

## 豆乳蛋白脱酰胺作用对豆乳性质的影响

武亮,徐婧婷,刘贺,李亮亮,郭顺堂

(中国农业大学 食品科学与营养工程学院,北京 100083)

**摘要:**采用脱酰胺法对大豆蛋白进行改性以提高豆乳的加工特性,并考察了微波作为辅助加热手段对酶法豆乳脱酰胺的影响,分析了不同脱酰胺处理对豆乳蛋白粒子电位、大小分布、浓缩豆乳的黏度以及豆乳香气的影响。结果表明:酶法脱酰胺增加了豆乳蛋白的 Zeta 电位,脱酰胺率在 6% 时,Zeta 电位增加了 2 mV;降低了豆乳的粘度,使蛋白粒子有变小的趋势。微波辅助脱酰胺明显提高反应速率,处理 10 min 就可达到水浴酶解 3~4 h 的脱酰胺效果,同时还明显降低了豆乳腥味成分相对含量,增加了甜香等风味物质的相对含量。

**关键词:**豆乳;谷氨酰胺酶;脱酰胺;微波;性质

**中图分类号:**TS201.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-9841(2011)06-1005-06

## Effects of Soymilk Protein Deamidation on the Properties of Soymilk

WU Liang, XU Jing-ting, LIU He, LI Liang-liang, GUO Shun-tang

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to improve the processing properties of soybean milk, deamidation was applied to modify soybean protein and microwave as a auxiliary heating method was investigated. The effect of different deamidation on protein particle size distribution, potential, the viscosity of the condensed soymilk and soymilk aroma after microwave treatment was also analyzed. The results showed that enzymatic deamidation increased Zeta potential of soymilk protein, when degree of deamidation approached 6%, Zeta potential increased by 2 mV. Deamidation reduced the viscosity of soy milk, while the protein particles had the trend of becoming smaller. In addition, deamidation enhanced surface hydrophobicity of soymilk. Microwave-assisted deamidation had more advantages than normal enzymatic treatment in water bath. For one thing, reaction rate is significantly improved. The effect of enzymatic treatment can be easily topped by microwave treatment for only 10 minutes. For another, the microwave treatment lessened the soymilk flavor while improved the relative content of aromas like sweetness resulting changes of soymilk flavor.

**Key words:** Soymilk; Glutaminase; Deamidization; Property

豆乳是豆制品加工的中间原料,一般豆乳含有 3.0% 左右的蛋白质<sup>[1]</sup>,其主要成分是大豆球蛋白(glycinin)、 $\beta$ -伴大豆球蛋白( $\beta$ -conglycinin)和少量的大豆清蛋白。豆乳中 50% 左右的蛋白以直径大于 40 nm 的粒子状态存在<sup>[2]</sup>。蛋白粒子的数量、大小和结构直接影响着豆乳的稳定性、凝胶形成性及豆乳粉的溶解性等加工特性<sup>[3-5]</sup>。

脱酰胺改性是一种常用的植物蛋白改性方法。有研究表明,通过对大豆蛋白脱酰胺处理将引起蛋白质结构变化,使蛋白两亲性增强,可以有效地提高改性大豆蛋白的溶解度、乳化性、起泡性等性质<sup>[6-7]</sup>。Chan 等<sup>[8]</sup>报道了盐酸法脱酰胺后豆渣蛋白的溶解性、乳化性明显增强,但是该法也使大量

的蛋白被水解成肽和氨基酸。包晓兰用酶法对蛋白进行脱酰胺处理,不仅提高了大豆蛋白的溶解稳定性,而且还提高了蛋白水解物的钙结合能力<sup>[9]</sup>。

常规酶解法与酸法相比较,作用条件温和,副产物少,易于控制。但是,酶解过程中需要加热来维持酶解反应的最适温度,反应时间较长,通常需要几个小时,费时费工。因此,有必要寻求一条提高酶解法脱酰胺反应效率的路径。微波作为一种常用的物理辅助手段,是一种频率为 300 MHz~300 GHz 之间的电磁波。与传统的加热不同,微波加热的优势在于介质内外同时加热,即微波能够同时将能量传递给介质所拥有的反应活性中心,瞬间达到所需加热温度。因此,微波比其它加热体系有更多

