

# 不同膨化温度对天然富硒膨化大米粉性质的影响

胡居吾<sup>1,2</sup>, 熊 华<sup>1\*</sup>, 李雄辉<sup>2</sup>, 朱雪梅<sup>1</sup>, 王 璐<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 南昌 330047; <sup>2</sup>江西省科学院应用化学研究所, 南昌 330096

**摘要:** 本文研究了不同的膨化挤压温度下对天然富硒膨化大米粉中性质的影响。在不同膨化温度下, 随着膨化温度升高, 水分损失量呈增大趋势; 对米粉的溶解率和沉淀吸水率增加; 随着膨化温度升高, 膨化后样品粉体的休止角及滑角呈变大的趋势; 扫描电子显微镜的结果表明, 随着膨化温度升高, 由于淀粉的糊化, 淀粉颗粒增大, 相互间距增大且表面变得更光滑, 内部空腔明显增大, 但各 X-ray 衍射曲线变化不明显; 不同膨化温度对天然富硒大米粉之间的蛋白质组成没有发生明显变化, 但天然富硒大米经挤压膨化后, 造成了蛋白质亚基聚合, 使全蛋白质中出现了高分子量的亚基; 不同膨化温度对氨基酸含量与原富硒大米相比, 都有变化, 有些氨基酸变化更明显(半胱氨酸、蛋氨酸和赖氨酸)。本研究揭示了不同挤压条件对产品特性产生影响的原因, 同时为挤压大米富硒食品的合理利用提供理论依据。

**关键词:** 挤压膨化; 天然富硒大米; 理化性质

中图分类号: S38

文献标识码: A

DOI: 10.16333/j.1001-6880.2017.9.005

## Effects of Different Extrusion Temperatures on the Properties of Natural Selenium Enriched Expanded Rice Powder

HU Ju-wu<sup>1,2</sup>, XIONG Hua<sup>1\*</sup>, LI Xiong-hui<sup>2</sup>, ZHU Xue-mei<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

<sup>2</sup>Jiangxi Academy of Sciences, Jiangxi 330096, China

**Abstract:** To study the effect of different extrusion temperatures on extrusion puffing rice protein and starch physicochemical properties. With the increase of extrusion temperature, the amount of water loss increased, and the rate of rice powder dissolution and the rate of water absorption increased, and the repose angle and sliding angle of puffed powder samples was big trend. The scanning electron microscope analysis results showed that starch grains became larger and the surface became smoother, internal cavity increased significantly, but the X-ray diffraction curve was not obvious with the increasing of extrusion temperature. The different extrusion temperature did not change protein composition significantly among expanded rice powder, but resulting in a protein subunit polymerization, it appeared in the high molecular weight subunits. Compared to the original rice, the content of amino acid changed, and some amino acid changed more obviously (such as cysteine, methionine and lysine). This study revealed the reasons of the effects of different extrusion conditions on the product characteristics, at the same time, provided the theoretical basis for the rational use of selenium rich rice food.

**Key words:** extrusion; natural selenium enriched rice; physicochemical properties

硒具有抗癌、保护心脏、抗肝坏死、防治近视和白内障、解毒、提高免疫力、延缓衰老和增强生殖功能等多种药理作用, 被誉为“生命火种”、“心脏的守护神”和“抗癌之王”<sup>[1,2]</sup>。缺硒会导致多种疾病和人体衰老。目前, 国内尚不能人工合成氨基酸结合型有机硒, 大多获取植物有机硒的途径是依靠生物

转化技术, 如采用产前富硒法, 即在农产品生长和收获前一定阶段通过喷洒等方式使无机硒进入植物生长环境中, 然后经过植物吸收转化形成各种形式的有机硒结合体, 以满足人、动物饮食中硒之不足<sup>[3,4]</sup>。丰城被誉为“中国生态硒谷”, 有良好的天然硒资源基础。与全国硒产业相同, 江西省的富硒产业也存在一些问题, 普遍是重基地建设, 轻产业的科研开发, 深加工技术匮乏。如丰城市富硒区域每年的大米产量约为 300 万吨, 如丰城董家地区早米中硒含量经过检测为 0.09 μg/g, 属于富硒范围。

收稿日期: 2017-04-13 接受日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(21266020); 江西省科技支撑计划(20141BBF60044)

