

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.05.036

# 美拉德反应对花生分离蛋白体外消化特性的影响

赵谋明, 刘 雷, 赵亚琦, 苏国万

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广州 510641)

**摘要:** 为了探讨花生蛋白饮料在热杀菌过程中的美拉德反应发生情况以及对后续模拟消化特性的影响, 本文在 80 °C、100 °C、121 °C 条件下分别对外加葡萄糖的花生分离蛋白湿热处理 30 min, 然后进行体外模拟消化, 并与同样处理条件但未加葡萄糖的样品进行比较, 分别检测了热处理后样品在 294 nm 和 420 nm 处的吸光值, 模拟消化产物的水解度、蛋白消化率、肽分子量分布和游离氨基酸组成。试验结果表明: 未加葡萄糖的样品热处理后也发生了褐变, 加入葡萄糖后褐变程度显著加深; 热处理及美拉德反应致使后续的模拟消化产物中分子量较大的肽段含量增加; 三个热处理条件中只有 121 °C 超高温热处理有利于消化产物水解度的提高, 而美拉德反应的发生总体上不利于花生分离蛋白的消化利用。

**关键词:** 美拉德反应; 花生分离蛋白; 模拟消化; 热处理

**中图分类号:** TS201.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2017)05-1101-06

## Effect of thermal treatment on the *in vivo* digestion characteristics and antioxidant activity of PPI-glucose

ZHAO Mou-Ming, LIU Lei, ZHAO Ya-Qi, SU Guo-Wan

(School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Thermal sterilization was widely adopted in peanut protein beverage processing, and may cause Maillard reaction (MR). This paper was designed to research the effect of thermal sterilization induced MR on the subsequent simulated gastrointestinal digestion. Peanut protein isolate (PPI) and glucose (1 : 1) were heat-treated in 80/100/121 °C for 30 min, then subjected to a simulated gastrointestinal digestion to evaluate the digestion characteristics. PPI without glucose, as a control group, was dealt in the same conditions. Absorbance in 294/420 nm of heat-treated samples and degree of hydrolysis (DH), protein digestibility (PD), molecular weight distribution, free amino acid composition of simulated gastrointestinal digestion products were measured. The experimental results showed that: compared to the control group, PPI heat-treated with glucose caused stronger MR. Heat treatment and MR led to an increase of larger molecular weight peptides content. Only heat-treated in 121 °C for 30 min had contributed to the DH increase of simulated gastrointestinal digestion products, and from a general view, MR gone against the digestive and utilizable performance of PPI.

**Keywords:** Maillard reaction; Peanut protein isolate; Simulated gastrointestinal digestion; Thermal treatment

收稿日期: 2016-08-30

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31301555); 教育部专项科研基金项目(20130172120022); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(SS2013AA100201)

作者简介: 赵谋明, 男, 湖南益阳人, 博士, 教授, 研究方向为食品生物技术与食品风味化学. E-mail: femmzhou@scut.edu.cn

通讯作者: 苏国万. E-mail: fegwsu@scut.edu.cn

## 1 引言

在食品加工、储存过程中常伴随有还原糖与氨基酸、蛋白质等含氮物质之间的非酶褐变反应,这一系列复杂链式反应被称为美拉德反应(Maillard reaction, MR)<sup>[1]</sup>. 近年来因为美拉德反应产物具有良好的抗氧化活性而成为研究热点<sup>[2]</sup>. 同时,发生美拉德反应后,食品营养品质的降低以及美拉德反应产物对人类健康的影响也备受关注<sup>[3, 4]</sup>.

花生蛋白饮料中不含胆固醇,有丰富的必需氨基酸、维生素和饱和脂肪酸,易被人体消化吸收,深受消费者喜欢. 有不少学者对花生蛋白饮料的生产工艺进行了研究,主要是采用花生仁打浆制备花生蛋白饮料<sup>[5, 6]</sup>,或者采用冷榨花生粕提取花生分离蛋白(peanut protein isolate, PPI)制备花生蛋白饮料<sup>[7]</sup>. 不同生产工艺中都会涉及煮浆、灭菌等热处理过程,在对这些热处理过程进行优化时主要关注的是饮料的口感及稳定性,而没有关注热处理过程中美拉德反应的发生情况以及对后续消化吸收的影响.