收稿日期:2011-04-14

第一作者简介:武亮(1987-),女,在读硕士,研究方向为大豆蛋白加工与利用。E-mail:wuliang0419@163.com。

通讯作者:郭顺堂(1962-),男,教授,博士生导师,从事蛋白质综合利用研究。E-mail:shuntang@cau.edu.cn。

的活性中心,分子碰撞反应在瞬间完成,使反应速度大大提高<sup>[10]</sup>。

该研究分析了半干法制备的豆乳在一般加热和微波加热条件下脱酰胺后的性质,评价了酶法脱酰胺处理效果,为豆乳蛋白脱酰胺改性提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

大豆品种中黄 13,购自中国农业科学院。

谷氨酰胺酶(日本天野酶制剂株式会社);ANS;1-Anilino-8-Naphthalene-Sulfonate 8-苯胺基-1-萘磺酸(Sigma 公司);其它试剂皆为分析纯,北京化学试剂公司提供。

九阳豆浆机(JYDZ-15B);UWave-1000 微波·紫外·超声波三位一体合成萃取反应仪(上海新仪微波化学科技有限公司);LS230 激光粒度仪(Beckman-Coulter LS 230, U. S. A.);SHJ-A 水浴恒温锅(金坛市华峰仪器有限公司);LS 55 荧光分光光度计(Perkin Elmer);Zetaplus  $\zeta$  电位分析仪(美国 Brookhaven 仪器公司);流变仪(美国 Brookhaven 仪器公司);气相色谱岛津 2014(SHIMADZU, JAPAN)。

### 1.2 试验设计

1.2.1 豆乳的制备 大豆清洗破碎后以 3 倍质量热碳酸氢钠溶液(100℃, pH 9.0)浸泡 30 s;随后加入干大豆 8 倍质量的热水(82℃以上)打浆,用脱脂棉过滤获得生豆乳,然后用沸水浴将其加热到 90 ~ 95℃, 8 min 后立即冰浴冷却至室温得到熟豆乳。

1.2.2 豆乳酶法脱酰胺预备试验 取一定量的熟豆乳置于 55℃ 水浴锅预热 10 min, 然后加入谷氨酰胺酶酶解,酶用量为 2% (酶与大豆蛋白比 E/S);分别在水浴和微波条件下酶解:在水浴 55℃ 条件下分别进行酶解 0、0.5、1、2、3、4 和 5 h;置于微波反应仪中,在微波温度 55℃,微波功率 500 W 条件下分别进行酶解反应 5、10、15 和 20 min。每个水平重复 3 次。到达酶解时间后,在沸水中使酶灭活 10 min,冰浴冷却至 25℃,然后,分别分析各样品的脱酰胺率。

1.2.3 豆乳酶法脱酰胺处理 参照周迪楠等<sup>[11]</sup>的方法将上述熟豆乳进行酶法脱酰胺处理,处理方式如下:

按照酶和豆乳蛋白质 E/S = 1/50 的比例向豆乳中添加谷氨酰胺酶,在水浴 55℃ 条件下酶解 3 h,此时的样品在该试验中定义为水浴酶解样品。

按照酶和豆乳蛋白质 E/S = 1/50 的比例向豆乳中添加谷氨酰胺酶,在微波功率 500 W,微波温度 55℃ 条件下酶解 10 min,此样品定义为微波酶解样品。

将熟豆乳先在微波功率 500 W,微波温度 55℃ 条件下微波照射 10 min,然后按照酶和豆乳蛋白质 E/S = 1/50 的比例向豆乳中添加谷氨酰胺酶,在水浴 55℃ 条件下酶解 3 h,获得的样品定义为先微波处理后水浴酶解样品。

按照酶和豆乳蛋白质 E/S = 1/50 的比例向豆乳中添加谷氨酰胺酶,先在水浴 55℃ 条件下酶解 3 h,灭酶后在微波功率 500 W,微波温度 55℃ 条件下微波照射 10 min,获得的样品定义为先水浴酶解后微波处理样品。

