

# 热处理对水媒法制备的亚麻籽分离蛋白 挥发性风味成分和功能性质的影响

孙 旦, 华欲飞, 李兴飞

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**以脱壳亚麻籽为原料,采用水媒法制备亚麻籽分离蛋白(FPI)。研究了热处理对FPI亚基组成、挥发性物质种类和含量及其功能性质的影响。结果表明:随着热处理时间的延长,FPI亚基的聚集与解离加剧,当95℃加热10 min时,FPI的亚基组成即可发生较大的变化,35~50 kDa的亚基能够迅速解离;热处理后FPI中挥发性物质从32种增加至42种,主要种类仍为醛类、醇类和酮类,但呈现树叶味、青草味的风味物质减少,而呈现油脂味、烧焦味、烤香味的风味物质增加;在pH 7.0时,经热处理的FPI的溶解性从30%降至25%,而大豆分离蛋白(SPI)的溶解性从95%降至35%。热处理后,FPI的乳化活性从17.43 m<sup>2</sup>/g升高至26.03 m<sup>2</sup>/g,乳化稳定性由43.28 min降至37.45 min,而持水性与持油性均无明显变化。

**关键词:**亚麻籽分离蛋白;热处理;挥发性物质;功能性质

中图分类号:TS221;TS229

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2020)10-0028-07

## Effects of heat treatment on the volatile flavor components and functional properties of flaxseed protein isolate prepared in aqueous medium

SUN Dan, HUA Yufei, LI Xingfei

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

**Abstract:** Flaxseed protein isolate (FPI) was prepared from dehulled flaxseeds in aqueous medium. The effects of heat treatment on the composition of FPI subunits, types and contents of volatile substances, and the functional properties of FPI were studied. The results showed that the aggregation and dissociation of protein subunits increased with the extension of heat treatment time. When heated at 95 °C for 10 min, the subunits of FPI changed greatly, and the subunits with relative molecular weights of 35 – 50 kDa could be rapidly dissociated. The volatile substances in FPI increased from 32 types to 42 types after heat treatment at 95 °C for 10 min, and the main types were still aldehydes, alcohols and ketones, but the flavor substances with leaf and grass flavor decreased, while the flavor substances with oil, burnt and roasted flavor increased. After heat treatment, the solubility of FPI at pH 7.0 decreased from 30% to 25%, while that of SPI decreased from 95% to 35%. In addition, the emulsifying activity of FPI increased from 17.43 m<sup>2</sup>/g to 26.03 m<sup>2</sup>/g, the emulsion stability decreased from 43.28 min to 37.45 min, but water holding capacity and oil holding capacity had no significant change.

**Key words:** flaxseed protein isolate; heat treatment; volatile substance; functional property

亚麻籽是一种高蛋白油料作物,主要营养成分为

油脂和蛋白质,含量分别为36%~48%和10.5%~31%,还有较高含量的膳食纤维、木酚素、维生素以及矿物质等成分<sup>[1]</sup>。亚麻籽是 $\alpha$ -亚麻酸最丰富的来源之一, $\alpha$ -亚麻酸占亚麻籽油的45%~52%<sup>[2]</sup>。亚麻籽蛋白主要由盐溶性的高相对分子质量组分(11S~12S)和水溶性的低相对分子质量组分