体外模拟胃肠道消化所用时间短、可大量重复,被广泛用来评价食品的营养<sup>[8]</sup>,但将模拟消化用于花生蛋白饮料的研究鲜见报道.

本文模拟了花生蛋白饮料的热杀菌过程,采用体外模拟胃肠消化的方法来探讨热处理后美拉德反应对花生蛋白饮料消化特性的影响,能为进一步研究和开发花生蛋白饮料提供科学依据.

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

2.1.1 冷榨花生粕 由广东汇香源生物科技股份有限公司提供,打粉过 100 目筛备用.

2.1.2 酶制剂 胃蛋白酶(酶活力 23800 U/g),购于广州杰顺生物科技有限公司. 胰酶(酶活力 35857 U/g),购于重庆祥胜生物科技有限公司. 其他化学试剂均为分析纯.

2.1.3 主要实验仪器 高速粉碎机,温岭市林大机械有限公司;CR22N 高速冷冻离心机,日本 HITACHI 公司;SHA-C 水浴恒温振荡器,江苏省金坛市农仪器厂;KDN-103F 自动定氮仪,上海纤检仪器有限公司;高压灭菌锅,上海申安医疗器械有限公司;UV-754 分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;PHS-3E pH 计,瑞士梅特勒-托利多集团;EL204/EL3002 电子天平,瑞士梅特勒-托利多

集团;Waters600 高效液相色谱仪,美国 Waters 公司;A300 全自动氨基酸分析仪,曼默博尔(德国)有限公司.

### 2.2 方法

#### 2.2.1 实验组设置

表 1 实验组及对照组

Tab. 1 Treatment and control groups

序号	底物	热处理条件	代号
1	PPI	不处理	对照组
2	PPI	80 °C, 30 min	P1
3	PPI	100 °C, 30 min	P2
4	PPI	121 °C, 30 min	P3
5	PPI+葡萄糖	不处理	PG
6	PPI+葡萄糖	80 °C, 30 min	PG1
7	PPI+葡萄糖	100 °C, 30 min	PG2
8	PPI+葡萄糖	121 °C, 30 min	PG3

取 PPI 冻干粉溶于去离子水中,制成质量浓度 2% 的溶液,加入葡萄糖(与 PPI 质量比 1 : 1)充分溶解,分别在 80 °C、100 °C、121 °C(水浴或高压灭菌锅)条件下热处理 30 min. 热处理后的样品进行分析检测或后续的模拟消化实验. 另有不加葡萄糖但采用相同处理条件的实验组.

2.2.2 花生分离蛋白的制备 花生分离蛋白的制备参照 Liu Y 等<sup>[9]</sup>的方法略有修改. 冷榨花生粕粉按 1 : 12(w/w)加去离子水,充分搅拌后用 1 mol/L NaOH 调节 pH 到 9.0,室温搅拌 2 h;然后在 4 °C 下 8000 r/min 离心 20 min,收集上清液,用 1 mol/L HCl 调节 pH 到 4.5;然后 4 °C 下 8000 r/min 离心 20 min,取沉淀用去离子水水洗至中性;冷冻干燥,储存于 4 °C 备用.

2.2.3 美拉德反应的测定 美拉德反应中间产物及终产物的积累会导致样品颜色变深,将样品 4 °C 下 8000 r/min 离心 20 min 后取上清液,用去离子水稀释至相同浓度,测其在 420 nm(蛋白浓度 4 mg/mL)及 294 nm(蛋白浓度 0.4 mg/mL)处的吸光值,以此来表示美拉德反应的程度<sup>[10]</sup>.

