

美拉德反应对芝麻多肽抗氧化活性的影响

Study on the effect of Maillard reaction on antioxidant activity of sesame polypeptides

钱森和^{1,2} 王 洲^{1,2} 魏 明^{1,2} 薛正莲^{1,2}

QIAN Sen-he^{1,2} WANG Zhou^{1,2} WEI Ming^{1,2} XUE Zheng-lian^{1,2}

(1. 安徽工程大学生物与化学工程学院, 安徽 芜湖 241000;

2. 安徽工程大学微生物制药产业共性研究院, 安徽 芜湖 241000)

(1. Department of Biochemistry, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China; 2. Research Institute of Microbial Pharmaceutical Industry, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

摘要:在制备芝麻多肽的基础上,研究美拉德反应对芝麻多肽抗氧化活性的影响。结果表明,芝麻多肽美拉德反应的适宜肽糖比为 1:2(质量比);美拉德反应能够显著提高芝麻多肽的抗氧化活性,其还原力、ABTS⁺ 自由基清除率、DPPH 自由基清除率和羟自由基清除率分别提高了 121.4%, 304.5%, 81.2%, 103.2%。美拉德反应降低了芝麻多肽中赖氨酸、甲硫氨酸和酪氨酸含量,增加了丙氨酸、缬氨酸含量,且生成了天冬氨酸、谷氨酸、半胱氨酸和甘氨酸。褐变程度和接枝度均随美拉德反应时间的延长而增加,在反应 4 h 时,其褐变程度和接枝度分别为 1.42%, 26.4%。美拉德反应产物在 210, 260 nm 处具有吸收峰,且吸收峰强度随着反应时间的延长逐渐增强,这与反应产物中肽键发生了改变和类黑精含量增加有关。可见,美拉德反应对芝麻多肽的抗氧化活性具有一定的影响。

关键词:美拉德反应;芝麻;多肽;抗氧化活性

Abstract: Based on the preparation of sesame peptides, the effect of Maillard reaction on antioxidant activity of sesame polypeptides was studied. The results showed that the suitable ratio of peptide to sugar was 1:2 for Maillard reaction of sesame polypeptide. The Maillard reaction could significantly improve the antioxidant activity of sesame polypeptide, and the reducing power, ABTS⁺ radical scavenging rate, DPPH radical scavenging rate and hydroxyl radical scavenging rate were increased by 121.4%, 304.5%, 81.2% and 103.2%, respectively. The contents of lysine methionine and tyrosine were reduced, but the contents of alanine and valine were increased, moreo-

ver, aspartic acid, glutamic acid, cysteine and glycine were produced by Maillard reaction of sesame peptides. Browning degree and graft degree increased with the prolongation of Maillard reaction time. When the reaction was carried out for 4 hours, the browning degree and graft degree were 1.42% and 26.4% respectively. The Maillard reaction products have absorption peaks at 210 nm and 260 nm, and with the increase of reaction time, the absorption peak intensity was increased gradually. It was related to the change of peptide bond and the increase of melanoidin content in the Maillard reaction products. Therefore, the Maillard reaction had a certain effect on the antioxidant activity of sesame peptides.

Keywords: Maillard reaction; sesame; polypeptide; antioxidant activity

芝麻多肽是芝麻蛋白经水解后得到的有生物活性的混合小肽,与蛋白质相比,这些小肽易于被人体吸收利用,且具有抗氧化、抗菌、降血压、调节免疫等生理活性,其中抗氧化作用是其重要的一种生理活性^[1-2]。研究^[3]表明,芝麻多肽具有清除机体自由基、抑制脂质过氧化以及提高抗氧化酶活性的能力,还能够降低小鼠血清和肝脏中丙二醛含量,提高肝脏中超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性。

美拉德反应是羰基化合物与氨基化合物之间发生的一种复杂反应。美拉德反应对提高蛋白质功能性质以及食品品质方面具有重要作用,通过美拉德反应可以提高蛋白质的溶解性、乳化性、热稳定性以及胶体稳定性^[4];改变食品色泽、风味以及营养价值^[5]。研究^[6]表明,美拉德反应产物中含有类黑精、还原酮以及挥发性杂环化合物,这些物质具有一定的抗氧化性能。

目前采用美拉德反应修饰生物活性肽的研究较多,例如:陈贵堂等^[7]制备的灰树花多肽美拉德反应产物的还原力和 DPPH 自由基清除能力与等质量浓度的抗坏血酸相当;赵

基金项目:安徽省高校自然科学基金提升计划(编号:TSKJ2017B17);安徽工程大学微生物制药产业共性研究院开放课题(编号:ZYJY201502)

