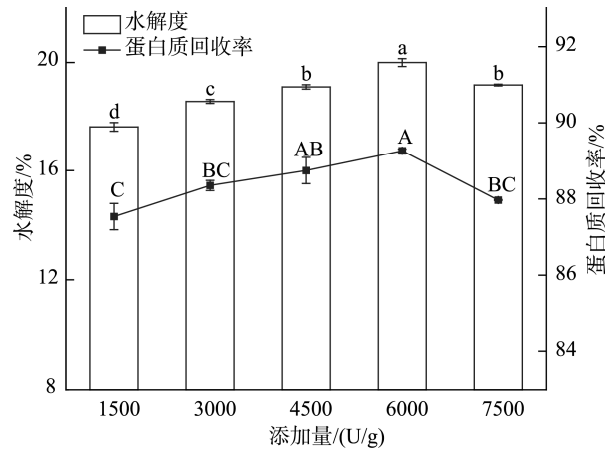
2.1 花生蛋白酶解条件的优化

2.1.1 碱性蛋白酶添加量的确定

碱性蛋白酶能够把蛋白质分子水解成氨基酸或者小分子肽, 蛋白酶的添加量会影响蛋白质的水解程度, 添加量过低时, 酶解时间过长; 添加量过高时, 可能会导致蛋白酶的竞争性抑制^[20]。如图 1 所示, 当碱性蛋白酶添加量低于 6000 U/g 时, 酶

表 1 MRP_s 感官评定标准
Table 1 Sensory evaluation criteria for MRP_s

评定项目	水平/分				
	1~2	3~4	5~6	7~8	9~10
颜色	浅黄	深黄	浅褐色	棕褐色	红褐色
形态	絮状悬浮物较多, 有沉淀	絮状悬浮物多, 无沉淀	絮状悬浮物较少	无絮状悬浮物	澄清透明
焦味	浓郁, 难以接受	较重, 可以接受	一般, 可以接受	较淡	无焦糊味
香味	无香味	香味轻微, 不易闻到	香味较淡	香味明显	香味浓郁



注: 图中不同大写字母代表蛋白质回收率之间差异显著, 不同小写字母代表水解度之间差异显著, $P<0.05$; 图 2~4、6 同。

图 1 碱性蛋白酶添加量对水解度和蛋白质回收率的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of alkaline protease addition on the degree of hydrolysis and protein recoveries ($n=3$)

与蛋白质结合越充分, 水解度和蛋白质回收率呈上升趋势; 当添加量超过 6000 U/g, 水解度和蛋白质回收率降低, 这可能是由于过量的蛋白酶抑制了其反应速率。因此将碱性蛋白酶添加量设为 6000 U/g 为最优酶解添加量。

2.1.2 碱性蛋白酶酶解时间的确定

如图 2 所示, 当碱性蛋白酶酶解时间大于 120 min 时, 水解度和蛋白质回收率的变化不显著($P>0.05$)。原因是随着酶解时间的增加, 蛋白酶的催化位点逐渐变少。此外, 酶的活性随着酶解时间的增加而降低, 同时酶解产物增多也会抑制酶的活性^[21]。因此, 选择碱性蛋白酶酶解时间为 120 min。

2.1.3 风味蛋白酶添加量的确定

有研究发现, 先通过碱性蛋白酶对花生蛋白进行第一步酶解, 再通过风味蛋白酶进一步酶解, 不仅可以提高底物蛋白的水解度, 还可以降低肽的苦味^[20]。如图 3 所示, 添加量在 600 U/g 时, 水解度达到最大, 添加量为 450 U/g

时, 蛋白回收率达到最大, 又因当添加量在 450、600 U/g 时, 水解度无显著性差异, 考虑到经济效益, 将风味蛋白酶添加量设为 450 U/g 为最优酶解添加量。

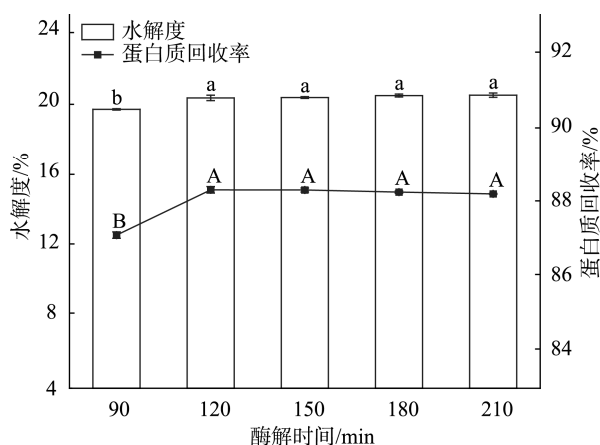


图 2 碱性蛋白酶酶解时间对水解度和蛋白质回收率的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of alkaline protease hydrolysis time on the degree of hydrolysis and protein recoveries ($n=3$)