\* 通信作者 E-mail: huaxiong@126.com

目前这些富硒大米没有得到更好的综合利用,价格低廉,没有体现出富硒产品应有的价值。

挤压膨化是通过热能、剪切和压力等综合作用,使水分在喷出模口时瞬间汽化,对食品进行膨化的一种技术,是一个短时高温、高压的加工过程。挤压机内螺杆、螺旋不断转动,当物料进入挤压机后,随着螺杆、螺旋的转动被向前输送,由于螺杆与机筒、物料与机筒、物料之间的强烈摩擦以及挤压机套筒外加的热量使物料处于高温、高压环境呈熔融状态,当物料进入模头前,熔融态的物料完全呈流体状态,最后由模孔被挤出瞬间到达常温常压状态,物料的体积也瞬间膨化,致使食品内部淀粉体爆出许多微孔,体积急剧膨胀,形成质构疏松的膨化食品。

大米在挤压膨化过程中,大米中的各种组分(如蛋白质、淀粉)受机械剪切、高温、高压等作用,它们的质构和理化性质会发生变化,这些变化会导致终产品膨化米粉在属性、加工特性和营养价值产生发生改变。主要原因是大米中蛋白质、淀粉等大分子物质的化学键断裂,导致物料中大分子会发生降解,分子间重组则导致小分子发生聚合或降解等<sup>[5-7]</sup>。同时,由于挤压机内的高温 and 剪切作用使膨化大米粉转变为具有粘弹性的熔融体,并发生淀粉糊化和降解、蛋白质变性等多种理化特性的变化。

本研究以天然富硒大米为原料,通过在不同挤压膨化温度下对膨化米粉中的淀粉和蛋白质理化特性进行了分析,揭示不同挤压膨化温度对膨化米粉理化特性产生影响的原因,同时为挤压膨化大米富硒食品的合理利用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料和试剂

天然富硒大米,购于丰城市董家村。天然富硒米粉挤压膨化制备:15 kg 天然富硒大米(12%的水含量)在 350 rpm 速度进行挤压膨化,分别在 140 ~ 150 °C、150 ~ 160 °C、160 ~ 170 °C、170 ~ 175 °C 不同的温度范围收集,得到成为圆形膨化状米制品,经粉碎标为 A、B、C、D 挤压膨化米粉样品,E 为未膨化的天然富硒大米。

HNO<sub>3</sub>、HClO<sub>4</sub>、HCl、Tris、甘油、十二烷基磺酸钠(SDS)、2-巯基乙醇(2-ME)、甲醇、冰醋酸、丙烯酰胺、双丙烯酰胺、甘氨酸、考马斯亮兰 R-250、三氨基甲烷、溴苯酚、溴酚蓝、β-巯基乙醇、N,N,N',N'-四甲基乙二胺(TEMED)。

### 1.2 仪器与设备

DS56-III 双螺杆膨化机,济南赛信机械公司;TS-110X50 水浴恒温摇床,金坛市精达仪器制造有限公司;SK-2002B 原子荧光光谱仪,北京金索坤技术开发有限公司;K12 全自动定氮仪,上海晟声自动化分析仪器有限公司;AE6450 型电泳仪,日本 ATTO 公司;SH 扫描电子显微镜,日本 HIROX(浩视)公司;TD-3700X 射线衍射仪,丹东通达科技有限公司;Agilent 1100 型高效液相色谱仪,美国 Agilent 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 膨化米粉中总硒含量的测定

称取通过样品约 0.25 g 于 100 mL 的三角瓶,加入 10 mL 混合酸(HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub> = 4:1),盖上弯颈漏斗,静置过夜后在电热板低温砂浴硝化 1 h,然后在逐步升温,微沸条件下硝化至无色并冒白烟,取下,稍冷后加入 5 mL HCl(1:1),继续加热至无色并冒白烟,取下,冷却,再加 5 mL HCl(1:1),全部转入 25 mL 容量瓶中。硝化后待测液中的硒含量用原子荧光光谱仪测定。

#### 1.3.2 膨化米粉沉淀率 C、溶解率 R 和沉淀吸水率 S 的测定

称取膨化米粉 W<sub>0</sub>(W<sub>0</sub> = 10 g)于盛有 100 mL 水并已预热到 90 °C 烧杯中,于 90 °C 下保温、搅拌至均匀,配制成 0.1 g/mL(以水为基准)米糊。