作者简介:钱森和(1978—),男,安徽工程大学副教授,博士。

E-mail:qiansenhe@163.com

收稿日期:2018-03-26

谋明等^[8]以草鱼肽和木糖制备的美拉德反应产物的褐变程度更高、抗氧化活性更强,且随时间的延长抗氧化活性逐渐增强。然而,美拉德反应用于改善芝麻多肽抗氧化活性的研究还未见报道。本研究在制备芝麻多肽的基础上,筛选芝麻多肽美拉德反应的适宜还原性糖及其肽糖比,研究美拉德反应对芝麻多肽抗氧化活性的影响,以期提高芝麻多肽抗氧化活性;并进一步分析芝麻多肽美拉德反应过程中氨基酸组成及含量、褐变程度、接枝度以及紫外吸收光谱的变化,探讨芝麻多肽美拉德反应产物抗氧化的机理,为食品中天然抗氧化剂的开发提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

葡萄糖、木糖、乳糖、十二烷基磺酸钠、 β -巯基乙醇、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、过硫酸钾、乙酸钠、三氯化铁、双氧水:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

碱性水解酶、三氯乙酸、铁氰化钾、DPPH、ABTS、邻二氮菲等:分析纯,上海青析化工有限公司;

邻苯二甲醛、甲醇、乙腈:色谱纯,美国 Agilent Technologies 公司;

芝麻粕:安徽华安食品有限公司;

分析天平:FC-104 型,上海精密科学仪器有限公司;

微型高速粉碎机:FW100 型,天津泰斯特仪器有限公司;

恒温水浴锅:HH-6 型,江苏金坛市亿通电子有限公司;

离心机:TGL-16 型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

高校液相色谱仪:LC-20A 型,日本岛津公司;

紫外-可见分光光度计:TU-1800 型,北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 试验方法

1.2.1 芝麻多肽的制备 称取 50 g 芝麻粕,粉碎后过 60 目筛,用 0.1 mol/L NaOH 溶液在 40 °C 恒温水浴搅拌提取 1 h,离心(8 000 r/min,10 min)后,取上清液(芝麻蛋白液),在碱性蛋白酶(1.0×10^5 U/g)与芝麻蛋白液(10%)的 E/S 为 2%、pH 8.0、酶解温度 40 °C 条件下酶解 3 h,反应结束后沸水浴灭酶 20 min,冷却后离心(8 000 r/min,10 min),上清液冷冻干燥后于 -20 °C 保存备用。

1.2.2 氨基酸含量测定 取 1 mL 多肽溶液,加入 2 mL 三氯乙酸沉淀蛋白后离心(12 000 r/min,10 min),经 0.22 μ m 膜过滤后采用 HPLC 法进行氨基酸含量的测定。色谱柱:Thermo Hypersil ODS C₁₈ (5 μ m,4.6 mm \times 250 mm);柱温 40 °C;流动相,水相 A:无水醋酸钠 3.06 g,先溶于 800 mL 水,然后加三乙胺 200 μ L,四氢呋喃 5 mL,ddH₂O 定容至 1 L,醋酸调节 pH 至 7.2,有机相 B:无水醋酸钠 3.06 g,ddH₂O 定容至 200 mL,醋酸调节 pH 至 7.2,然后加入 400 mL 甲醇和 400 mL 乙腈;流速 1 mL/min。采用 OPA 试剂进行在线柱前衍生。

1.2.3 芝麻多肽美拉德反应还原糖种类及肽糖比的确定

用蒸馏水将芝麻多肽配置成质量浓度为 5% 的溶液,分

别称取一定量的葡萄糖、乳糖和木糖,加到芝麻多肽溶液中,使肽糖的质量比分别为 2:1,1:1,1:2,1:3。待完全溶解后用 1 mol/L NaOH 溶液调 pH 值至 8.0,置于 95 °C 水浴 2 h,反应后迅速冷却,得到芝麻多肽美拉德反应产物,并置于 -20 °C 保存备用。

1.2.4 芝麻多肽美拉德反应产物的制备 在选取适宜的还原糖和肽糖比的基础上制备芝麻多肽美拉德反应产物。反应条件同 1.2.3,反应时间分别为 1,2,3,4 h。

1.2.5 抗氧活性测定

(1) 还原力的测定:根据文献[9]方法略作修改,取多肽溶液及其美拉德反应产物各 0.5 mL 于试管中,加入 0.2 mol/L 的磷酸盐缓冲液(pH 6.6)2.5 mL 和 1.0% 铁氰化钾溶液 2.5 mL,混匀,于 50 °C 保温 20 min 后置于冰浴中,并加入 10% 的三氯乙酸溶液 2.5 mL,混合后于 3 000 r/min 离心 10 min。取上清液 2.5 mL,加入蒸馏水 2 mL 和 0.1% 三氯化铁溶液 0.5 mL,振荡均匀后静置 10 min,测定其在 700 nm 处的吸光值(A_{700})。