未处理样品指 1.2.1 中制备的熟豆乳,不进行脱酰胺处理。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 豆乳的脱酰胺率测定 脱酰胺率的测定采用康威微量扩散法<sup>[12]</sup>。准确称取样品 3 mL 于螺口培养管中,加入盐酸,使样品溶液中盐酸浓度达到  $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,立即将盖子盖严,然后将螺口培养管放入 110℃ 烘箱中,3 h 后取出。取洁净干燥的康威氏皿,将凡士林均匀涂于康威氏皿边缘,在皿中央内室准确加入 2% 硼酸 3 mL 和指示剂(甲基红 + 溴甲酚绿)1 滴。在康威氏皿外室准确加入处理好的样品溶液 2 mL,在另一侧迅速加入饱和碳酸钾溶液 3 mL(注意勿使两液接触),立即加盖密封。轻轻转动康威氏皿,使样品液与碱液充分混合均匀,然后将康威氏皿放入 30℃ 恒温箱中,36 h 后取出,去掉玻璃盖,用  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐酸溶液滴定内室的吸收液,并用细玻璃棒搅拌,滴定至蓝紫色为终点(作平行试验),同时做空白试验。

脱酰胺率计算公式如下:

$$A = (B - C) / D \times 100$$

1.3.2 豆乳 Zeta 电位值的测定 将各种脱酰胺处理后的豆乳稀释 50 倍后,用 Zeta 电位仪测定其电

位,温度设置为 25℃<sup>[8,13]</sup>。

**1.3.3 豆乳粘度的测定** 取 20 mL 的豆乳酶解液在变剪率下测定其粘度,流变仪的参数为:剪切率范围 0~5 000,剪切时间为 300 s,扭矩大于或等于 0.5 mNm 所对应的粘度值为有效值,样品平均粘度指的是粘度有效值的平均值。

**1.3.4 豆乳中粒子的粒径分布测定** 采用 LS230 激光粒度仪分析样品粒径分布。样品台采用湿法小样品台,粒径测量范围为 0.04~2 000 μm。把样品加入样品台后,当模糊度稳定在 40%~50% 时开始测定。以水为溶剂,折射率为 1.33,蛋白粒子折射率采用 1.46<sup>[14]</sup>。采用 Beckman Coulter LS Version 3.29 分析软件计算不同粒径蛋白粒子的体积百分比。

**1.3.5 表面疏水性测定** 取豆乳加入 0.1 mol·L<sup>-1</sup>、pH 7.0 的 Tris-HCl 缓冲溶液,稀释到蛋白质浓度为 0.005%,取稀释液 4.5 mL,加入 0.5 mL 的 ANS 溶液(1.25×10<sup>-3</sup> mol·L<sup>-1</sup>,用 0.1 mol·L<sup>-1</sup>, pH 7.0 的 Tris-HCl 缓冲溶液配制),室温下静置 2 h,进行荧光测定。激发波长:375 nm,发射波长:475 nm。激发和发射的狭缝宽度皆为 10 nm<sup>[15]</sup>。

**1.3.6 豆乳香气成分的测定** 采用顶空固相微萃取(SPME)法<sup>[16-17]</sup>提取豆乳香气,取 5 mL 豆乳放入 15 mL 玻璃瓶中,加入 0.5 mg NaCl,密封,在 50℃ 水浴平衡 30 min,然后插入萃取头,并保持其距离液面 0.5~1.0 cm,萃取 30 min,然后将萃取头放入气相色谱仪进行解吸附和分析。色谱条件为色谱柱:RTX-WAX(30 m×0.25 mm×0.25 μm);载气:氮气;柱流速:1.00 mL·min<sup>-1</sup>;进样口温度:250℃,萃取头在进样口解析 3 min,脉冲无分流进样;起始温度 50℃ 保持 3 min,以 3℃·min<sup>-1</sup> 升至 160℃ 保持 3 min,再以 10℃·min<sup>-1</sup> 升至 230℃,保留 5 min。

## 2 结果与分析

### 2.1 脱酰胺处理对豆乳 Zeta 电位的影响

如图 1 所示,随水解时间的延长,豆乳脱酰胺率增加,Zeta 电位也明显增加,水解 1 h 后脱酰胺率增加缓慢,5 h 后不再增加。相对于未脱酰胺处理的样品,脱酰胺处理 5 h 后,脱酰胺率接近 6% 时,绝对 Zeta 电位增加超过 2 mV。可见,脱酰胺后大