将制好的米糊放入已知重量(W<sub>2</sub>,g)离心管中离心(3000 rpm,10 min,去掉上清液,称取离心管和沉淀湿重(W<sub>4</sub>,g),在烘箱中于 105 °C 烘 4 h,得离心管和沉淀干重(W<sub>3</sub>,g),沉淀干重 W<sub>1</sub> = W<sub>3</sub> - W<sub>2</sub>。则:

$$\text{沉淀率 } C = W_1 / W_0$$

$$\text{溶解率 } R = (W_0 - W_1) / W_0 \times 100\%$$

$$\text{沉淀吸水率 } S = (W_4 - W_3) / W_0 \times 100\%$$

#### 1.3.3 膨化米粉流动性的测定<sup>[8]</sup>

##### 1.3.3.1 休止角的测定(固定漏斗法)

将一玻璃板平铺在桌面上,将玻璃漏斗置于铁架台上,使其下端距桌面玻璃板 3 cm。取样 3 g,使样品从漏斗中自由下落,在玻璃板中央形成圆锥体。测定粉体的直径(d)和分体的高度(h),计算休止角。公式如下:

$$\text{Tan}\theta = h / (d/2)$$

##### 1.3.3.2 滑角的测定

将待测样品平铺于光滑的玻璃板中央,逐渐抬高玻璃板的一端,直至达到某一个角度时,样品 90% 从玻璃板上滑下,记录此角,即为滑角。

### 1.3.4 电子显微镜观察膨化米粉的微观结构<sup>[9]</sup>

采用扫描电子显微镜观察干燥的样品。双面胶粘在铜片上,将被测样品颗粒借助于棉球直接散落在上面,用洗耳球轻吹式样,除去附着和未牢固固定的颗粒。样品放入溅射镀膜仪中,当真空优于 13 Pa 时方可镀膜。调节控制旋钮使电流为 6~8 mA,镀膜时间 5~10 min。通过电子显微镜扫描观察,比较不同膨化温度下各样品的微观结构的影响。

### 1.3.5 膨化米粉的 X 衍射扫描

样品用透明胶带黏一层样品粘到玻片上进行 X 衍射扫描。扫描波长为 1.54 Å,衍射角 2θ 的范围为 5°~50°,管流:36 Kv,管压:24 mA,步宽 0.05 度。

### 1.3.6 膨化米粉中蛋白质亚基组成的影响(SDS-PAGE 法)

#### 1.3.6.1 膨化米粉中蛋白质的提取

以膨化米粉:水=1:20 的料水比溶解,用 1 N NaOH 调 pH 值至 8.0,在磁力搅拌下提取蛋白 3 h;然后以 3200 rpm 的转速离心 30 min;上清液用 2N HCl 调 pH 值至等电点,酸沉蛋白,再以 3200 rpm 的转速离心 30min;去上清液,用水洗沉淀三次,加少量的水溶解沉淀,用 2N NaOH 调 pH 至 7.0;最后冷冻干燥得到大米蛋白质粉成品。

#### 1.3.6.2 不同膨化温度对膨化米粉中蛋白质组成中的亚基变化<sup>[16]</sup>

取 50 mg 大米蛋白质粉溶于 1 mL 电泳样品制备液。该制备液为 0.06M Tris-HCl 缓冲液,内含 25% 甘油(v/v)、2% SDS(w/v)、5% 2-ME(v/v)、0.1% 溴酚蓝(w/v),间隙振荡 4 h,100 °C 水浴加热 4 min,12000 rpm 离心 10 min,上清液用于电泳。

### 1.3.7 不同膨化温度对米粉蛋白质中氨基酸组成的影响

1.3.7.1 总氨基酸的测定采用 6N HCl 真空水解样品 24 h,采用三氯乙酸沉淀未水解蛋白质,10000 rpm 高速离心后测定。

1.3.7.2 色谱条件:Agilent 1100 液相色谱仪,自动衍生化反应及放置样品;荧光检测器,激发波长 200~700 nm,发射波长 280~900 nm;可变波长紫外检测器,波长 190~600 nm;分析柱,Hypersil ODS C<sub>18</sub> (4×125)nm 卡套柱。

## 1.4 统计学方法

数据均采用 SPSS 19.0 软件对各组数据进行统计分析处理。数据用( $\bar{x} \pm s$ )表示,采用方差分析。符合正态分布且方差齐的进行单因素方差分析,不符合正态分布或方差不齐的进行非参数检验,以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同膨化温度对产品特性的影响结果

表 1 不同膨化温度对产品特性的影响

Table 1 Effect of different expanding temperature on the characteristics of the product