收稿日期:2020-01-02;修回日期:2020-05-25

作者简介:孙 旦(1995),女,在读硕士,研究方向为油脂与植物蛋白(E-mail)969631515@qq.com。

通信作者:华欲飞,教授,博士(E-mail)yfh@jiangnan.edu.cn。

(1.5S~2S)组成<sup>[3-4]</sup>。亚麻籽蛋白的必需氨基酸组成与大豆蛋白接近,富含精氨酸、天门冬氨酸和谷氨酸等<sup>[5]</sup>。有研究表明亚麻籽分离蛋白的持水性、乳化性和起泡性比大豆分离蛋白更好<sup>[6]</sup>,为一种优质的蛋白质来源,可广泛应用于食品加工行业。亚麻籽蛋白因其较高的营养价值和良好的加工特性,近年来成为国内外学者的热门研究对象。目前,亚麻籽分离蛋白的制备均以冷榨饼或有机溶剂脱脂粕为原料,冷榨饼残油率仍较高,为提高产品的蛋白质含量,一般会对冷榨饼再次进行有机溶剂脱脂处理<sup>[7-8]</sup>,显然对简化工艺无益。本研究采用水媒法直接从全脂脱壳亚麻籽中提取蛋白,并通过冷冻破乳回收亚麻籽油,全过程不引入有机溶剂与酶制剂,更加符合绿色的加工理念。

目前,对亚麻籽蛋白功能性质的研究报道较多,而研究加热对其功能性质的影响尚鲜见报道。热处理是亚麻籽蛋白在工业生产中必不可少的环节,不仅可以达到灭菌的目的,而且适当的热处理可改善亚麻籽蛋白的功能性质。而热处理可能会对亚麻籽蛋白的结构、风味以及功能性质造成一定的影响。本文详细研究了亚麻籽分离蛋白热处理后的挥发性风味物质的变化以及加热后蛋白亚基与功能性质之间的变化规律,以期对亚麻籽分离蛋白的风味品质与功能性质的提高提供借鉴作用。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

脱壳亚麻籽,青岛德慧海洋生物科技有限公司;大豆分离蛋白(SPI),山东禹王实业有限公司;玉米胚芽油,无锡市欧尚超市;氢氧化钠、硫酸、盐酸、苯酚等,国药集团化学试剂有限公司;溴酚蓝、考马斯亮蓝 G250、丙烯酰胺,上海 Sigma - Aldrich 有限公司;电泳标准分子蛋白,上海伯乐生命医学产品有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

HimacCR21G II型冷冻离心机,日本 Hitachi 公司;K9840 半自动凯氏定氮仪,济南海能仪器股份有限公司;FA25 高速剪切乳化机,上海弗鲁克流体机械制造有限公司;UV - 2100 紫外可见分光光度计,尤尼科上海有限公司;SCIONSQ - 456 - GC 气质联用仪,美国 Bruker 公司;PHS - 3C pH 计,梅特勒 - 托利多仪器(上海)有限公司;ChemiDoc XRS + 凝胶成像仪,美国 Bio - Rad 公司;MODEL BE - 210 型垂直电泳仪,日本 BIO CRAFT 公司;LGJ - 18 型冷冻干燥机,北京四环科学有限公司;电动石磨,济南中

阳石磨电器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 亚麻籽分离蛋白(FPI)的提取

脱壳亚麻籽与去离子水按料水比 1:2 混合,室温浸泡 12 h。用电动石磨充分研磨后,按料水比 1:10 加入去离子水。用 2 mol/L 的 NaOH 溶液调节浆液 pH 至 9.0,搅拌提取 1 h 后,用 200 目纱布过滤。滤渣中加入去离子水进行二次碱提,合并滤液,总料水比为 1:15。滤液在 4℃、18 000 r/min 离心 15 min,弃去下层沉淀,收集上层乳状液,经过冷冻破乳回收亚麻籽油。收集中间层上清液,用 2 mol/L 的 HCl 溶液调节上清液 pH 至 4.5,4 000 r/min 离心 10 min,沉淀加入等体积的去离子水充分分散,用 2 mol/L 的 NaOH 调节 pH 至 7.0,得亚麻籽分离蛋白溶液。取一部分蛋白溶液在 95℃ 下加热 10 min 后冷冻干燥,其余蛋白溶液直接冷冻干燥,均于 4℃ 冰箱保存备用。