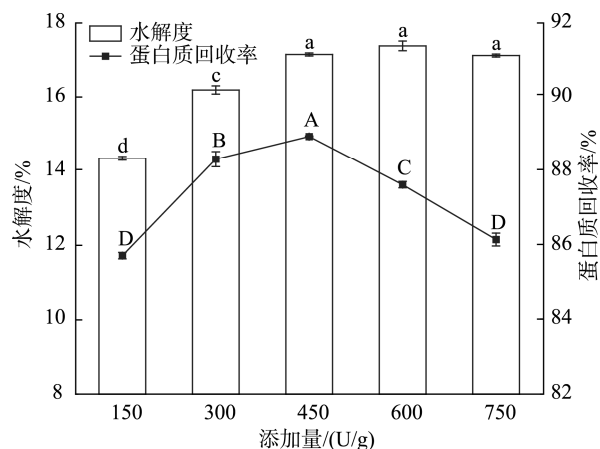


图 3 风味蛋白酶添加量对水解度和蛋白质回收率的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of flavor protease addition on the degree of hydrolysis and protein recoveries ($n=3$)

2.1.4 风味蛋白酶酶解时间的确定

风味蛋白酶酶解时间对水解度和蛋白质回收率的影响如图 4 所示, 当风味蛋白酶酶解时间小于 150 min 时, 水解度和蛋白质回收率随着酶解时间的增加而增加, 当酶解时间超过 150 min 时, 水解度和蛋白质回收率随着时间的增加而降低, 因此, 将风味蛋白酶的酶解时间设为 150 min 为最优酶解时间。

2.2 美拉德反应产物褐变程度及其感官评分

在 2.1 分别得到的最优酶解条件下测得花生肽水解度为 20.26%, 将此条件下的花生肽与木糖发生美拉德反应并测定其产物的结构和风味特性。由图 5 可知, 随着反应时间从 20 min 增加到 100 min, 294 nm 与 420 nm 处的吸光值先

急剧增大后缓慢增大, 表明其褐变程度不断增大、中间产物不断增多, 挥发性风味物质也不断生成, 感官评分随之升高。当反应时间超过 40 min 时, 产物色泽有明显加深现象且出现明显的焦糊味, 风味变差, 感官评分也随之降低。褐变程度研究结果与吴爽等^[22]研究结果一致, 因此, 在后续研究挥发性风味物质时选取反应时间为 40 min 进行分析。

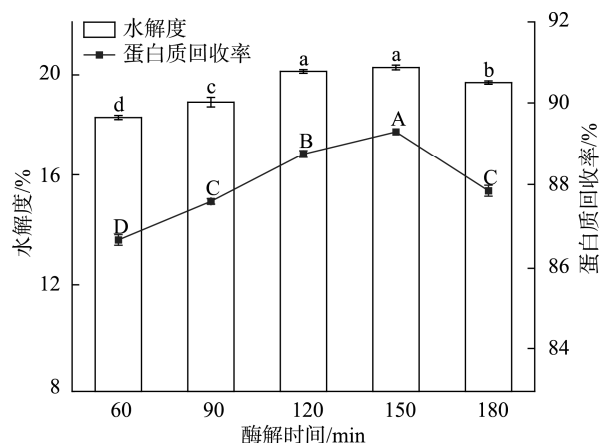
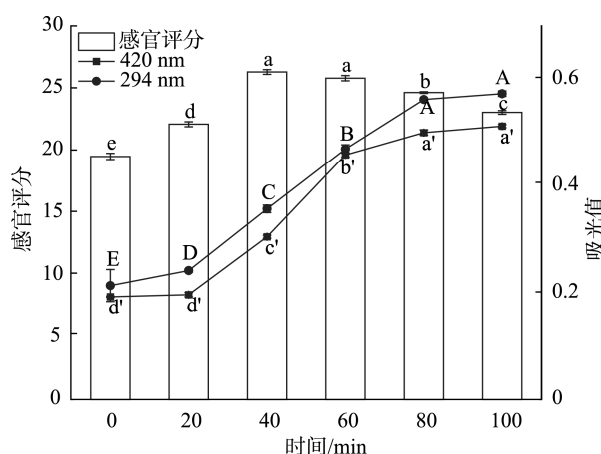