Index	A	B	C	D	E
水分 Moisture content (%)	7.25 ± 0.36 <sup>b</sup>	6.78 ± 0.40 <sup>b</sup>	6.41 ± 0.19 <sup>b</sup>	6.16 ± 0.43 <sup>b</sup>	9.87 ± 0.39 <sup>a</sup>
硒含量 Se content (mg/kg)	0.084 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.090 ± 0.004 <sup>a</sup>	0.085 ± 0.004 <sup>a</sup>	0.089 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.091 ± 0.006 <sup>a</sup>
沉淀率 Deposition rate (%)	78.04 ± 1.95 <sup>b</sup>	71.33 ± 3.20 <sup>b</sup>	69.20 ± 3.11 <sup>a</sup>	66.69 ± 3.00 <sup>a</sup>	
溶解率 Dissolution rate (%)	21.95 ± 1.22 <sup>c</sup>	28.66 ± 1.54 <sup>b</sup>	30.81 ± 2.06 <sup>a</sup>	33.31 ± 1.54 <sup>a</sup>	
沉淀吸水率 Water absorption rate of deposition (%)	445.92 ± 10.70 <sup>b</sup>	492.01 ± 17.712 <sup>b</sup>	524.80 ± 16.26 <sup>a</sup>	528.02 ± 13.72 <sup>a</sup>	

从表 1 可知,不同加工温度段下,随着加温度升高,水分损失量呈增大趋势。在挤压膨化加工过程中,物料中水分的变化主要是由于高温高压高剪切作用使水分汽化,在喷出模口时一瞬间随物料膨化而逸出<sup>[10]</sup>。大米挤压膨化过程中淀粉在高温剪切作用下会发生降解。支链淀粉由于分子量大,比直链淀粉更易降解,断裂主要发生在 1~6 键的部位,

氢键作用削弱,晶体结构进一步破坏,水分子可通过氢键与淀粉分子中外露的羟基结合,使得物料米粉的溶解率和沉淀吸水率增加,其中挤压膨化后的物料结构疏松,物料间的空隙率增加,因此,其吸水保水能力增强<sup>[11]</sup>。蛋白质差别小,经过挤压膨化,蛋白发生了部分降解,形成小分子肽或氨基酸,通过热反应,蛋白与淀粉多糖类发生美拉德反应,产生风味

物。而大米中含有的脂质,在剧烈的作用下,脂肪遭到破坏,有可能是大米的挤压膨化过程中脂肪形成少量的淀粉脂和脂蛋白<sup>[12]</sup>。

## 2.2 不同膨化温度对产品流动性的影响

粉体的流动性主要是通过粉体的休止角、表面滑动角来定性的。休止角是粉体堆积层的自由斜面与水平面所形成的最大角,是粒子在粉体堆积层的自由斜面上滑动时所受重力和粒子间摩擦力达到平衡而处于静止状态下测得,是检验粉体流动性的好坏的最简便的方法。表面滑动角是粉体在倾斜平板上滑落时,平板倾斜的角度。本实验采取固定漏斗法、斜板法对休止角、表面滑动角进行测定。每个试样测定三次,其实验结果如图1、2所示。

如图1、2所示,膨化后样品粉体的休止角及滑

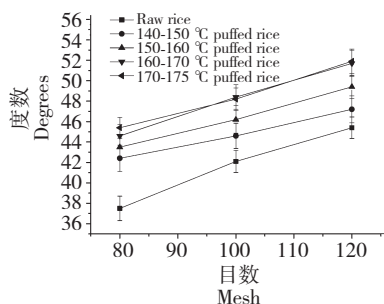


图1 不同膨化温度下对产品休止角的影响

Fig. 1 Effect of different expanding temperatures on the angle of repose

注:A为140~150 °C, B为150~160 °C, C为160~170 °C, D为170~175 °C的膨化米片

Note: A~D were expanded rice under 140-150 °C, 150-160 °C, 160-170 °C and 170-175 °C, respectively

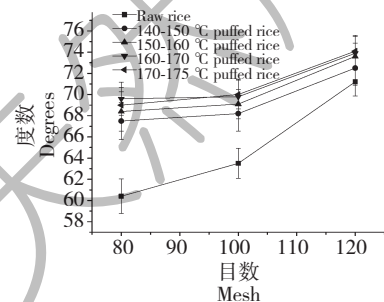


图2 不同膨化温度下对产品滑动角的影响

Fig. 2 Effect of different expanding temperatures on the sliding angle of the product