#### 1.2.2 基本成分分析

蛋白质含量参照 GB 5009.5—2016 中凯氏定氮法进行测定;脂肪含量参照 GB 5009.6—2016 中酸水解法进行测定;总糖含量采用苯酚硫酸法<sup>[9]</sup>进行测定;灰分含量参照 GB 5009.4—2010 进行测定;水分含量参照 GB 5009.3—2016 中直接干燥法进行测定。

#### 1.2.3 蛋白组分的分析

将 1.2.1 得到的亚麻籽分离蛋白溶液以及 SPI 分别配制成蛋白质质量浓度为 0.02 g/mL 的溶液,在 95℃ 下分别加热 0、10、20、30 min,然后参考 Laemmli 等<sup>[10]</sup>的方法采用 SDS - PAGE 电泳分析蛋白样品的亚基组成。蛋白样品与样品溶解液(4% SDS,48% 甘油,pH 6.8 的 0.125 mol/L Tris - HCl 缓冲液,0.01% 溴酚蓝)充分混合,样品最终蛋白质质量浓度为 2 mg/mL,上样量为 10 μL。电泳完成后进行固定、染色并脱色,用化学发光凝胶成像仪拍照,用 Image Lab 3.0 定量分析蛋白条带的强度,并计算条带的相对含量。

#### 1.2.4 挥发性风味成分的测定

参照孙灵湘等<sup>[11]</sup>使用的 HS - SPME 和 GC - MS 条件,测定亚麻籽分离蛋白中的挥发性风味成分。将 1.2.1 制备的未经热处理与热处理的 FPI 样品配制成蛋白质质量浓度为 0.06 g/mL 的溶液后,测定其挥发性风味成分。测得的挥发性化合物由计算机检索,通过质谱数据库(NIST 和 WILEY 数据库)检索结果与标准化合物进行对比,对匹配度大于 800 的挥发性物质进行定性,用峰面积归一化法

计算各挥发性成分的相对含量。

### 1.2.5 溶解性的测定<sup>[12]</sup>

将 1.2.1 制备的未经热处理与热处理的 FPI 样品配制成蛋白质质量浓度为 2 mg/mL 的溶液(以相同蛋白质质量浓度的未经热处理的 SPI 及 95 °C 下加热 10 min 的 SPI 作为对照,下同),用 2 mol/L HCl 和 2 mol/L NaOH 调节至所需 pH,搅拌 1 h 后在室温、10 000 g 条件下离心 30 min,采用凯氏定氮法测定上清的蛋白质含量和样品中总蛋白质含量,按下式计算溶解性。

$$\text{溶解性} = \frac{\text{上清中蛋白质质量}}{\text{样品中总蛋白质质量}} \times 100\%$$

### 1.2.6 乳化活性和乳化稳定性的测定<sup>[12]</sup>

将 1.2.1 制备的未经热处理与热处理 FPI 样品配制成蛋白质质量浓度为 1 mg/mL 的溶液,取 15 mL FPI 溶液与 5 mL 玉米胚芽油混合,13 000 r/min 下剪切 1 min 后立即从底部取 20 μL 乳液,与 5 mL 0.1% 的 SDS 溶液混合,在 500 nm 处测定吸光度,记为  $A_0$ 。乳液静置 30 min 后采用相同方法测定吸光度,记为  $A_{30}$ 。按下式计算乳化活性(EAI)与乳化稳定性(ESI)。

$$EAI = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{C \times \varphi \times 10\,000}$$

$$ESI = \frac{A_0}{A_0 - A_{30}} \times 30$$

式中: $N$  为稀释倍数,251; $C$  为样品溶液中蛋白质质量浓度,mg/mL; $\varphi$  为油相体积分数,0.25。

### 1.2.7 持水性与持油性的测定<sup>[12]</sup>

称取约 0.5 g 冻干的未经热处理与经热处理的 FPI 样品,分别分散于 10 mL 去离子水和玉米胚芽油中,搅拌 30 min 后 4 000 g 下离心 20 min。小心地吸去上清,用沉淀中蛋白样品吸得的水或油的质量与蛋白样品的质量的比值表示持水性或持油性。