(2) ABTS⁺ 自由基清除率测定:根据文献[10]方法略作修改,取 7.4 mmol/L ABTS 溶液 2 mL 与 2.6 mmol/L 过硫酸钾溶液 2 mL,混合后室温避光放置 16 h,用 pH 4.5 的 20 mmol/L 乙酸钠缓冲溶液稀释混合液,使其在 734 nm 处的吸光值(A_{734})达到 0.7 ± 0.02 ,取 2.0 mL 稀释过的溶液与 1 mL 多肽液混合,静置 6 min 后测定 A_{734} 值。

$$E_A = \frac{A_0 - A_S}{A_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

E_A ——ABTS⁺ 自由基清除率,%;

A_0 ——加入去离子水的吸光值;

A_S ——加入样品的吸光值。

(3) DPPH 自由基清除率的测定:根据文献[11]方法略作修改,取 1 mL 样品与 4 mL 0.02 mmol/L DPPH-无水乙醇溶液混合,混匀后在室温避光放置 30 min,混合液于 3 000 r/min 离心 5 min,取上清液,测定 517 nm 处的吸光值(A_{517}),用体积比 1:1 的无水乙醇与水混合液作为参比。

$$E_D = \frac{1 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

E_D ——DPPH 自由基清除率,%;

A_0 ——空白对照(DPPH+乙醇)的吸光值;

A_1 ——加入样品时 DPPH(样品+DPPH-无水乙醇)的吸光值;

A_2 ——样品(样品+乙醇)的吸光值。

(4) 羟自由基清除率测定:根据文献[12]方法略作修改,取 7.5 mmol/L FeSO₄ 溶液 0.2 mL,7.5 mmol/L 邻二氮菲溶液 0.2 mL,样品溶液 0.4 mL,pH 7.4 PBS 的溶液 2.0 mL,蒸馏水 0.8 mL 以及 1.0% H₂O₂ 0.4 mL 于试管中,混匀后置于 37 °C 恒温水浴 60 min,测定其在 536 nm 处的吸光值。

$$E_{OH} = \frac{A_2 - A_0}{A_1 - A_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

E_{OH} ——羟自由基的清除率, %;

A_0 ——以蒸馏水代替样品测得的吸光值;

A_1 ——以蒸馏水分别代替样品和 H_2O_2 测得的吸光值;

A_2 ——样品的吸光值。

1.2.6 褐变程度和接枝度的测定

(1) 褐变程度测定: 根据文献[13]方法略作修改, 以蒸馏水作为参比, 在 420 nm 处测定芝麻多肽美拉德反应产物的吸光值作为褐变程度。

(2) 接枝度测定: 根据文献[14]方法略作修改, 取 200 μ L 质量浓度为 2 mg/mL 的芝麻多肽美拉德反应产物, 加入邻苯二甲醛溶液 4 mL, 混匀后置于 35 $^{\circ}$ C 条件下水浴 2 min, 测定其在 340 nm 的吸光值。空白对照组为 4.0 mL 邻苯二甲醛+200 μ L 蒸馏水。

$$DG = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

DG——接枝度, %;

A_t ——芝麻多肽美拉德反应产物在 340 nm 的吸光值;

A_0 ——芝麻多肽溶液在相同反应条件下在 340 nm 的吸光值。

1.2.7 紫外光谱分析 用 0.01 mol/L pH 7.0 磷酸盐缓冲液将芝麻多肽美拉德反应产物稀释至质量浓度为 1 mg/mL, 采用紫外-可见分光光度计全波长扫描。

1.3 数据处理、作图及统计分析

采用 Excel 2010 软件进行数据整理和做图, 用 SAS 9.1 统计分析软件进行差异显著性分析, 每个试验 3 次重复。

2 结果与分析

2.1 还原糖种类及肽糖比的确定

选取葡萄糖、乳糖和木糖 3 种代表性还原性糖与不同比例的芝麻多肽进行美拉德反应, 研究糖的种类及肽糖比对美拉德反应产物还原力的影响, 结果见图 1。由图 1 可知, 木糖与芝麻多肽发生美拉德反应后产物的还原力最高, 而乳糖最低; 可能是木糖为五碳糖单糖, 其碳链短于葡萄糖, 空间位阻