图 4 风味蛋白酶酶解时间对水解度和蛋白质回收率的影响($n=3$)

Fig.4 Effects of enzymatic hydrolysis time of flavor protease on degree of hydrolysis and protein recoveries ($n=3$)



注: a~e 为感官评分的显著性差异, A~E 为 $A_{294\text{ nm}}$ 的显著性差异, a'~d' 为 $A_{420\text{ nm}}$ 的显著性差异, $P<0.05$ 。

图 5 反应时间对美拉德反应褐变程度、中间产物及感官评分的影响($n=3$)

Fig.5 Effects of reaction time on the browning degree, intermediate products and sensory scores of Maillard reaction ($n=3$)

2.3 游离氨基酸含量分析

花生肽的游离氨基与糖链发生的羰氨缩合反应会引起酶解液中游离氨基酸含量变化。由图 6 可知, 随着反应时间从 0 min 增加到 100 min, 体系中游离氨基酸含量逐渐降低, 表明消耗的游离氨基酸较多, 反应程度较深, 生成的终产物含量增加, 本研究结果与刘伟^[23]的研究结果一致。

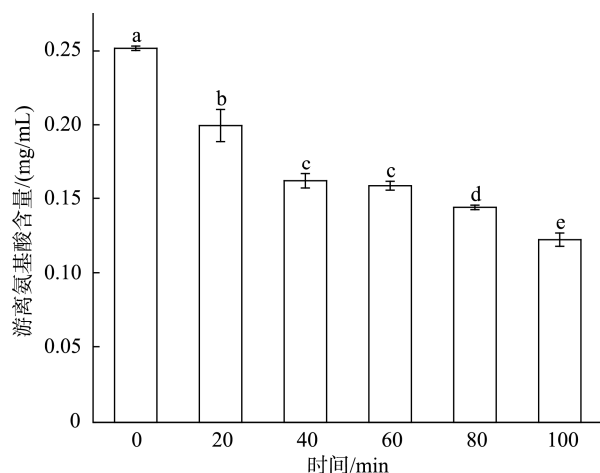


图 6 美拉德反应时间对花生肽游离氨基酸含量的影响($n=3$)
Fig.6 Effects of Maillard reaction time on free amino acid content of peanut peptides ($n=3$)

2.4 紫外光谱分析

由图 7 可知,随着反应时间从 0 min 增加到 100 min,MRPs 紫外吸收强度逐渐增强,且在 280 nm 左右有吸收峰,此处主要是美拉德反应初期阶段产生了 Schiff 碱,这种物质随后会发生葡糖胺(Amadori)重排反应,其反应产物在 280 nm 左右处显示出吸收峰^[24]。

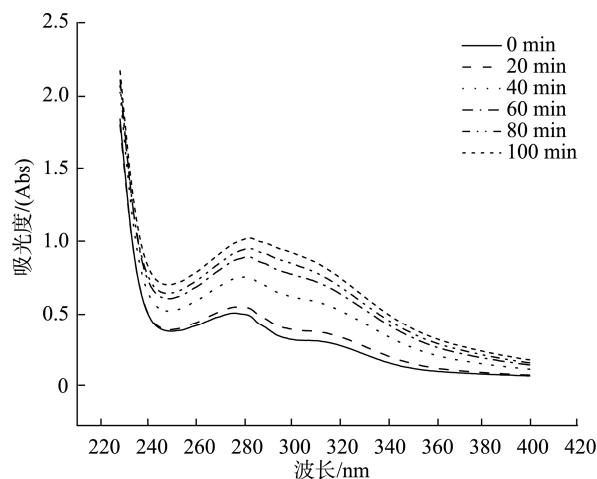


图 7 不同反应时间下的 MRPs 的紫外光谱图
Fig.7 Ultraviolet spectrogram of MRPs at different reaction times

2.5 荧光光谱分析

荧光物质不仅是美拉德反应的产物还是有色物质产生的前体。因此,荧光光谱的变化可以表征其美拉德反应程度。由图 8 可以看出,在 360 nm 处左右的最高荧光强度随着反应时间的增加而逐渐降低,最大发射波长从 358 nm 红移至 364 nm。这说明美拉德反应程度逐渐加深,生成的荧光物质逐渐向有色物质转变^[25]。