2.2.4 模拟胃肠道消化 模拟消化过程参照 You 等<sup>[11]</sup>的方法有略微修改:用 1 mol/L 的 HCl 将热处理后的花生分离蛋白溶液的 pH 值调节到 2.0,加入胃蛋白酶(2% w/w,基于蛋白质)37 °C 酶解 1 h;用 0.9 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 调 pH 到 5.3,再用 1 mol/L NaOH 调 pH 到 7.5,加入胰蛋白酶(2% w/w,基于蛋白质),37 °C 酶解 2 h;沸水灭酶 10 min 终止反应,8000 r/min 离心 20 min,收集上清

液-20℃备用.另在胃蛋白酶酶解结束后取样灭酶,8000 r/min离心20 min,收集上清液-20℃储存备用.

**2.2.5 水解度的测定** 水解度(Degree of hydrolysis, DH)是指被酶水解的肽键数占蛋白中总肽键数的百分比,即水解上清液中氨态氮( $\alpha$ -amino nitrogen, AN)与原料总氮(Total nitrogen, TN)的百分比.本实验采用甲醛滴定法<sup>[12]</sup>测定原料中氨态氮的含量,采用凯氏定氮法测定原料中的总氮含量.花生蛋白的换算系数取5.46<sup>[13]</sup>.

$$DH(\%) = \frac{(AN - AN_0)}{TN} \times 100\%$$

AN<sub>0</sub>是空白对照样品上清液中的氨态氮.

**2.2.6 蛋白消化率的测定** 蛋白消化率(Protein digestibility, PD)定义为水解上清液中的蛋白含量(supernatant nitrogen, SN)占原料总蛋白(TN)的百分比.酶解后的样品8000 r/min离心20 min取上清液,采用凯氏定氮法测定水解上清液中和原料中的蛋白含量.

$$PD(\%) = \frac{SN}{TN} \times 100\%$$

**2.2.7 分子量分布的测定** 采用凝胶色谱法测定肽的分子量,检测条件:Waters 高效液相色谱(Waters 600),UltraHydrogel™ 250分析柱;洗脱液0.1%的三氟乙酸水溶液与乙腈按8:2混合,进样体积为10  $\mu$ L,流速0.5 mL/min,检测波长214 nm.标准肽样品:牛血清白蛋白(68000 Da),马心细胞色素C(12384 Da),抑酞酶(6511 Da),Gly-Gly-Gly(189 Da).相对分子质量的对数值与洗脱体积拟合直线方程 $y = -3.2323x + 29.983$  ( $R^2 = 0.9986$ ),其中,y为标准肽分子量的对数;x为洗脱体积.

**2.2.8 游离氨基酸测定** 采用A300氨基酸自动分析仪(曼默博尔,德国)进行游离氨基酸组成分析.样品处理如下:取2 mL样品到离心管,加入0.5 mL 10%的磺基水杨酸混匀,在4℃静止60 min以上;然后10000 r/min离心15 min,取上清液再次10000 r/min离心15 min;用锂离子稀释液按1:4~1:100稀释(以稀释后样品瓶中氨氮含量0.01%~0.006%为宜);经0.22  $\mu$ m过滤器过滤后装入样品瓶中上机分析.氨基酸的含量用mmol/g表示.

**2.2.9 数据处理方法** 所有测试都重复3次,数据统计分析采用SPSS 19.0(SPSS Inc., Chicago,

IL, USA)进行,采用均值±标准差( $\bar{x} \pm SD$ )为表示方法,不同样品之间的差异采用单因素方差分析进行比较,以 $P < 0.05$ 为有显著性.

## 3 结果与分析

### 3.1 美拉德反应程度

不同热处理条件下样品在294 nm和420 nm处的吸光值如图1所示.

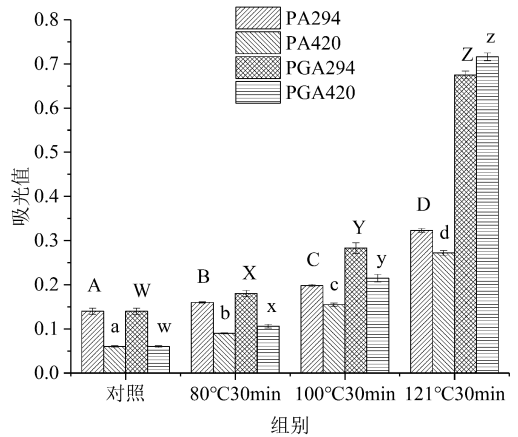


图1 不同热处理条件美拉德反应程度

PA294:PPI经热处理后在294 nm处的吸光值;PA420:PPI经热处理后在420 nm处的吸光值;PGA294:PPI加入葡萄糖经热处理后在294 nm处的吸光值 PGA420:PPI加入葡萄糖经热处理后在420 nm处的吸光值.注:不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ).