注:A为140~150 °C, B为150~160 °C, C为160~170 °C, D为170~175 °C的膨化米片

Note: A~D were expanded rice under 140-150 °C, 150-160 °C, 160-170 °C and 170-175 °C, respectively

角呈变大的趋势,且随着目数的增加休止角及滑角也呈现变大的趋势。由于大米经过挤压膨化组织结构发生变化,形成疏松结构,致使颗粒的表面状态、密度、空隙率发生变化,从而使颗粒之间的内摩擦力和粘附力增大。使得粉体与光滑玻璃板之间的摩擦力相对增大,进而导致休止角和滑角增大<sup>[12,13]</sup>。

## 2.3 不同膨化温度下 SEM 微观结构

通过电子显微镜扫描观察,比较了不同膨化温度对天然富硒大米米粉的微观结构的影响。分析扫描电子显微镜图3可以发现,未膨化的富硒大米颗粒表面粗糙,彼此结合疏松,大小不均一(图3E)。挤压膨化后的富硒大米,由于淀粉的糊化,淀粉颗粒增大,相互间距增大且表面变得光滑,内部空腔明显增大,分布均匀,组织疏松,出现类似多孔海绵状结构(图3A、B);但是,当温度超过160 °C后,表面开始出现裂隙,并随着温度的升高,裂隙越明显(图3C、D),其原因是由于变温压差膨化使得物料细胞内部水分瞬间散失,气体的膨胀力会使物料的结构发生改变,细胞结构瞬间被固化,形成疏松的蜂窝状结构<sup>[14]</sup>。

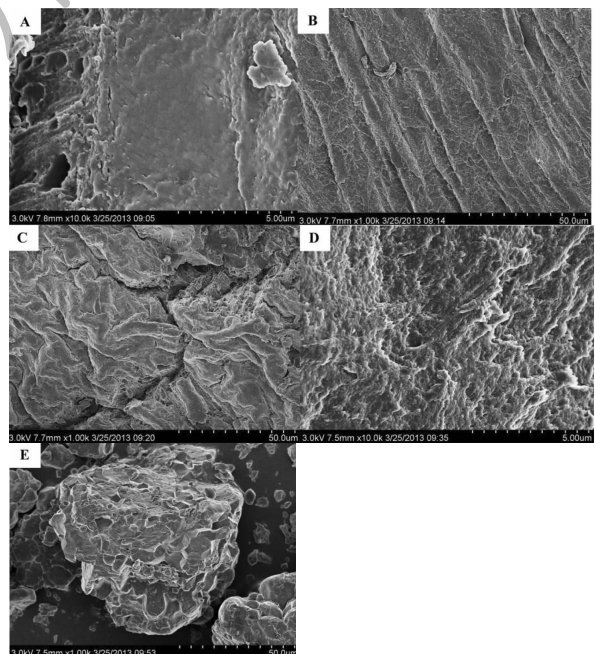


图3 140~150 °C (A)、150~160 °C (B)、160~170 °C (C)、170~175 °C (D)膨化温度及未膨化的天然富硒大米米粉的微观结构 SEM 图

Fig. 3 SEM images of product structure expanded under 140-150 °C (A), 150-160 °C (B), 160-170 °C (C), 170-175 °C (D) and unexpanded (E)

## 2.4 X 衍射扫描结果

晶粒的 X-ray 衍射规律表明,多晶体体系中微晶的衍射特征与微晶粒度的大小有关。根据 Scherrer 方程,晶粒的大小与对应衍射峰的半高宽成反比。这种反比关系在 X-ray 曲线上通过不同的衍射物征表现出来,即当微晶粒度较大时,衍射特征为尖锐的衍射晶峰。而当微晶粒度很小时,衍射特征为弥散的衍射晶峰。对于衍射特征表现为尖锐的衍射晶峰的那部分微晶,因其粒度较大,被称为高级微晶。对于衍射特征表现为弥散的衍射晶峰的那部分微晶,因其粒度较小,被称为初级微晶<sup>[15]</sup>。由图 4E 可知,原大米的 X-ray 衍射线中的高级微晶区明显比其他的要多,且变化性质显著;而在不同温度范围各 X-ray 衍射曲线变化不明显(图 4A~D),这表明原富硒大米(图 4E)淀粉的高级微晶区比不同温度范围膨化挤压后的富硒大米(图 4A~D)淀粉多,是由于富硒大米淀粉在经过挤压后,在热作用和机械力的作用下,原有的晶型被打破,形成了新的晶体结构。原富硒大米(E)淀粉和不同温度范围膨化挤压后的富硒大米(图 4A~D)淀粉的特征结晶峰都集中在 30 度以内的范围。