豆蛋白粒子的带电性增强。

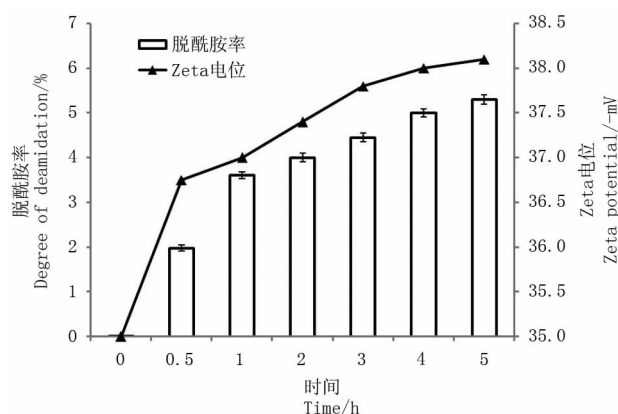
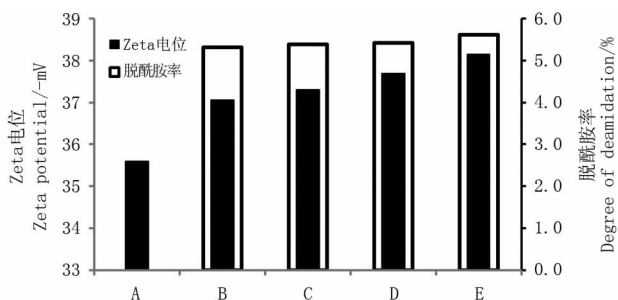


图 1 豆乳蛋白的脱酰胺率和 Zeta 电位随时间的变化

Fig. 1 Changes of degree of deamidation and Zeta potential value of protien in soymilk during hydrolyzing

由于酶法脱酰胺要在 3 h 以上才能获得较明显的脱酰胺效果。针对普通酶解时间过长问题,分析了微波辅助条件下的脱酰胺效果。如图 2 所示,微波处理条件下酶解 10 min 其脱酰胺率就接近普通酶解 3 h 的效果,电位势也明显增加。另一方面,先微波处理或酶解后微波处理虽然也增加了脱酰胺率和电位,但与微波场下直接酶解处理相比较增加效果较小。



A: 未处理;B: 水浴酶解后微波处理;C: 微波后水浴酶解;D: 微波酶解;E: 水浴酶解

A: Untreated; B: Microwave treatment after deamidation in hot water bath; C: Deamidation in hot water bath after microwave treatment; D: Deamidation in condition of microwave; E: Deamidation in hot water bath

图 2 不同脱酰胺处理豆乳蛋白的脱酰胺率和 Zeta 电位值

Fig. 2 Degree of deamidation and Zeta potential value of protien in soymilk during different deamidation treatments

以上结果表明,不论是水浴酶解还是微波辅助的酶解,都能将大豆蛋白质中天冬酰胺和谷氨酰胺脱去氨基生成天冬氨酸和谷氨酸,使豆乳溶液中形成游离羧酸根离子,引起氢键的减少和静电排斥的增加,显著提高豆乳溶液中蛋白质的电荷密度,从而可使豆乳混合体系保持稳定。而微波场下酶解存在联动机制,从而大大缩短了酶解脱酰胺的作用时间。

## 2.2 脱酰胺处理对豆乳黏度的影响

豆乳在浓缩加工过程中由于蛋白粒子间的相互作用,使豆乳的粘度随浓度的升高而升高,造成豆乳浓缩困难。对几种脱酰胺处理的豆乳的黏度分析,结果表明,豆乳在微波场酶解 10 min 脱酰胺处理后,其平均黏度经由 15.5 mPa·s 降低到 11.6 mPa·s,而水浴酶解、水浴酶解后微波处理及微波处理后水浴酶解粘度值分别为 7.8、7.4 和 7.2 mPa·s。这一结果表明脱酰胺处理能降低豆乳的粘度。但是,粘度的降低程度和脱酰胺率关系不大,而与酶解处理时间有关。这可能与豆乳蛋白在某种程度上分解有关<sup>[8]</sup>。