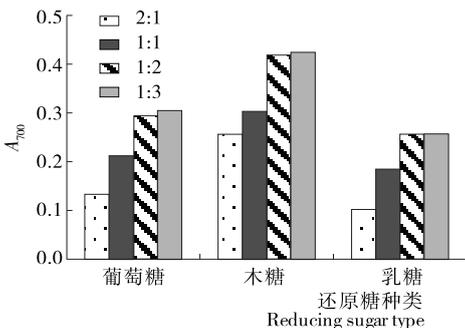


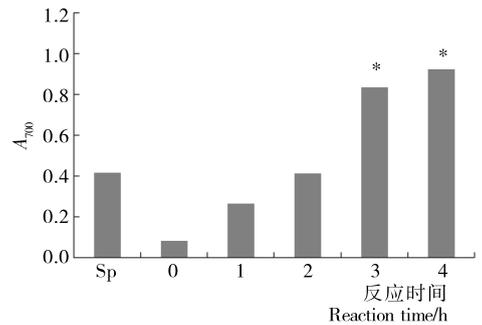
图 1 还原糖种类及肽糖比例对芝麻多肽美拉德反应产物还原力的影响

Figure 1 Effect of reducing sugar types and peptide sugar ratios on reducing force of mallard reaction products of sesame polypeptide

小, 更易于多肽发生美拉德反应; 乳糖为还原性双糖, 其分子量较还原性单糖的分子量大, 从而导致反应速度较还原性单糖慢^[15]。另外, 随着肽糖比例的增加, 反应产物的还原力逐渐增加, 当肽糖质量比 $< 1:2$ 时, 其还原力增加不明显。因此, 选取木糖与芝麻多肽 1:2 的质量比进行后续的试验。

2.2 美拉德反应对芝麻多肽铁氰化钾还原力的影响

芝麻多肽及其美拉德反应产物的铁氰化钾还原力见图 2。由图 2 可知, 芝麻多肽美拉德反应产物的还原力随着反应时间的延长明显增大, 在反应前 2 h 内, 反应产物的还原力低于芝麻多肽; 但在反应 3~4 h 时, 还原力分别为 0.83, 0.92, 显著高于芝麻多肽的还原力 ($P > 0.05$)。这与 Jiang 等^[16]研究水溶性牛酪肽美拉德产物的还原力随反应时间延长而增加的结果相一致。



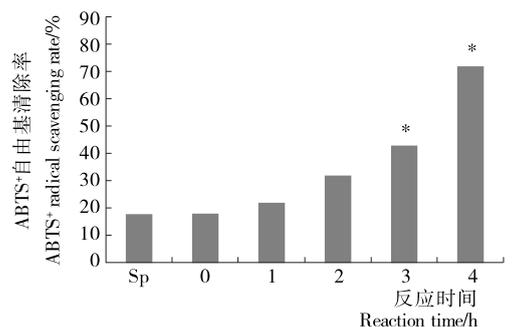
Sp 表示芝麻多肽; * 表示与 Sp 比较, 差异在 0.05 水平上显著

图 2 美拉德反应对芝麻多肽还原力的影响

Figure 2 Effect of mallard reaction on the reducing power of sesame polypeptides

2.3 美拉德反应对芝麻多肽 ABTS⁺ 自由基清除能力的影响

图 3 为芝麻多肽及其美拉德反应产物的 ABTS⁺ 自由基清除率。由图 3 可知, 美拉德反应能够显著提高芝麻多肽 ABTS⁺ 自由基的清除能力, 且反应产物的 ABTS⁺ 自由基清除率随着反应时间的延长而逐渐增加, 当反应时间为 3, 4 h 时, 自由基清除率分别为 43%, 72%, 显著高于芝麻多肽的清除率 ($P > 0.05$)。Zeng 等^[17]研究也表明, 美拉德反应产物具有 ABTS⁺ 自由基清除活性, 且清除活性随反应时间的延长而增加。

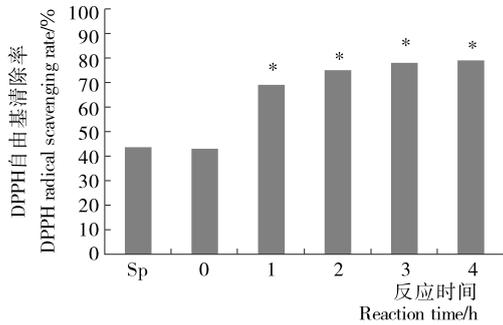


Sp 表示芝麻多肽; * 表示与 Sp 比较, 差异在 0.05 水平上显著

图 3 美拉德反应对芝麻多肽 ABTS⁺ 自由基清除率的影响
Figure 3 Effect of mallard reaction on the ABTS⁺ free radical scavenging rate of sesame polypeptides