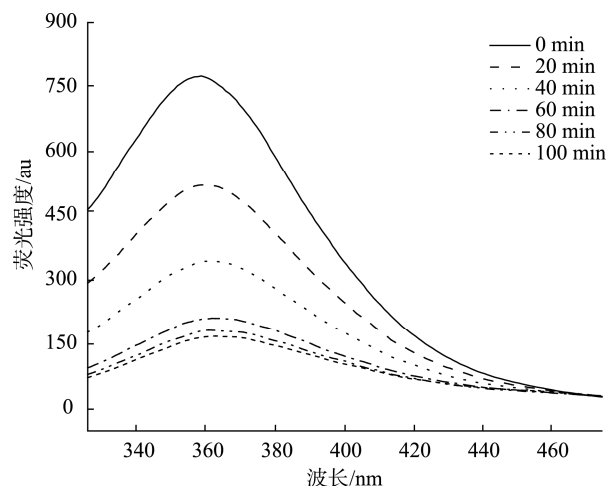


图 8 不同反应时间下的美拉德反应产物的内源荧光光谱图
Fig.8 Endogenous fluorescence spectrogram of Maillard reaction products at different reaction times

2.6 美拉德反应产物挥发性物质分析

通过采用 GC-MS 技术对花生肽及其美拉德反应产物进行挥发性物质分析,其中挥发性组分种类和数量如图 9 所示,花生肽美拉德产物共检测出 54 种挥发性化合物,且产生了更多的吡嗪类、呋喃类、酮类、酯类等挥发性化合物。挥发性成分含量如表 2 所示。由表 2 可知,花生肽、加热的花生肽及肽糖美拉德反应产物的挥发性风味物质的总浓度分别为 17.75、104.14、141.85 $\mu\text{g/g}$,由此可知美拉德反应可使花生肽的整体风味得到一定的提升。烷烃类挥发性风味结果表明肽自身的热降解可以产生较多的烷烃类化合物。因其具有较高的阈值,对其风味的贡献较小,但仍是决定样品香甜风味的重要因素^[26]。

在醇醛类挥发性风味成分方面,两类化合物在反应前后种类基本不变,但质量浓度发生较大变化。其中,醇类在反应后由 7.94 $\mu\text{g/g}$ 增加至 11.40 $\mu\text{g/g}$,醛类物质由 2.14 $\mu\text{g/g}$ 增加至 16.55 $\mu\text{g/g}$ 。醛类物质主要是氨基酸 Strecker 降解产生的,在挥发性风味中占主要作用,且因其阈值较低,对其样品风味的贡献程度较大^[27]。在所有样品中均检测到了苯乙醛和壬醛,其分别呈现水果香气、花果香味^[23]。

在吡嗪类挥发性风味方面,花生肽在加热后由 2.46 $\mu\text{g/g}$ 增加至 47.88 $\mu\text{g/g}$,这说明花生肽自身的热解反应会生成吡嗪类物质。然而,花生肽经美拉德反应后生成的吡嗪类物质浓度为 68.64 $\mu\text{g/g}$,这说明糖链的引入增加了吡嗪物质的含量和种类,如生成了浓度较高的 2,3,5-三甲基吡嗪(7.86 $\mu\text{g/g}$)、顺-2-甲基-6-(1-丙烯基)-吡嗪(3.78 $\mu\text{g/g}$),另外还生成了一些其他富含坚果及焙烤风味的吡嗪类^[28-29]。在美拉德反应过程中,含氮化合物是由氨基与羧基经羰氨缩合并进一步降解生成的,且体系 $\text{pH}>7$,因此会生成浓度较高的吡嗪类,这与前人研究结果一致^[30]。

在酯类挥发性风味方面,加热的花生肽含有 22.21 μg/g, 肽糖美拉德反应产物中含有 35.69 μg/g, 美拉德反应后产生的酯类浓度高于美拉德反应前,且新生成了己二酸二甲酯(0.7 μg/g)、硬脂酸甲酯(2.03 μg/g),这些酯类挥发性风味种类和浓度的变化,对样品整体风味起着柔和作用。体系 pH>7 时,酮类化合物是经过 Amadori 重排反应生成的。相比于醛酮、吡嗪类等,一些挥发性化合物(例如,烯烃类、有机酸类)生成的浓度较低,但仍对美拉德反应产物的整体香气起到一定的辅助作用^[31]。