Fig. 1 The degree of maillard reaction in different heat-treatment groups

从图1中可以看出,没有外加葡萄糖的情况下对PPI进行热处理,在294 nm和420 nm处的吸光值会随热处理加剧而逐渐上升,在外加葡萄糖时吸光值的上升更显著.这一现象可解释为PPI本身含有微量的还原糖,在加热时也发生了美拉德反应,只是发生美拉德反应的程度远不如外加了葡萄糖的样品组.另外,相比于80℃和100℃条件,121℃条件下的反应更为剧烈,说明超高温热处理会急剧加速美拉德反应,且此条件下美拉德反应中间产物更易向终产物转化生成类黑精等物质<sup>[14]</sup>.

### 3.2 水解度

不同实验组在经过胃蛋白酶或胃蛋白酶-胰酶消化后的水解度如图2所示.

PPI中加入葡萄糖后,胃蛋白酶水解的水解度有所提高,但胃蛋白酶-胰酶模拟消化的水解度有所降低;这可能是葡萄糖的加入会促进胃蛋白酶的水解作用但是不利于胰酶的水解作用.

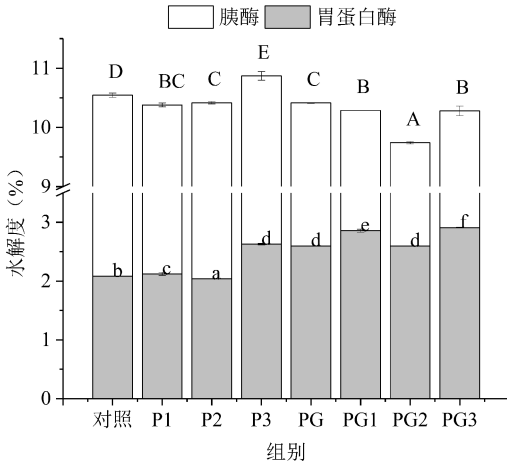


图 2 不同实验组模拟消化的水解度

注:不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ).

Fig. 2 DH of each group after simulated gastrointestinal digestion

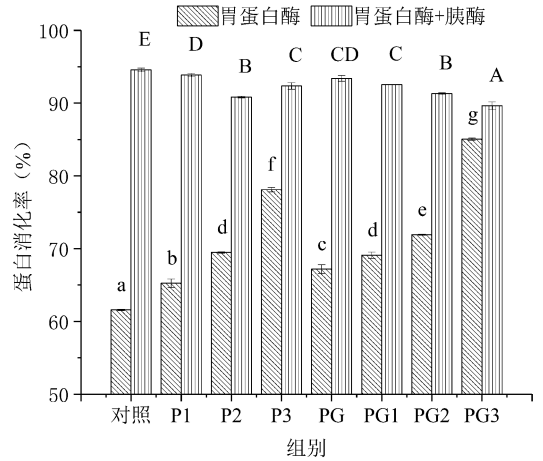


图 3 不同实验组蛋白消化率

注:不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ).