## 2.3 脱酰胺处理对豆乳粒子性质的影响

在豆乳加工过程中,大豆蛋白以粒子(粒径 > 40 nm)和非粒子(粒径 < 40 nm)状态存在<sup>[18-19]</sup>。豆乳中蛋白粒子的含量及组成影响豆乳的性质及豆腐的质构<sup>[20]</sup>。根据任晨刚<sup>[20]</sup>对脱脂豆乳蛋白粒子分析结果,图 3 中 1  $\mu\text{m}$  以上分布的是豆乳脂肪球,而蛋白粒子主要为小于 1  $\mu\text{m}$  以下的部分。从图 3 可以看出,微波场下短时间酶解豆乳的蛋白粒子分布与未处理相似,而长时间酶解样品的蛋白粒子分布出现了向左迁移,形成更多的小粒子。这一结果说明,脱酰胺并未使豆乳粒子大小发生改变,而过长时间的脱酰胺处理会使蛋白酶解,从而使粒子变小。

## 2.4 脱酰胺处理对豆乳表面疏水基团的影响

以荧光强度为豆乳蛋白表面疏水性指标,对几种不同脱酰胺处理的豆乳表面疏水性进行了分析。单位蛋白浓度下,荧光强度越大,表明豆乳表面疏水性越强。对几种脱酰胺处理后豆乳蛋白的分析结果显示(图 4),与原豆乳相比,脱酰胺豆乳溶液体系的荧光强度显著高于未经脱酰胺处理豆乳。表明脱酰胺处理可以使豆乳蛋白的空间结构发生一定的变化,即三级结

构部分展开,原先埋藏于分子内部的疏水区域开始暴露,进而使蛋白质分子的表面疏水性增加。

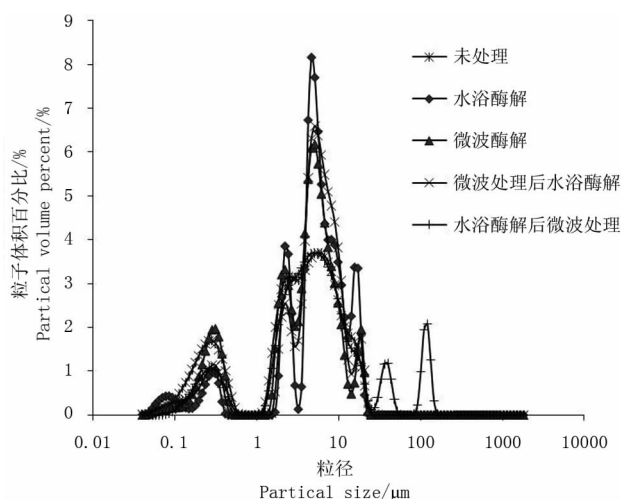
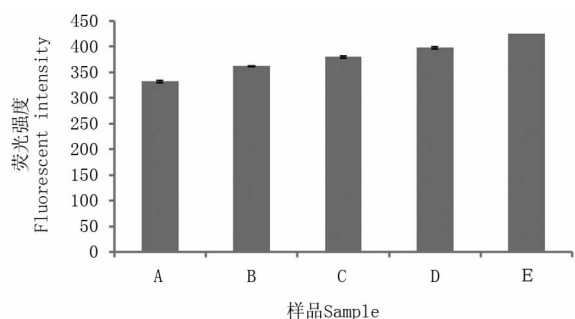


图 3 不同脱酰胺处理豆乳的粒子粒径大小

Fig. 3 Particle diameter of soymilk with different deamidation treatments



A: 未处理; B: 水浴酶解后微波处理; C: 微波后水浴酶解; D: 微波酶解; E: 水浴酶解

A: Untreated; B: Microwave treatment after deamidation in hot water bath; C: Deamidation in hot water bath after microwave treatment; D: Deamidation in condition of microwave; E: Deamidation in hot water bath

图 4 不同脱酰胺处理豆乳中表面疏水性差异 ( $P < 0.05$ )

Fig. 4 Changes of hydrophobicity of soymilk with different deamidation treatments ( $P < 0.05$ )