3 结 论

以花生蛋白为原料,采用双酶分步酶解技术与美拉德反应相结合的方法,制备了整体风味浓郁的花生肽美拉德产物。优化后的花生肽制备工艺为: 6000 U/g 碱性蛋白酶酶解 120 min, 灭酶后加入 450 U/g 的风味蛋白酶,继续酶解 150 min, 在此条件下得到的花生肽水解度为 20.26%。美拉德反应时间为 40 min 时,花生肽的褐变程度适中,游离氨基酸损失较少,感官评分较高。GC-MS 结果表明,相比于未反应的花生肽,美拉德反应后生成了更多坚果味的吡嗪类、焦

糖味的呋喃类、酮类、酯类以及花果香气的醛类等物质。研究结果可以为天然香料的开发提供理论依据和基础。

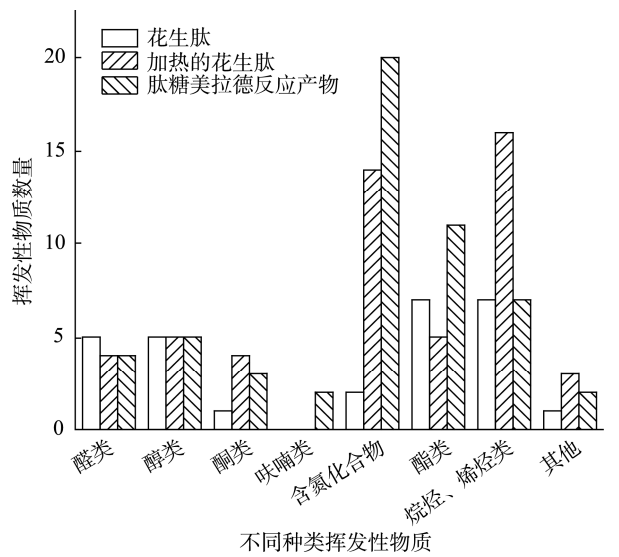


图 9 美拉德反应前后挥发性物质种类及数量变化
Fig.9 Changes in the types and quantities of volatile substances before and after the Maillard reaction

表 2 挥发性风味物质成分和含量分析
Table 2 Analysis of the composition and content of volatile flavor substances

种类	序号	化合物名称	含量/(μg/g)		
			花生肽	加热的花生肽	肽糖美拉德反应产物
醇	1	1-十一醇	1.83±1.78	5.37±0.19	5.40±0.48
	2	2-甲基-3-庚醇	0.1±0	0.12±0.02	ND
	3	芳樟醇	0.08±0.02	ND	ND
	4	异辛醇	1.74±0.12	2.89±0.73	2.79±0.02
	5	正己醇	4.19±0.46	6.62±1.43	1.20±0.31
	6	正辛醇	ND	0.48±0	ND
	7	2-乙基-2-甲基-十三烷醇	ND	ND	0.11±0
	8	苊基醇	ND	ND	1.9±0.3
醛	小计		7.94	15.48	11.40
	1	苯乙醛	0.15±0.02	7.29±0.27	14.76±1.16
	2	反式 2-壬醛	0.10±0.01	ND	ND
	3	癸醛	0.13±0	0.23±0.02	ND
	4	壬醛	1.72±0.05	2.57±0.85	1.07±0.08
	5	正庚醛	0.04±0	ND	ND
	6	甲基异戊二烯醛酸	ND	0.18±0.07	ND
	7	3-甲硫基丙醛	ND	ND	0.13±0.02
酮	8	5-甲基-2-苯基-2-己烯醛	ND	ND	0.59±0.08
	小计		2.14	10.27	16.55
	1	苯乙酮	0.38±0.03	0.19±0.15	0.68±0.06
	2	2-庚酮	ND	1.1±0.5	ND
	3	2-癸酮	ND	0.48±0.11	ND
	4	仲辛酮	ND	0.45±0.12	ND
	5	菊苣酮	ND	ND	1.83±0.45
	6	2,6-二甲基-3-庚酮	ND	ND	0.36±0.04
其他	小计		0.38	2.20	2.87

表 2(续)