2.4 美拉德反应对芝麻多肽 DPPH 自由基清除能力的影响

图 4 为美拉德反应对芝麻多肽 DPPH 自由基清除率的影响。由图 4 可知,美拉德反应能够显著提高芝麻多肽 DPPH 自由基的清除率,当芝麻多肽美拉德反应 1~4 h 时,产物的 DPPH 自由基清除率显著高于芝麻多肽的 ($P > 0.05$)。



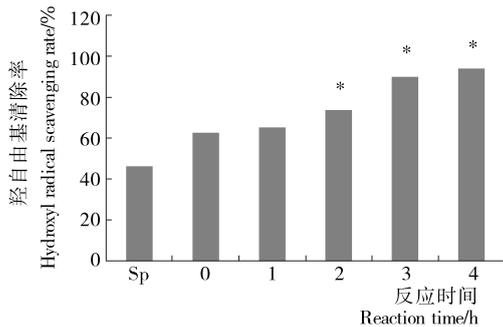
Sp 表示芝麻多肽; * 表示与 Sp 比较,差异在 0.05 水平上显著

图 4 美拉德反应对芝麻多肽 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 4 Effect of mallard reaction on the DPPH free radical scavenging rate of sesame polypeptides

2.5 美拉德反应对芝麻多肽羟自由基清除能力的影响

美拉德反应对芝麻多肽羟自由基清除率的影响见图 5。由图 5 可知,在 1~3 h 内,芝麻多肽美拉德反应产物的羟自由基清除能力随着反应时间的延长而增强,但反应 3,4 h 自由清除率差异不明显。另外,在反应 2~4 h,产物的自由基清除率显著高于芝麻多肽的 ($P > 0.05$)。



Sp 表示芝麻多肽; * 表示与 Sp 比较,差异在 0.05 水平上显著

图 5 美拉德反应对芝麻多肽羟自由基清除率的影响

Figure 5 Effect of mallard reaction on the hydroxyl free radical scavenging rate of sesame polypeptides

2.6 美拉德反应对芝麻多肽游离氨基酸含量的影响

图 6 为美拉德反应(4 h)对芝麻多肽游离氨基酸组成与含量变化。由图 6 可以看出,芝麻多肽美拉德反应后,体系中游离氨基酸含量发生了变化,含量明显增加的氨基酸有丙氨酸、缬氨酸;含量明显减少的氨基酸有赖氨酸、甲硫氨酸、酪氨酸;其他氨基酸含量基本维持不变。另外,生成了天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、半胱氨酸,可能是加热使得部分小肽发生降解^[18]。其中生成的天冬氨酸和谷氨酸是酸性氨基酸,具有较强的抗氧化活性,另外,半胱氨酸的生成也能提高体系的抗氧化活性。

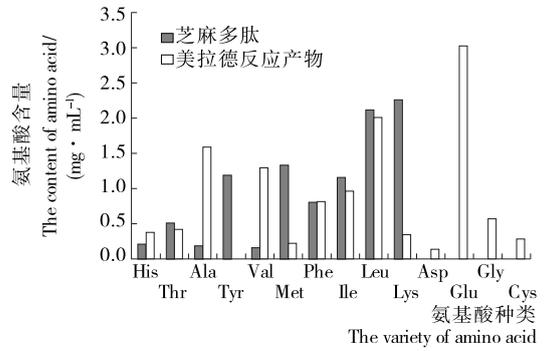


图 6 美拉德反应对芝麻多肽氨基酸组成和含量的影响

Figure 6 Effect of mallard reaction on the amino acid composition and contents of sesame polypeptides

2.7 美拉德反应的褐变程度及接枝度变化

美拉德反应褐变程度通常可以反映接枝反应的速率,褐变程度越强,表明接枝反应越快^[19]。芝麻多肽美拉德反应褐变度与接枝度变化见图 7、8。

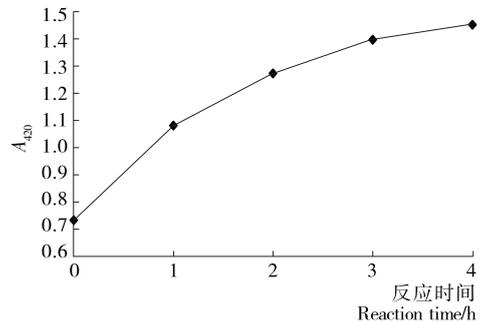


图 7 芝麻多肽美拉德反应褐变程度随时间的变化

Figure 7 Changes in browning degree of sesame peptide mallard reaction as a function of reaction times