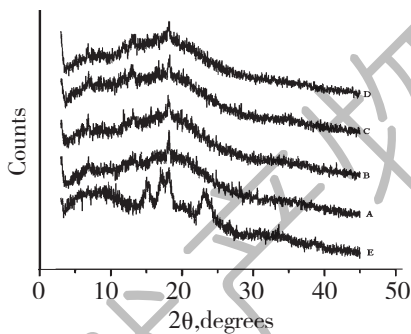


图 4 不同膨化温度下产品的 X 衍射扫描

Fig. 4 X scanning of the products with different expansion temperatures

## 2.5 不同膨化温度对大米硒蛋白质亚基组成的影响

天然富硒大米挤压膨化后大部分淀粉发生糊化,蛋白质提取液中含有大量的糊化淀粉,使得蛋白质的分离和浓缩十分困难,为此,实验对不同膨化温度各产品中总蛋白质进行了电泳分析。

从电泳图 5 中可知,挤压膨化前后的富硒大米中蛋白质,在组成上发生了很大的变化,但在不同温度范围内膨化后的米粉蛋白质的组成没有发生变化。比较膨化前后的蛋白谱带组成可以发现,富硒

大米(挤压膨化前,图谱中 E 带)的全蛋白质由分子量为 15.0、25.0、28.0、40.0、55.0 kD 的谱带组成,而挤压膨化物的全蛋白质由分子量为 15.0、28.0、40.0、85.0 kD 的谱带组成,富硒原大米(图谱中 E 带)的全蛋白质中没有分子量为 85.0 kD 的谱带,但多了 25.0 kD 的谱带,这说明,天然富硒大米经挤压膨化后,造成了蛋白质亚基聚合,使全蛋白质中出现了高分子量的亚基。蛋白质分子在高剪切作用下分解并进行重组反应<sup>[16]</sup>。

由于在高温、高压和高剪切作用下,膨化米粉中蛋白质的三级和四级结构发生破坏,使得蛋白质的分子结构的伸展、表面电荷分布不均匀以及分子间氢键和二硫键断裂等原因导致蛋白质变性,从而形成了新的高分子量的亚基(图 5)。

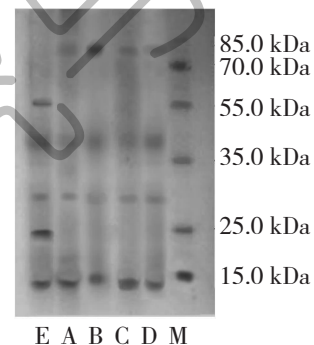


图 5 不同膨化温度下产品中总蛋白质的 SDS-PAGE 图  
Fig. 5 SDS-PAGE plot of total protein in products with different expanding temperatures

Band E: protein extracted from the raw Se-riched rice; band A: protein extracted from puffed rice at 140-150 °C; band B: protein extracted from puffed rice at 150-160 °C; band C: protein extracted from puffed rice at 160-170 °C; band D: protein extracted from puffed rice at 170-1175 °C; M: standard markers

## 2.6 不同膨化温度对氨基酸组成的影响

经膨化挤压过程中,蛋白质的生物学效价和蛋白质的组成(如图 5)会发生变化,而氨基酸组成也随着发生改变。如表 2 所示,在不同温度范围内经膨化挤压后富硒大米蛋白中氨基酸的组成与原富硒大米蛋白中氨基酸组成相比,都有下降趋势。但不同温度范围经膨化挤压后富硒大米蛋白中氨基酸的组成之间,有些氨基酸下降程度大,有些不太明显。由表 2 中可知,在较温和的条件下加工(160 °C)由于挤压使某些抗营养因子失活,并形成易受酶作用的蓬松结构,同时蛋白质的部分降解使大部分氨基酸含量升高,在 140~150 °C(表 2 中 A)和 150~

160 ℃ (表 2 中 B) 温度范围内, 氨基酸含量升高有缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、色氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸、酪氨酸和丙氨酸。在整个不同温度范围内, 变化最大的是半胱氨酸, 在原富硒大米蛋白中半胱氨酸为 0.022 mol/kg, 挤压膨化后, 其含量为 0; 同时, 蛋