Fig. 3 Protein digestibility of each group after simulated gastrointestinal digestion

在 PPI 中加入葡萄糖后热处理,三个热处理条件下,胃蛋白酶水解后产物的水解度均有所提升,变化趋势与未添加葡萄糖时相近。80℃、100℃条件下,胃蛋白酶-胰酶模拟消化后水解度显著降低,但 121℃条件下仅略微降低。这一现象表明美拉德反应的发生不利于胃蛋白酶-胰酶的水解作用。Chung, Lee & Rhee 研究发现美拉德反应产物不仅形成了不利于酶作用的结构,而且能够抑制消化酶的活性<sup>[15]</sup>。

热处理过程不仅导致蛋白亚基展开,还会引发美拉德反应,上述现象是这两种作用的综合结果。在单独热处理 PPI 的情况下,80℃、100℃热处理 30 min 总体上不利于胃蛋白酶-胰酶模拟消化作用,而 121℃热处理 30 min 促进其作用;加入葡萄糖分别在 80℃、100℃、121℃下处理 30 min 均不利于胃蛋白酶-胰酶模拟消化水解度的提高,其中 100℃影响最大。说明 80℃和 100℃热处理导致的蛋白部分展开对水解度的贡献有限,而 121℃热处理导致的蛋白充分展开对水解度的贡献较大。

### 3.3 蛋白消化率

不同实验组在经过胃蛋白酶或胃蛋白酶-胰酶消化后的蛋白消化率如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,80℃、100℃、121℃条件下热处理 30 min,胃蛋白酶的蛋白消化率随热处理温度升高而逐渐升高(P3 比对照提高了 26.83%),而经胃蛋白酶-胰酶模拟消化后,蛋白消化率有所降低。

葡萄糖的添加对蛋白消化率的影响与对水解度的影响相近。加入葡萄糖后,随热处理温度升高,经胃蛋白酶消化后的蛋白消化率逐渐升高,而经胃蛋白酶-胰酶模拟消化后的蛋白消化率逐渐降低。

影响蛋白消化的主要因素是酶的水解作用和蛋白的溶解度<sup>[16]</sup>。胃蛋白酶是内切酶,水解程度低,胰酶是复合酶,水解程度高<sup>[17, 18]</sup>。所以影响胃蛋白酶蛋白消化率的主要因素是热处理条件,而影响胃蛋白酶-胰酶蛋白消化率的主要因素是水解作用。热处理和美拉德反应的发生都有利于提高胃蛋白酶的蛋白消化率,相反却不利于提高后续胰酶的蛋白消化率。范冬雪,李静洁,杨金芹等人<sup>[19]</sup>对小米蛋白的体外模拟消化研究得出相似结论:蒸煮处理会使小米蛋白的蛋白消化率降低。

### 3.4 分子量分布

不同实验组在经过胃蛋白酶或胃蛋白酶-胰酶消化后的肽分子量分布情况如图 4 所示。

在各条件下加热处理,均使得胃蛋白酶水解物中分子量超过 10kD 的组分明显增加,其他组分含量减少;而经胃蛋白酶-胰酶模拟消化后,水解物中分子量在 3~5kD 和 5~10kD 的组分含量增加,超过 10kD 和 1kD 以下组分含量减少。说明热处理有利于亚基展开,提高蛋白溶解性,增加与胃蛋白酶的作用机率;同时也会导致蛋白交联形成聚集体<sup>[20]</sup>,而不利于被酶解成更小的片段。

葡萄糖的加入会增加胃蛋白酶水解物中分子量超过 10kD 的组分含量,减少 1~3kD 和 1kD 以下的组分;同时也会导致胃蛋白酶-胰酶模拟消化水解物中分子量在 1kD 以下组分含量减少,3~5kD 和 5~10kD 的组分含量增加。说明即使不加热,葡萄糖也与小分子蛋白发生了一定的交联,从而阻碍小分子蛋白被酶解成更小的片段。