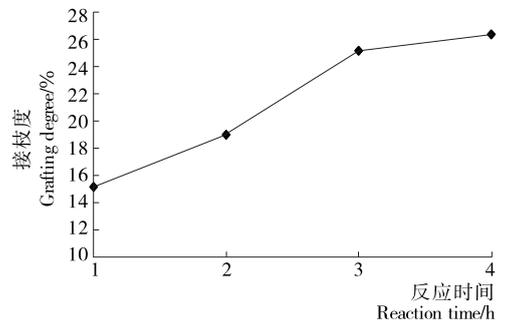


图 8 芝麻多肽美拉德反应接枝度随时间的变化

Figure 8 Changes in grafting degree of sesame peptide mallard reaction as a function of reaction times

由图 7 可知,芝麻多肽的褐变程度均随着反应时间的延长而逐渐增大,在反应 4 h 时,其 420 nm 处吸光值为 1.45。另外,随着反应的进行产物颜色也逐渐加深,表明生成的类黑精也越来越多,其抗氧化活性越来越强^[20]。

通过测定体系中自由氨基团含量变化,可以反映出美拉德反应的进程^[21]。从图 8 可以看出,芝麻多肽美拉德反应的接枝度也随时间延长而明显增大,在 4 h 时其接枝度为 26.4%。由此可知,芝麻多肽美拉德反应的接枝度变化与褐

变趋势基本相符,接枝度变化能够反映出褐变程度。

2.8 美拉德反应产物的紫外光谱

紫外光谱是美拉德反应产物结构表征与分析的重要手段,可以通过测定美拉德反应产物的紫外吸收峰来判断其结构的变化。由图 9 可以看出,芝麻多肽及其美拉德反应产物在 210 nm 左右具有较强的吸收峰,而这一吸收峰能够表征肽键的变化。随着反应时间的延长,美拉德反应产物吸收峰的最大值逐渐增大,与褐变程度和接枝度的变化相一致;且随着反应的进行,其光谱发生了红移现象,说明氨基酸基团周围微环境极性增强,疏水性减弱,使得多肽的结构变得更加松散^[22]。另外,在 260 nm 处也有一吸收峰,这一吸收峰正是类黑精的特征,且随着反应时间的延长,其吸收峰的最大值也逐渐增加,表明随着反应的进行生成的类黑精逐渐增多^[23]。

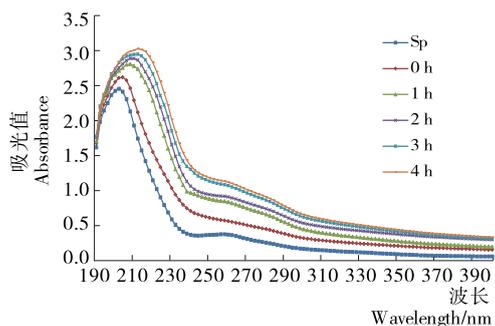


图 9 芝麻多肽及其美拉德产物的紫外光谱扫描

Figure 9 UV spectrum scanning of sesame polypeptide and its mallard products

3 结论

研究表明,芝麻多肽美拉德反应的适宜肽糖质量比为 1:2;美拉德反应能够提高芝麻多肽抗氧化活性,随着反应时间的延长,其还原力、ABTS⁺ 自由基清除能力、DPPH 自由基清除能力以及羟自由基清除能力逐渐增强。美拉德反应改变了芝麻多肽中游离氨基酸组成和含量,生成的酸性氨基酸具有一定的抗氧化活性。芝麻多肽美拉德反应的褐变程度和接枝度随着反应时间的延长而增大,其产物的颜色逐渐加深,表明生成的产物逐渐增多。紫外光谱扫描分析表明,芝麻美拉德反应能够改变芝麻多肽的肽键,随着反应的进行,特征峰的吸光值逐渐增多,表明生成的类黑精物质逐渐增多。美拉德反应是一个复杂的过程,影响其产物抗氧化活性的因素较多,在后期的工作中将进一步深入研究。

参考文献

[1] LÓPEZ-FANDIÑO R, OTTE J, CAMP J V. Physiological, chemical and technological aspects of milk-protein-derived peptides with antihypertensive and ACE-inhibitory activity[J]. *International Dairy Journal*, 2006, 16(11): 1 277-1 293.

[2] 彭惠惠, 李吕木, 钱坤, 等. 发酵芝麻粕中芝麻小肽的分离纯化及其体外抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2013, 34(9): 66-69.

[3] 李畅, 张莉, 陈文帮, 等. 发酵芝麻粕小肽体内抗氧化和免疫活

性[J]. *食品科学*, 2014, 35(19): 251-254.