氨酸和赖氨酸的含量也随着温度的升高而下降, 与在 A 温度范围内相比, 赖氨酸损失分别为 11.30%、33.90%、47.16%; 蛋氨酸损失分别为 9.85%、39.40%、42.30%。

表 2 不同膨化温度对氨基酸组成的影响

Table 2 Effect of different puffing temperatures on the content of total amino acids

氨基酸 Amino acid (%)	A	B	C	D	E
苏氨酸 Threonine	0.136	0.128	0.094	0.077	0.211
缬氨酸 Valine	0.279	0.305	0.243	0.191	0.456
异亮氨酸 Isoleucine	0.676	0.750	0.565	0.491	1.132
亮氨酸 Leucine	0.306	0.348	0.256	0.208	0.517
赖氨酸 Lysine	0.106	0.094	0.070	0.056	0.183
色氨酸 Tryptophan	0.156	0.178	0.135	0.104	0.269
蛋氨酸 Methionine	0.071	0.064	0.043	0.041	0.150
苯丙氨酸 Phenylalanine	0.175	0.198	0.154	0.123	0.272
天门冬氨酸 Aspartic acid	0.400	0.382	0.311	0.237	0.558
酪氨酸 Tyrosine	0.083	0.115	0.073	0.069	0.189
丝氨酸 Serine	0.237	0.225	0.172	0.135	0.368
谷氨酸 Glutamic acid	0.849	0.919	0.683	0.574	1.389
甘氨酸 Glycine	0.356	0.358	0.284	0.221	0.479
组氨酸 Histidine	0.083	0.090	0.071	0.056	0.123
精氨酸 Arginine	0.246	0.254	0.186	0.141	0.389
半胱氨酸 Cysteine	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022
脯氨酸 Proline	0.291	0.319	0.256	0.229	0.442
丙氨酸 Alanine	0.339	0.360	0.282	0.227	0.539

注: A 为 140 ~ 150 ℃、B 为 150 ~ 160 ℃、C 为 160 ~ 170 ℃、D 为 170 ~ 175 ℃ 的膨化米粉中质白蛋白中的氨基酸组成, E 为未膨化的大米中质白蛋白中的氨基酸组成

Note: A ~ D were amino acid composition of expanded rice under 140-150 ℃, 150-160 ℃, 160-170 ℃ and 170-175 ℃, respectively; E was amino acid composition of unexpanded rice

### 3 讨论与结论

通过研究不同的膨化挤压温度下对天然富硒大米粉中蛋白和淀粉的物理化学性质的影响。结果表明, 在不同膨化温度下, 随着膨化温度升高, 水分损失量呈增大趋势, 米粉的溶解率和沉淀吸水率增加; 随着膨化温度升高, 膨化后样品粉体的休止角及滑角呈变大的趋势; 并且, 扫描电子显微镜的结果表明, 随着膨化温度升高, 由于淀粉的糊化, 淀粉颗粒增大, 相互间距增大且表面变得更光滑, 内部空腔明显增大, 但各 X-ray 衍射曲线变化不明显。

在各类挤压膨化食品中, 淀粉质食品占最主要部分。淀粉是谷物食品中的主要组成成分, 天然谷物中淀粉吸水性很小、口感差, 不易被淀粉酶分解,

难以被人体消化吸收; 淀粉糊化后, 吸水性变大, 易受淀粉酶作用, 提高了在人体内的消化吸收率。淀粉是谷物中的主要成分, 因此淀粉的糊化在谷物食品加工过程中是最重要的变化。早餐谷物在挤压过程中, 淀粉粒解体, 淀粉被充分糊化, 在挤出瞬间蒸发掉部分水分, 使  $\alpha$ -化定型, 不易回生, 形成膨化食品的骨架, 也延长了食品货架期。

不同膨化温度对天然富硒大米粉之间的蛋白质组成没有发生明显变化, 但天然富硒大米经挤压膨化后, 造成了蛋白质亚基聚合, 使全蛋白质中出现了高分子量的亚基; 不同膨化温度对氨基酸含量与原富硒大米相比, 都有变化, 有些氨基酸变化更明显 (半胱氨酸、蛋氨酸和赖氨酸)。谷物进行挤压膨化过程中, 由于高温、高压、高剪切力以及热能的作用,