种类	序号	化合物名称	含量/(μg/g)		
			花生肽	加热的花生肽	肽糖美拉德反应产物
酯	1	2-羟基异丁酸乙酯	0.17±0	ND	ND
	2	2-乙基己酸-2-乙基己基酯	0.55±0	ND	0.62±0.03
	3	2-乙基己酸乙酯	0.1±0.01	0.25±0.01	0.57±0.03
	4	2-乙基己酯戊酸	0.46±0.01	ND	1.10±0.08
	5	己二酸二乙基己基酯	1.7±0	2.92±0.02	3.94±0.43
	6	戊二酸二甲酯	0.09±0.01	ND	ND
	7	棕榈酸甲酯	0.44±0.07	11.18±1.13	25.58±4.71
	8	十四酸甲酯	ND	4.63±0.04	0.33±0
	9	月桂酸甲酯	ND	3.23±0.09	ND
	10	4-辛酯环己烷羧酸	ND	ND	0.14±0.03
	11	丁基辛-3-酯邻苯二甲酸	ND	ND	0.19±0
	12	己二酸二甲酯	ND	ND	0.7±0.12
	13	硬脂酸甲酯	ND	ND	2.03±0.34
	14	12-甲基-十三烷酸甲酯	ND	ND	0.49±0
酚	小计		3.51	22.21	35.69
	1	对乙基苯酚	0.22±0.01	0.21±0.04	ND
	2	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	ND	0.14±0.02	0.57±0.03
含氮化合物 (吡嗪类、吡 啶、吡咯)	小计		0.22	0.35	0.57
	1	四甲基吡嗪	2.14±0.09	4.72±0.53	1.69±0.04
	2	2,3,5-三甲基-6-乙基吡嗪	0.32±0.01	0.55±0.03	ND
	3	2,5-二甲基-3-(2-丙烯基)-吡嗪	ND	0.43±0.01	ND
	4	2,5-二甲基-3-(2-甲基丁基)吡嗪	ND	0.25±0	2.94±0
	5	2,5-二甲基-3-(3-甲基丁基)-吡嗪	ND	3.28±0.63	18.8±2.77
	6	2,5-二甲基-3-(2-甲基丙基)-吡嗪	ND	1.03±0	4.00±0.41
	7	2,5-二甲基吡嗪	ND	13.05±4.01	14.48±1.22
	8	2-甲基-3,5-二乙基吡嗪	ND	0.62±0.07	0.38±0.02
	9	2-乙基-5-甲基吡嗪	ND	10.92±1.67	0.39±0
	10	2-乙基-6-甲基吡嗪	ND	0.31±0.04	ND
	11	2-乙烯基-5-甲基吡嗪	ND	0.23±0.02	ND
	12	2-乙烯基-6-甲基吡嗪	ND	0.59±0.08	0.5±0.08
	13	2-异戊基-6-甲基吡嗪	ND	ND	0.96±0.03
	14	3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪	ND	10.86±1.17	9.32±5.45
	15	顺-2,5-二甲基-3-(1-丙烯基)-吡嗪	ND	ND	0.25±0.01
	16	顺-2-甲基-5-(1-丙烯基)-吡嗪	ND	ND	0.18±0
	17	顺-2-甲基-6-(1-丙烯基)-吡嗪	ND	ND	3.78±0.56
	18	2,3,5-三甲基吡嗪	ND	ND	7.86±0.53
	19	2-丁基-3,5-二甲基吡嗪	ND	ND	0.24±0
	20	2-丁基-3-甲基吡嗪	ND	ND	0.34±0.23
	21	2-甲基-5-丙基-吡嗪	ND	ND	0.70±0
	22	2-乙基-3,5,6-三甲基吡嗪	ND	ND	0.39±0.03
	23	7-甲基-吡啶并(2,3-a)吡啶	ND	ND	0.99±0.07
	24	3-甲基-4-苯基-1H-吡咯	ND	1.04±0.04	0.45±0.05
	小计		2.46	47.88	68.64

表 2(续)