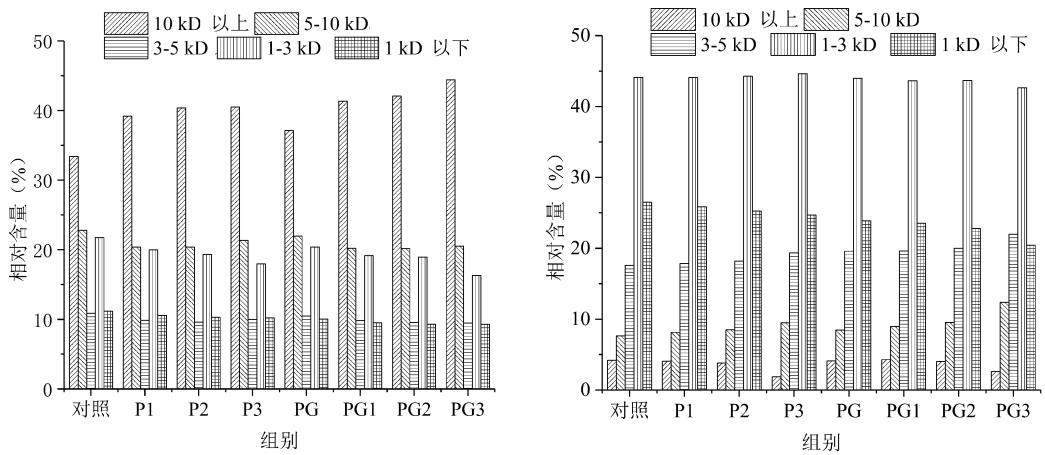


图 4 模拟消化产物分子量分布情况

a. 胃蛋白酶水解产物分子量分布 b. 胃蛋白酶-胰酶水解产物分子量分布

Fig. 4 The molecular weight distribution of simulated gastrointestinal digestion product

加入葡萄糖后热处理,胃蛋白酶水解物中分子量在 10kD 以上组分增加更多,胃蛋白酶-胰酶模拟消化产物中分子量在 3~5kD 和 5~10kD 的组分含量也进一步增加.因为不仅有小分子蛋白间的热聚集,同时还有蛋白与葡萄糖之间的美拉德反应,两者都会导致分子量更大的聚集体的形成,阻碍 PPI 被酶解成更小的片段.

### 3.5 模拟消化产物游离氨基酸分析

不同实验组在经过胃蛋白酶-胰酶消化后的游离氨基酸组成情况如表 2 所示.从表 2 中可以看

出,模拟消化产物中精氨酸(Arg)的含量非常高,达到了 36.2%,但是在各组别中,除了 P1 其他组别中的 Arg 降低比例均比总氨基酸的降低比例低;含量第二高的苯丙氨酸(Phe),在各组别中的降低比例均比总氨基酸的降低比例低.说明胃蛋白酶-胰酶的水解作用产生了大量的 Arg 和 Phe,同时也说明 PPI 中精氨酸残基和苯丙氨酸残基未被交联保护起来.另外 Phe、Leu、Tyr、Lys 含量也比较高,都在 8% 以上.