破坏了蛋白质的三、四级结构,使大分子的蛋白质发生降解成为小分子的肽和氨基酸,氨基酸极易与早餐谷物中的糖类发生美拉德反应,导致蛋白质含量减少<sup>[17]</sup>。在挤压过程中,蛋白质分子结构由折叠状伸展为直线状,发生变性。挤压膨化过程中蛋白质分子发生变性,更容易受到酶的作用,蛋白质分子降解,从而提高了蛋白质的消化率。挤压加工也可以破坏谷物中干扰蛋白质消化的化合物,从而提高蛋白质的消化吸收率。挤压加工也会降低某些蛋白质的营养价值。在挤压过程中物料中淀粉降解产生的还原糖及其他羰基化合物,会与物料中的游离氨基酸及挤压过程中蛋白质降解产生的游离氨基酸发生美拉德反应,从而限制了某些氨基酸的吸收,降低了蛋白质的效价。

#### 参考文献

- 1 Frost DV. Selenium in biology. *Ann Rev Pharmacol Toxicol*, 1975, 15:259-284.
- 2 Hou J, Wang T, Liu M, *et al.* Suboptimal selenium supply a continuing problem in Keshan disease areas in Heilongjiang province. *Biol Trace Element Res*, 2011, 143:1255-1263.
- 3 Hu QH(胡秋辉), Zhu JC(朱建春). Biological geochemistry and selenium in food Chain. *Rural Eco-Environ*(农村生态环境), 2000, 16(4):54-57.
- 4 Zhou Y(周越), Wu WL(吴文良), Meng FQ(孟凡乔), *et al.* Review on the content, specification of selenium and its availability in soils. *J Agric Resour Environ*(农业资源与环境学报), 2014, 31:527-532.
- 5 Wang HW(王洪武), Zhou JG(周建国), Lin BJ(林炳鉴). Effect of processing variables of twin-screw extrusion to texturization of compound soybean protein. *J Chin Cereals Oils Assoc*(中国粮油学报), 2001, 16(2):54-58.
- 6 Liu CX(刘春雪), Gao LH(高立海), Cheng ZJ(程宗佳). Effects of extrusion on the nutritional components and digestibility of aquatic feed. *China Feed*(中国饲料), 2003, 14:1-19.
- 7 Wu WG(吴卫国), Yang WL(杨伟丽), Tang SZ(唐书泽), *et al.* Effects of main ingredients on extrusion of breakfast cereals. *J Chin Cereals Oils Assoc*(中国粮油学报), 2005, 20(4):54-59.
- 8 Gu L(顾林), Lu ML(鲁茂林). Functional properties of extruded Jobstear Seeds. *Food Machin*(食品与机械), 1999, 4:24-25.
- 9 Van Den Einde RM, Van Der Goot AJ, Boom RM. Understanding molecular weight reduction of starch during heating-shearing process. *J Food Sci*, 2003, 68:2396-2404.
- 10 Yang K(杨颖), Du XF(杜先锋). Optimization of drum drying parameters for Se-enriched germinated brown rice. *J Anhui Agric Univ*(安徽农业大学学报), 2012, 39:590-596.
- 11 Han YB(韩永斌), Liu GL(刘桂玲), Shi XY(史晓媛), *et al.* Effects of extrusion on physiochemical property of germinated brown rice. *J Chin Cereals Oils Assoc*(中国粮油学报), 2010, 25(12):1-5.
- 12 Robin F, Dubois C, Pineau N, *et al.* Process, structure and texture of extruded whole wheat. *J Cereal Sci*, 2012, 56:358-366.
- 13 Vasanthan T, Gaosong J, Yeung J, *et al.* Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chem*, 2002, 77:35-40.
- 14 Kim YY, Mahan DC. Comparative effects of high dietary levels of organic and inorganic selenium on selenium toxicity of growing finishing pigs. *J Anim Sci*, 2001, 79:942-948.
- 15 Crowe TW, Johnson LA. Twin-screw extrusion texturization of extruded-expelled soybean flour. *J Am Oil Chem Soc*, 2001, 78:781-786.
- 16 Chandi G, Sogi D. Functional properties of rice bran protein concentrates. *J Food Eng*, 2007, 79:592-597.
- 17 Wang L(王亮), Zhou HM(周惠明), Qian HF(钱海峰). Progress study on breakfast cereals III. Changes in ingredient of materials during extrusion. *J Cereals Oils*(粮食与油脂), 2005, 8:11-15.