[4] KIM D Y, SHIN W S. Functional improvements in bovine serum albumin-fucoidan conjugate through the Maillard reaction[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 974-981.

[5] JAEGER H, JANOSITZ A, KNORR D. The Maillard reaction and its control during food processing. The potential of emerging technologies[J]. *Pathologie Biologie*, 2010, 58(3): 207-213.

[6] DITTRICH R, DRAGONAS C, KANNENKERIL D, et al. A diet rich in Maillard reaction products protects LDL against copper induced oxidation ex vivo, a human intervention trial[J]. *Food Research International*, 2009, 42(9): 1 315-1 322.

[7] 陈贵堂, 周琼飞, 朱艳丽, 等. 采用美拉德反应提高灰树花多肽的抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2013, 34(14): 26-29.

[8] 赵谋明, 刘洋, 张佳男, 等. 木糖-草鱼肽美拉德反应产物的抗氧化性[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 279-286.

[9] MATMAROH K, BENJAKUL S, TANAKA M. Effect of reactant concentrations on the Maillard reaction in a fructose-glycine model system and the inhibition of black tiger shrimp polyphenoloxidase[J]. *Food Chemistry*, 2006, 98(1): 1-8.

[10] LI Xi-can, LIN Jing, GAO Yao-xiang, et al. Antioxidant activity and mechanism of *Rhizoma Cimicifugae*[J]. *Chemistry Central Journal*, 2012, 6(1): 1-10.

[11] AI S, TANABE S, NISHIMURA T. Antioxidant Activity of Peptides Obtained from Porcine Myofibrillar Proteins by Protease Treatment[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2003, 51(12): 3 661-3 667.

[12] CHEN Hua-ming, MURAMOTO K, YAMAUCHI F, et al. Antioxidative properties of histidine-containing peptides designed from peptide fragments found in the digests of a soybean protein[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 1998, 46(1): 49-53.

[13] CORZO-MARTÁ-NEZ M, MONTILLA A, MEGA-AS-PÁ © REZ R, et al. Impact of high-intensity ultrasound on the formation of lactulose and Maillard reaction glycoconjugates[J]. *Food Chemistry*, 2014, 157(8): 186-192.

[14] JIANG Zhan-mei, WANG Li-zhe, WU Wei, et al. Biological activities and physicochemical properties of Maillard reaction products in sugar-bovine casein peptide model systems[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(4): 3 837-3 845.

[15] WANG Wen-qiong, BAO Yi-hong, CHEN Ying. Characteristics and antioxidant activity of water-soluble Maillard reaction products from interactions in a whey protein isolate and sugars system[J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1/2/3/4): 355-361.

[16] JIANG Zhan-mei, WANG Li-zhe, CHE Hong-xia, et al. Effects of temperature and pH on angiotensin-I-converting enzyme inhibitory activity and physicochemical properties of bovine casein peptide in aqueous Maillard reaction system[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(1): 35-42.

[17] ZENG Yan, ZHANG Xiao-xi, GUAN Yu-ping, et al. Characteristics and antioxidant activity of Maillard reaction products from psicose-lysine and fructose-lysine model systems[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(3): C398-C403.

表4 二级评价指标的规范化区间数评价价值

Table 4 Normalized interval number evaluation value of secondary evaluation index

指标	区间值	指标	区间值	指标	区间值
I_{11}	(0.708,0.908]	I_{21}	(0.588,0.788]	I_{33}	(0.612,0.812]
I_{12}	(0.712,0.912]	I_{22}	(0.646,0.946]	I_{41}	(0.652,0.852]
I_{13}	(0.660,0.860]	I_{23}	(0.536,0.736]	I_{42}	(0.576,0.776]
I_{14}	(0.728,0.928]	I_{31}	(0.724,0.924]	I_{43}	(0.560,0.760]
I_{15}	(0.704,0.904]	I_{32}	(0.648,0.848]	I_{44}	(0.692,0.892]

以得到功能属性、安全属性、经济属性和环境属性4个一级评价指标的评价价值分别为(0.66,0.98],(0.58,0.92],(0.64,0.94],(0.59,0.88],将4个一级指标继续向上聚合,便可得到设计方案A的区间数评价价值为(0.61,0.97]。为了便于分析,取设计方案A区间数评价价值的中间值0.79,与优劣等级对比可知,设计方案A的评价结果为“较好”,即优劣等级为2级,但处于2级的上限接近于1级。同理可算得,4个一级评价指标的评价价值中间值分别为0.820,0.750,0.790,0.735,相对应的优劣评价等级分别为“好”“较好”“较好”“较好”。相比较而言,方案A的功能属性要好一些。采用同样的方法对设计方案B进行评价,可得方案B的评价价值为(0.54,0.82],中间值为0.68,虽然也为“较好”,但不如方案A。此评价结果与文献[10]得出的定性评价结论相一致,文献[10]的评价方法仅得出了设计方案的总体优劣等级,未能给出一级评价指标的优劣程度,从而验证了本文所提出的食品灌装机设计方案评价模型是合理有效的。