## 2.5 脱酰胺处理对豆乳香气的影响

在豆乳蛋白脱酰胺过程中,会有部分肽键断裂发生水解<sup>[8]</sup>,在降低豆乳黏度、改善豆乳蛋白功能性质的同时,可能会对豆乳的风味产生一定影响。如图 5 所示,脱酰胺处理的豆乳谱图基本与对照没有显著差异,但是,微波场下的酶解处理豆乳的风

味化合物在保留时间 40 ~ 50 min 的峰值明显不同于其它处理。应用内标法结合峰面积归一化法对几种代表性风味物质相对含量的比较发现,微波酶解豆乳的主要不良风味物质己醛、反-2-庚烯醛和 1-辛烯-3-醇含量减少,同时 3-庚酮和反-2-癸烯醛等

表现甜香味的良好风味物质含量明显增加(表 1)。这一结果表明微波酶解脱酰胺处理不仅可以降低豆乳的豆腥味,同时还可以促使豆乳表现出令人愉快的甜香味。

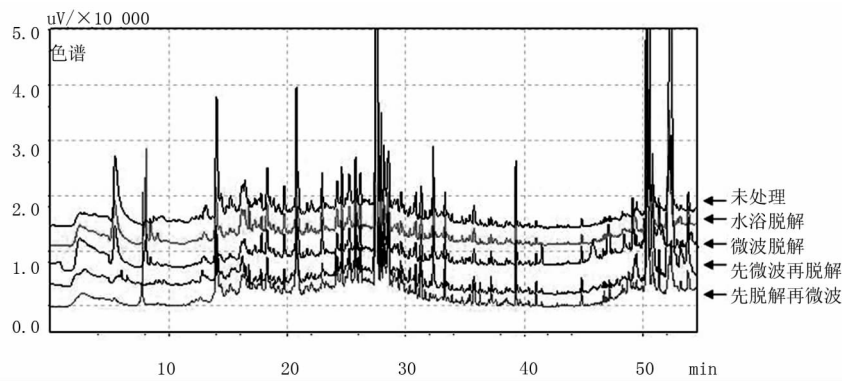


图 5 不同脱酰胺处理豆乳挥发性香气物质的总离子流图  
Fig.5 Gas chromatogram profiles of soymilk flavor with different deamidation treatments

表 1 不同脱酰胺处理豆乳中几种关键性香气物质的相对含量比较

| Table 1 Relative contents of key aromas in traditional soymilk with different deamidation treatments( % ) |            |             |             |                  |                  |                               |
|---|------------|-------------|-------------|------------------|------------------|-------------------------------|
| 风味物质<br>Components  | 未处理<br>(A) | 水浴酶解<br>(B) | 微波酶解<br>(C) | 微波处理后<br>水浴酶解(D) | 水浴酶解后<br>微波处理(E) | 特征香气<br>Characteristic flavor |
| 己醛 Hexanal  | 4.8        | 2.4         | 2.7         | 0.31             | 1.9              | 青草腥味                          |
| 3-庚酮 3-Heptanone  | 0.91       | 7.9         | 6.4         | 0.62             | 7.5              | 甜香                            |
| 反-2-庚烯醛 Trans-2-Heptenal  | 5.9        | 2.3         | 1.1         | 1.2              | 3.4              | 蒸煮味                           |
| 1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol   | 3.1        | 2.2         | 2.3         | 1.1              | 1.9              | 蘑菇腥味                          |
| 反-2-癸烯醛 2-Decenal   | 1.4        | 16          | 11          | 1.5              | 23               | 甜橙香                           |

A: Untreated; B: Deamidation in hot water bath; C: Deamidation in condition of microwave; D: Deamidation in hot water bath after microwave treatment; E: Microwave treatment after deamidation in hot water bath