种类	序号	化合物名称	含量/(μg/g)		
			花生肽	加热的花生肽	肽糖美拉德反应产物
呋喃	1	3-苯基呋喃	ND	ND	0.30±0.04
	2	2,3-二氢苯并呋喃	ND	ND	0.94±0
	小计		0.00	0.00	1.24
烯	1	7-氰基环庚三烯	ND	ND	2.00±0
	2	苯基乙烯醚	ND	ND	0.9±0
	小计		0.00	0.00	2.9
酸	1	2-羟基异丁酸	ND	0.26±0.05	ND
	2	异辛酸	ND	ND	0.41±0
	小计		0.00	0.26	0.41
烷烃	1	2,6,10,14-四甲基庚烷	0.21±0.09	0.27±0	ND
	2	2,6,11-三甲基十二烷	0.13±0.04	0.59±0	0.35±0
	3	2,7,10 三甲基十二烷	0.11±0	0.46±0.21	0.3±0
	4	3-甲基十六烷	0.1±0	0.2±0.02	ND
	5	5-丙基癸烷	0.25±0	0.53±0.02	ND
	6	十四烷	0.07±0.02	0.4±0	0.30±0
	7	正十五烷	0.23±0.05	0.1±0	0.39±0
	8	2-甲基-二十烷	ND	0.32±0	ND
	9	2-甲基-十八烷	ND	0.23±0	ND
	10	2-甲基十三烷	ND	0.39±0	ND
	11	3-甲基-5-丙基壬烷	ND	0.53±0	ND
	12	4-甲基十四烷	ND	0.25±0.09	ND
	13	4-乙基十一烷	ND	0.20±0	ND
	14	5-甲基十五烷	ND	0.24±0	ND
	15	6-甲基-十五烷	ND	0.28±0	ND
	16	正十六烷	ND	0.50±0	ND
	17	2-甲基癸烷	ND	ND	0.24±0
	小计		1.1	5.49	1.58
	总计		17.75	104.14	141.85

注: ND 表示未检出。

参考文献

[1] CHEN L, CHEN J, YU L, *et al.* Emulsification performance and interfacial properties of enzymically hydrolyzed peanut protein isolate pretreated by extrusion cooking [J]. Food Hydro, 2018, 77: 607–616.

[2] TU J, WU W. Critical functional properties of defatted peanut meal produced by aqueous extraction and conventional methods [J]. J Food Sci Technol, 2019, 56(10): 4722–4731.

[3] 吕伟超. 多黏类芽孢杆菌液态发酵花生粕及其特性研究[D]. 南昌: 江西理工大学, 2020.

LV WC. Research on liquid fermented peanut meal and its characteristics of *Paenibacillus polymyxa* [D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2020.

[4] ZEEB B, MCCLEMENTS DJ, WEISS J. Enzyme-based strategies for structuring foods for improved functionality [J]. Annual Revf Food Sci Technol, 2017, 8: 21–34.

[5] 邝敏杰, 焦婷婷, 孙艳. 花生活性肽的制备及其生物活性的研究进展 [J]. 粮食加工, 2021, 46(2): 57–60.

KUANG MJ, JIAO TT, SUN Y. Research progress on the preparation and biological activity of peanut active peptides [J]. Food Proc, 2021, 46(2):

57–60.

[6] JI N, SUN C, ZHAO Y, *et al.* Purification and identification of antioxidant peptides from peanut protein isolate hydrolysates using UHR-Q-TOF mass spectrometer [J]. Food Chem, 2014, 161: 148–154.

[7] 孙晓静, 张丽霞, 魏松丽. 响应面设计优化复合酶法制备花生呈味肽及风味分析[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 147–154.

SUN XJ, ZHANG LX, WEI SL. Response surface design optimization of complex enzymatic preparation of peanut flavor peptides and flavor analysis [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(8): 147–154.

[8] SU G, REN J, YANG B, *et al.* Composition of hydrolysis characteristics on defatted peanut meal protein between a protease extract from *aspergillus oryzae* and commercial proteases [J]. Food Chem, 2011, 126: 1306–1311.

[9] SÁNCHEZ-RESÉNDIZ A, RODRÍGUEZ-BARRIENTOS S, RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ J, *et al.* Phosphoesterification of soybean and peanut proteins with sodium trimetaphosphate (STMP): Changes in structure to improve functionality for food applications [J]. Food Chem, 2018, 260(15): 299–305.

[10] STAROWICZ M, ZIELIŃSKI H. How maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? [J]. Food