5 结论

食品灌装机设计方案评价是衡量设计方案优劣和优化设计方案的重要手段。针对食品灌装机设计方案评价具有的区间性、不确定性这一特点,将区间数理论和区间层次分析法相结合计算出了食品灌装机设计方案评价指标的区间数权重,克服了其它方法计算指标权重的不足。构建了基于区间层次分析法和隶属度的食品灌装机设计方案评价模型,

提出采用区间数优劣等级和隶属度相融合的方法对定性评价价值进行区间量化处理的方法。实例评价结果表明,本研究所用评价方案有效可行。本研究不足之处在于评价实例中用区间数评价价值的中间值对比方案优劣,虽然结论正确,但没有体现出区间数的特殊性,在今后的研究中将采用区间数的排序算法来衡量各方案的优劣。

参考文献

- [1] 张肖,李艳.基于TRIZ的印刷机械创新设计方案评价体系研究[D].北京:北京印刷学院,2012:20-33.
- [2] 王桂萍,贾亚洲,周广文.基于模糊可拓层次分析法的数控机床绿色度评价方法及应用[J].机械工程学报,2010,46(3):142-147.
- [3] 田启华,肖人彬.基于信息公理和模糊数学的设计方案评价方法[J].农业机械学报,2008,39(12):136-140.
- [4] 焦玉民,张琦,王强.基于模糊层次分析法的工程机械质量评价[J].中国工程机械学报,2010,8(4):489-494.
- [5] 宾光富,周元.基于Fuzzy-AHP的机械设备多特征参数健康状态综合评价研究[J].中国机械工程,2009,20(20):2487-2492.
- [6] 刘静,杨佳馨,管骁.贝叶斯网络在微生物定量风险评估中的应用[J].食品与机械,2016,32(10):215-220.
- [7] 张建辉,张丽,汪霞丽,等.白酒中两种邻苯二甲酸酯类膳食暴露风险评估[J].食品与机械,2017,33(1):45-47.
- [8] 黄己立,杨茂盛,欧剑.基于神经网络算法的公共建筑设计方案评价模型[J].统计与决策,2009(14):37-39.
- [9] 杨涛,杨育,张雪峰,等.基于客户聚类分析的产品概念设计方案评价决策方法[J].计算机集成制造系统,2015,21(7):1669-1678.
- [10] 任甲举,刘丹.基于改进模糊层次分析法的食品机械设计方案评价[J].机械设计与制造,2017(3):20-22.
- [11] 刘雅荣.基于区间层次分析法的机械加工工艺方案评价研究[J].机械设计与制造,2015(12):258-260.
- [12] 李春强.基于区间层次分析法的舰船动力系统方案评估研究[J].舰船科学技术,2016,38(13):124-127.
- [13] 徐泽水.不确定多属性决策方法及应用[M].北京:清华大学出版社,2004:101-104.
- [14] reaction products (MRPs) derived from fructose-lysine and ribose-lysine model systems[J]. Food Chemistry, 2013, 137(1/2/3/4): 92-98.
- [15] KUCHLYAN J, KUNDU N, BANIK D, et al. Spectroscopy and fluorescence lifetime imaging microscopy to probe the interaction of bovine serum albumin with graphene oxide[J]. Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids, 2015, 31(51): 13793-13801.
- [16] KIM J S, LEE Y S. Enolization and racemization reactions of glucose and fructose on heating with amino-acid enantiomers and the formation of melanoidins as a result of the Maillard reaction[J]. Amino Acids, 2008, 108(2): 582-592.

(上接第28页)

- [18] JIANG Zhan-mei, RAI D K, O'CONNOR P M, et al. Heat-induced Maillard reaction of the tripeptide IPP and ribose: Structural characterization and implication on bioactivity[J]. Food Research International, 2013, 50(1): 266-274.
- [19] 张严,汪何雅,钱和.美拉德反应产物的褐变、荧光吸收及抗氧化性的研究[J].食品工业科技,2012,33(6):193-196.
- [20] 卢彬,王忠合,王军,等.温度对金带细鲐鱼肉水解物美拉德反应及其产物抗氧化性的影响[J].食品与机械,2015,31(1):25-29.
- [21] VHANGANI L N, VAN W J. Antioxidant activity of Maillard