3 结论与讨论

该研究对豆乳蛋白进行酶法脱酰胺改性处理,酶法脱酰胺可以显著改变豆乳蛋白的 Zeta 电位。同时,脱酰胺后的豆乳粘度降低,而这一结果与 Li 等<sup>[21]</sup>关于大豆分离蛋白溶液脱酰胺的流变性研究结果有所差异,一方面可能是因为蛋白在豆乳体系中的存在状态与大豆蛋白粉再溶解到溶液时的状态有所不同,另一方面该研究发现脱酰胺后部分蛋白粒子粒径减小(图 3),这可能是由于脱酰胺过程中部分蛋白发生了水解反应引起的,从而导致粘度的降低。在某些生物催化反应体系中,相对于传统加热方式,微波加热催化酶反应可以明显的加快反应速率、提高反应产率,甚至有改变产物立体结构的特殊生物效应<sup>[22]</sup>。该研究也表明采用微波酶解处理 10 min 就可达到接近普通酶解处理 3 ~ 4 h 的脱酰胺效果,降低了豆乳的黏度,使豆乳蛋白粒子的疏水性增强,降低了豆乳腥味成分含量,增加了甜香等风味物质的相对含量,改变了豆乳的风味。

对豆乳进行微波处理后酶解脱酰胺或先酶解后微波处理的效果均不如微波场下的酶解处理,说明微波和酶解对豆乳蛋白的修饰存在联动作用,不仅提高了脱酰胺效率,而且还有可能改变了豆乳体系中各成分的相互作用关系。

参考文献

[1] DeMan J M, deMan R I, Buzzell R I. Composition and properties of soymilk and tofu made from Ontario light hilum soybeans[J]. Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, 1987, 20: 363-367.

[2] Ono T, Choi M R, Ikeda A. Changes in the composition and size distribution of soymilk protein particles by heating[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1991, 55(9): 2291-2297.

[3] 宋国安. 干法生产绿色大豆保健豆粉、豆奶粉工艺及设备应用[J]. 四川粮油科技, 2001(3): 46-48. (Song G A. Application technology and equipment of health dry soybean meal and powder of soybean milk in dry way[J]. Science and Technology of Cereals and Oil of Sichuan, 2001(3): 46-48.)

[4] Tezuka M, Yagasaki K, Ono T. Changes in characters of soybean Glycinin groups I, IIa, and IIb caused by heating[J]. Journal of

- Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52: 1693-1699.
- [5] Toda K, Chiba K, Ono T. Effect of components extracted from Okara on the physicochemical properties of soymilk and tofu texture [J]. Journal of Food Science, 2007, 72(2): C108-C113.
  - [6] Riha W E, Izzo H V, Zhang J. Nonenzymatic deamidation of food proteins[J]. Journal of Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1996, 36(3): 225-255.
  - [7] Suh H J, Whang J H, Suh D B, et al. Preparation of Angiotensin I converting enzyme inhibitory from corn gluten [J]. Process Biochemistry, 2003, 38: 1239-1244.
  - [8] Chan W M, Ma C Y. Acid modification of proteins from soymilk residue (Okara) [J]. Food Research International, 1999, 32: 119-127.
  - [9] 包小兰. 大豆肽与钙结合形成可溶性复合物的机制及其稳定性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007. ( Bao X L. The forming mechanism and stability of the soluble complexes during calcium binding by soybean peptides [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. )
  - [10] Lorenzo C, Alessandra B, Maria T R E, et al. Microwave heating of different commercial categories of olive oil; Part II. Effect on thermal properties [J]. Food Chemistry, 2009, 115(4): 1381-1388.
  - [11] 周楠迪, 陈坚, 郑美英, 等. 谷氨酰胺转氨酶的功能性质及其在食品中的应用方法 [J]. 中国食品添加剂, 2000(1): 54-59. ( Zhou N D, Chen J, Zheng M Y. Functional properties and application in food industry of transglutaminase [J]. China food additives, 2000(1): 54-59. )
  - [12] Kato A, Tanaka A, Matsudomi N, et al. Deamidation of food proteins by protease in alkaline pH [J]. Journal of Agriculture Food Chemistry, 1987, 35: 224-227.
  - [13] 易翠平, 姚惠源. 酸法脱酰胺对大米蛋白分子间作用力和二级结构的影响 [J]. 中国粮油学报, 2007, 22(3): 1-5. ( Yi C P, Yao H Y. Intermolecular forces and secondary structure of acid-deamidated rice protein [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2007, 22(3): 1-5. )
  - [14] Malaki N A, Tosh S, Poysa V, et al. Physicochemical characterization of soymilk after step-wise centrifugation [J]. Food Research International, 2008, 41(3): 286-294.
  - [15] Akio O, Masaru M. Decrease in the gel strength of tofu caused by enzyme reaction during soybean grinding and its control [J]. Bio-science, Biotechnology & Biochemistry, 1993, 57(4): 542-545.
  - [16] 吕艳春. 豆乳风味平衡体系变化规律的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2010. ( Lv Y C. Study on the equilibrium change of beany flavors and non-beany flavors in soymilk [D]. Beijing: China Agricultural University, 2010. )
  - [17] Kobayashi A, Tsuda Y, Hirata N, et al. Aroma constituents of soybean [ *Glycine max* ( L. ) Merrill ] milk lacking lipoxygenase isozymes [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(9): 2449-2452.
  - [18] Guo S T, Ono T, Mikami M. Interaction between protein and lipid in soybean milk at elevated temperature [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1997, 45: 4601-4605.
  - [19] Ren C G, Tang L, Zhang M, et al. Interactions between whey soybean protein (WSP) and beta-conglycinin (7S) during the formation of protein particles at elevated temperatures [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 936-941.
  - [20] 任晨刚. 豆乳中蛋白粒子的结构特征及其修饰技术研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2009. ( Ren C G. Structural characterization and modification technology of protein particles in soy milk [D]. Beijing: China Agricultural University, 2009. )
  - [21] Li D, Zhao X H. Deamidation of soybean proteins with glutaminase to improve their rheological properties [J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 7: 918-921.
  - [22] 黄伟. 微波辐射-酶耦合催化 (MIECC) 效应的研究--微波辐射对反应机制、动力学和区域选择性的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2005. ( Huang W. Investigation on microwave irradiation-enzyme coupling catalysis-effect of microwave irradiation on reaction mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2005. )