表 2 胃蛋白酶-胰酶模拟消化产物游离氨基酸分析

Tab. 2 Free amino acid analysis of pepsin-pancreatin hydrolysis products

项目	氨基酸含量(mg/mL)								相对对照变化(%)						
	对照	P1	P2	P3	PG	PG1	PG2	PG3	P1	P2	P3	PG	PG1	PG2	PG3
Arg	1.324	1.252	1.224	1.176	0.971	0.938	0.883	0.799	-5.4	-7.6	-11.2	-26.7	-29.2	-33.3	-39.7
Phe	0.492	0.494	0.461	0.444	0.35	0.33	0.321	0.295	0.4	-6.3	-9.8	-28.9	-32.9	-34.8	-40.0
Leu	0.485	0.482	0.438	0.419	0.321	0.313	0.278	0.255	-0.6	-9.7	-13.6	-33.8	-35.5	-42.7	-47.4
Tyr	0.399	0.404	0.37	0.347	0.269	0.25	0.239	0.211	1.3	-7.3	-13.0	-32.6	-37.3	-40.1	-47.1
Lys	0.324	0.296	0.263	0.252	0.21	0.195	0.179	0.139	-8.6	-18.8	-22.2	-35.2	-39.8	-44.8	-57.1
Ile	0.11	0.107	0.093	0.088	0.074	0.068	0.061	0.054	-2.7	-15.5	-20	-32.7	-38.2	-44.5	-50.9
Val	0.091	0.091	0.081	0.077	0.072	0.066	0.056	0.053	0	-11.0	-15.4	-20.9	-27.5	-38.5	-41.8
(Cys)2	0.089	0.084	0.076	0.082	0.059	0.055	0.05	0.046	-5.6	-14.6	-7.9	-33.7	-38.2	-43.8	-48.3
Ala	0.063	0.067	0.064	0.059	0.044	0.044	0.041	0.039	6.3	1.6	-6.3	-30.2	-30.2	-34.9	-38.1
His	0.061	0.061	0.051	0.076	0.065	0.057	0.046	0.041	0	-16.4	24.6	6.6	-6.6	-24.6	-32.8
Thr	0.042	0.041	0.038	0.036	0.028	0.025	0.025	0.025	-2.4	-9.5	-14.3	-33.3	-40.5	-40.5	-40.5
NH4	0.036	0.036	0.039	0.052	0.028	0.027	0.028	0.034	0	8.3	44.4	-22.2	-25	-22.2	-5.6
Pro	0.031	0.031	0.02	0.03	0.023	0.021	0.007	0.018	0	-35.5	-3.2	-25.8	-32.3	-77.4	-41.9
Asp	0.029	0.026	0.022	0.02	0.018	0.015	0.015	0.014	-10.3	-24.1	-31.0	-37.9	-48.3	-48.3	-51.7
Met	0.028	0.028	0.026	0.028	0.02	0.019	0.017	0.015	0	-7.1	0	-28.6	-32.1	-39.3	-46.4
Glu	0.025	0.028	0.022	0.022	0.02	0.018	0.018	0.018	12	-12	-12	-20	-28	-28	-28
Ser	0.02	0.021	0.019	0.017	0.014	0.014	0.013	0.011	5	-5	-15	-30	-30	-35	-45
Gly	0.008	0.008	0.009	0.008	0.005	0.005	0.005	0.005	0	12.5	0	-37.5	-37.5	-37.5	-37.5
总氨基酸	3.657	3.557	3.316	3.233	2.591	2.46	2.282	2.072	-2.7	-9.3	-11.6	-29.1	-32.7	-37.6	-43.3

从表 2 中可以看出,热处理会导致模拟消化产物中游离氨基酸的总量降低,热处理程度越剧烈,

降低越多.主要是因为热处理使肽链两端的氨基酸残基不易于被酶水解.加入葡萄糖后,模拟消化产

物中游离氨基酸总量降低 29.15%，并且热处理后会有进一步的降低。是因为部分游离氨基酸参与与葡萄糖的美拉德反应中，所以表现出来总量降低。

在含量超过 2% 的氨基酸里面，80℃、100℃、121℃ 条件热处理导致的降低比例均高于总氨基酸降低比例的只有 Lys；100℃、121℃ 条件热处理导致的降低比例均高于总氨基酸降低比例的还有 Leu、Ile、Val。说明热处理使肽链两端的 Lys、Leu、Ile、Val 残基更难于被酶水解。加入葡萄糖然后热处理导致的降低比例均高于总氨基酸降低比例的有 Leu、Tyr、Lys、Ile、(Cys)<sub>2</sub>，其中 Lys 降低幅度最大。说明 Leu、Tyr、Lys、Ile、(Cys)<sub>2</sub> 参与美拉德反应的活性较其他氨基酸残基更高。

## 4 讨 论

上述结果表明，花生分离蛋白在 80℃、100℃、121℃ 热处理过程中伴随美拉德反应的发生，随热处理温度升高，反应程度加深，且外加葡萄糖会显著加剧美拉德反应。

本实验所选的三个条件下，热处理和美拉德反对胃蛋白酶和胃蛋白酶-胰酶消化水解度以及蛋白消化率的影响不相同。两者都有利于胃蛋白酶消化水解度和蛋白消化率的提高，但均不利于胃蛋白酶-胰酶消化后蛋白消化率的提高。此外，121℃ 超高温热处理有利于胃蛋白酶-胰酶消化作用。