- Rev Int, 2019, 35(8): 707–725.
- [11] TEODOROWICZ M, VAN NEERVEN J, SAVELKOUL H. Food processing: The influence of the maillard reaction on immunogenicity and allergenicity of food proteins [J]. *Nutrients*, 2017, 9(8): 835.
- [12] BU Y, HE W, ZHU L, *et al.* Effects of different wall materials on stability and umami release of microcapsules of Maillard reaction products derived from alolididae aloidi [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2021, 56(12): 6484–6496.
- [13] 李皖光, 汪桃花, 王新文. 4 种大米蛋白水解度测定方法比较[J]. *粮食科技与经济*, 2017, 42(5): 35–37.
- LI WG, WANG TH, WANG XW. Comparison of four methods for measuring protein hydrolysis degree of rice [J]. *Food Sci Technol Econ*, 2017, 42(5): 35–37.
- [14] PAGÁN J, IBARZ A, FALGUERA V, *et al.* Enzymatic hydrolysis kinetics and nitrogen recovery in the protein hydrolysate production from pig bones [J]. *J Food Eng*, 2013, 119: 655–659.
- [15] XU J, HAN D, CHEN Z, *et al.* Effect of glucose glycosylation following limited enzymatic hydrolysis on functional and conformational properties of black bean protein isolate [J]. *Eur Food Res Technol*, 2018, 244(6): 1111–1120.
- [16] 张瑶. 不同糖化方法对提高大豆分离蛋白功能性质的对比研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- ZHANG Y. Comparative study on improving the functional properties of soybean protein isolate by different saccharification methods [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [17] 袁桥娜, 涂梦婕, 董志文. 不同制备工艺菜籽油的风味成分比较研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(8): 32–38.
- YUAN QN, TU MJ, DONG ZW. Comparative study on flavor components of rapeseed oil with different preparation techniques [J]. *China Oils Fats*, 2020, 45(8): 32–38.
- [18] YU XY, ZHAO MY, HU J, *et al.* Correspondence analysis of antioxidant activity and UV-Vis absorbance of maillard reaction products as related to reactants [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2012, 46: 1–9.
- [19] ZHAO D, SHENG B, WU Y, *et al.* Comparison of free and bound advanced glycation end products in food: A review on the possible influence on human health [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(51): 14007–14018.
- [20] 曹衡. 牡丹籽粕酶解及其美拉德反应产物风味和安全性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- CAO H. Study on the flavor and safety of enzymatic hydrolysis of peony seed meal and its maillard reaction products [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [21] 严方. 豌豆蛋白美拉德肽制备及其呈味特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- YAN F. Preparation of pea protein maillard peptide and study on its flavor properties [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [22] 吴爽, 王涵, 王展. 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*, 2022. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220509.1242.002.html>
- WU S, WANG H, WANG Z. Maillard reaction of rice bran polysaccharide-whey protein isolate and its product characterization [J]. *Food Sci*, 2022. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220509.1242.002.html>
- [23] 刘伟. 超声波处理对河蚌肉酶解物美拉德反应的影响及其微囊化调味料制备[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- LIU W. Effect of ultrasonic treatment on maillard reaction of mussel meat enzymatic hydrolysate and preparation of microencapsulated seasoning [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [24] ZHANG ZH, ZENG XA, BRENNAN CS, *et al.* Preparation and characterisation of novelty food preservatives by maillard reaction between ϵ -polylysine and reducing sugars [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2019, 54(5): 1824–1835.
- [25] 刘翔. 山茶籽粕酶解及其美拉德反应产物风味和安全性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- LIU X. Study on flavor and safety of camellia seed meal enzymatic hydrolysis and its maillard reaction products [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [26] 罗伟. 贻贝煮汁的酶解及其调味基料的制备技术研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.
- LUO W. Study on the enzymatic hydrolysis of mussel boiled juice and its preparation technology of seasoning base [D]. Haikou: Hainan University, 2015.
- [27] NOBIS A, KWASNICKI M, LEHNHARDT F, *et al.* A comprehensive evaluation of flavor instability of beer (Part 2): The influence of de novo formation of aging aldehydes [J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2668.
- [28] 刘培基. 香菇柄酶解液美拉德反应引起的风味及抗氧化性变化的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- LIU PJ. Flavor and antioxidant changes of mushroom stem enzymatic hydrolysate caused by maillard reaction [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [29] ZOU T, LIU J, SONG H, *et al.* Discovery of amadori-type conjugates in a peptide maillard reaction and their corresponding influence on the formation of pyrazines [J]. *J Food Sci*, 2018, 83(6): 1588–1595.
- [30] 康乐, 宋焕禄. pH 值对牛肉酶解物美拉德产物风味特性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 25–32.
- KANG L, SONG HL. Effects of pH value on flavor properties of maillard products from beef enzymolysate [J]. *Food Sci*, 2017, 38(11): 25–32.
- [31] CHEN K, YANG Q, HONG H, *et al.* Physicochemical and functional properties of maillard reaction products derived from cod (*Gadus morhua* L.) skin collagen peptides and xylose [J]. *Food Chemistry*, 2020, 333: 127489.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



于 珍, 硕士研究生, 主要研究方向为蛋白质化学与应用。
E-mail: 320809449@qq.com



布冠好, 博士, 教授, 主要研究方向为蛋白质化学与应用。
E-mail: buguanhao2008@126.com