(上接第 1004 页)

- [4] 郭树琴, 吴胜举, 李岱. 响应面法优化超声提取绿茶多酚工艺 [J]. 生物加工过程, 2009, 7(1): 39-43. ( Guo S Q, Wu S J, Li D. Optimization of ultrasonic extraction of tea polyphenols from green tea by response surface methodology [J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2009, 7(1): 39-43. )
- [5] 张水华. 食品分析 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 98-102. ( Zhang S H. Food Analysis [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009: 98-102. )
- [6] 张敏, 高秀丽, 鲍鹏. 大豆与豆粕中游离氨基酸总量测定 [J]. 贵阳医学院学报, 2006, 31(5): 418-419, 423. ( Zhang M, Gao X L, Bao P. The Determination of total amounts of free amino acids in fermented and un-fermented soybean [J]. Journal of Guiyang Medical College, 2006, 31(5): 418-419, 423. )
- [7] 杨铭铎, 陈健, 张晓宇, 等. 大豆发芽工艺条件的优化 [J]. 食品科学, 2010, 31(20): 97-100. ( Yang M D, Chen J, Zhang X Y, et al. Optimization of germination conditions for soybean [J]. Food Science, 2010, 31(20): 97-100. )
- [8] 张永清, 顾振新, 张颖, 等. 豆芽生产中大豆浸泡条件与吸水率和发芽率的关系研究 [J]. 食品研究与开发, 2007, 28(11): 26-29. ( Zhang Y Q, Gu Z X, Zhang Y, et al. Study on sucked water rate and sprout rate associated with soaking condition in soybean sprouts production [J]. Food Research and Development, 2007, 28(11): 26-29. )
- [9] 李新华, 刘星波. 大豆发芽过程中酶的含量变化及营养变化研究 [J]. 食品工业科技, 2010, 31(10): 140-151. ( Li X H, Liu X B. Study on changes of enzyme and nutrition during the processing of soybean germination [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(10): 140-151. )
- [10] 王莘, 王艳梅, 闵卫红, 等. 大豆萌发期功能性营养成分测定与分析 [J]. 中国粮油学报, 2003, 18(4): 30-32. ( Wang X, Wang Y M, Min W H. Analysis and determination of functional nutrition composition in soybean during sprouting period [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2003, 18(4): 30-32. )