80℃、100℃、121℃ 条件下热处理 30min 导致后续胃蛋白酶水解物中分子量超过 10kD 的组分含量明显增加；胃蛋白酶-胰酶模拟消化后，水解物中分子量在 3~5kD 和 5~10kD 的组分含量增加。加入葡萄糖进行热处理，后续消化产物中分子量在 1~3kD 和 1kD 以下组分含量减少，3~5kD 和 5~10kD 的组分含量增加。

花生蛋白模拟消化产物中 Arg 含量高达 36.2%，另外 Phe、Leu、Tyr、Lys 含量均在 8% 以上。在含量超过 2% 的氨基酸中，参与美拉德反应活性高的的氨基酸残基主要为 Leu、Tyr、Lys、Ile、(Cys)<sub>2</sub>，其中 Lys 反应活性最高。

## 参考文献：

[1] Martins S I F S, Jongen W M F, Boekel M A J S. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling [J]. Trends Food Sci Tech, 2000, 11: 364.

[2] 胡燕, 陈忠杰, 李斌. 美拉德反应产物的功能特性和安全性研究进展[J]. 食品工业, 2016, 10: 258.

[3] Cécile R, Delphine L, Emilie R, *et al.* Mitigation strategies of acrylamide, furans, heterocyclic amines and browning during the Maillard reaction in foods

[J]. Food Res Int, 2016, 90: 154.

[4] 曾稳稳, 刘玉环, 阮榕生, 等. 美拉德反应所引起的食品安全问题的研究进展[J]. 食品工业科技, 2011, 32: 447.

[5] 叶春苗. 花生蛋白饮料加工技术研究[J]. 农业科技与装备, 2017, 2: 56.

[6] 刘亚琼, 王颖, 赵松, 等. 杏鲍菇花生复合植物蛋白饮料的工艺研究[J]. 北方园艺, 2015(4): 129.

[7] 王莹, 王瑛瑶, 刘建学, 等. 低温花生粕蛋白制备及其饮料稳定性分析[J]. 食品科学, 2014, 35: 26.

[8] 闵芳芳, 聂少平, 万宇俊, 等. 青钱柳多糖在体外消化模型中的消化与吸收[J]. 食品科学, 2013, 34: 24.

[9] Liu Y, Zhao G, Zhao M, *et al.* Improvement of functional properties of peanut protein isolate by conjugation with dextran through Maillard reaction [J]. Food Chem, 2012, 131: 901.

[10] 孟艳丽. Maillard 反应修饰鲢鱼肽的理化特性及其抗氧化活性研究[D]. 中国海洋大学, 2012.

[11] You L, Zhao M, Joem R, *et al.* Changes in the antioxidant activity of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) protein hydrolysates during a simulated gastrointestinal digestion [J]. Food Chem, 2010, 120: 810.

[12] Nilsang S, Lertsiri S, Suphantharika M, *et al.* Optimization of enzymatic hydrolysis of fish soluble concentrate by commercial proteases. [J]. J Food Eng, 2005, 70: 571.

[13] Misra J B. Variation in nitrogen-to-protein conversion factor for peanut. [J]. Peanut Science, 2001, 28: 48.

[14] Oh M J, Kim Y, Sang H L, *et al.* Prediction of CML contents in the Maillard reaction products for casein-monosaccharides model [J]. Food Chem, 2017, 07: 141.

[15] Chung S Y, Lee S W, Rhee C. Effects of various maillard reaction products on in vitro starch hydrolysis and blood glucose responses in mice[J]. Starch-Struktur, 2011, 63: 443.

[16] 李霞, 祝德义, 曾维才, 等. 水解胶原蛋白对枯草芽胞杆菌生长的影响[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53: 1386.

[17] 许亮. 酶法水解牛皮制备胶原的关键控制因素研究[D]. 四川大学, 2006.

[18] 李君兰. 牛羊胰酶提取、胰蛋白酶纯化及其酶学特性研究[D]. 甘肃农业大学, 2011.

[19] 范冬雪, 李静洁, 杨金芹, 等. 热处理对小米蛋白体外消化率的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 2: 56.

[20] Wooster T J, Augustin M A. Rheology of whey protein-dextran conjugate films at the air/water interface[J]. Food Hydrocolloid, 2007, 21: 1072.