### 1.2.8 数据处理

实验均重复 3 次,采用 Origin 对数据进行分析 and 绘图,结果用“平均值 ± 标准偏差”表示,使用 SPSS 软件对数据进行显著性分析( $P < 0.05$  表示具有显著性差异)。

## 2 结果与讨论

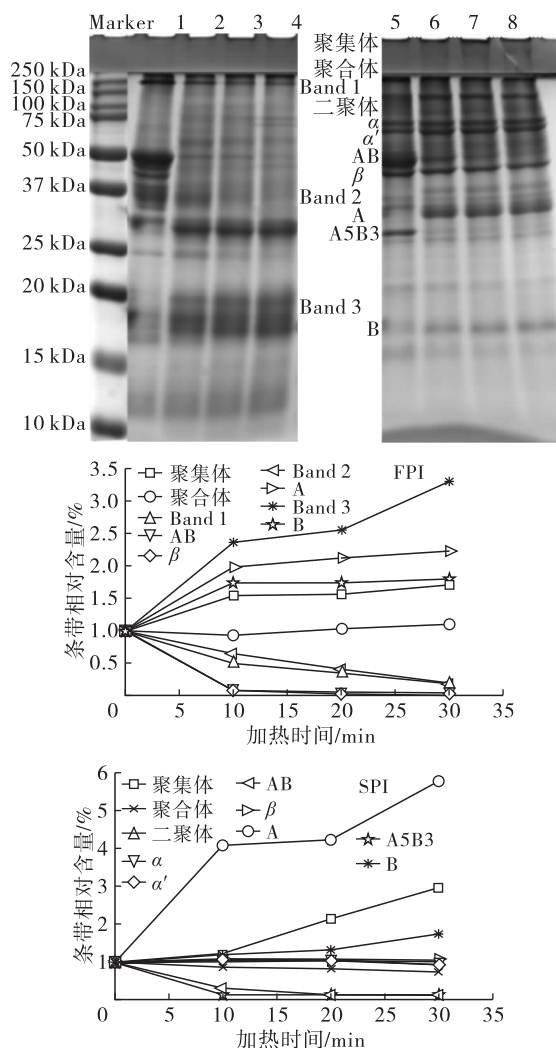
### 2.1 FPI 的基本成分

脱壳亚麻籽的蛋白质、脂肪、总糖和灰分干基含量分别为 23.25%、51.07%、4.72% 和 4.32%。亚麻籽中高脂肪含量限制了直接从亚麻籽中提取高蛋白含量的亚麻籽分离蛋白。与普通高速打浆相比,

本文采用电动石磨进行低速磨浆,能够保留更多完整的油体,使其更容易在离心过程中进入上层乳状液相,从而有效地分离油脂与蛋白质。进一步实验发现,此工艺条件获得的乳状液容易通过冷冻而破乳,因此游离油能够进一步被回收利用。冷冻破乳的最优工艺为:乳状液 pH 4.5, -18 °C 冷冻 18 h 后,50 °C 解冻 1 h。破乳后通过离心回收游离油。乳状液的破乳率可达 94%,最终游离油的回收率为 79.11%,FPI 的提取率为 50.10%。FPI 的蛋白质、脂肪、总糖和灰分干基含量分别为 91.18%、5.78%、1.82% 和 1.10%。

### 2.2 热处理对 FPI 亚基的影响

FPI 与 SPI 的非还原 SDS-PAGE 图谱及条带定量分析见图 1。



注:泳道 1、2、3、4 分别为 FPI(0.02 g/mL, pH 7.0) 溶液在 95 °C 下加热 0、10、20、30 min;泳道 5、6、7、8 分别为 SPI(0.02 g/mL, pH 7.0) 在 95 °C 下加热 0、10、20、30 min。

图 1 FPI 与 SPI 的非还原 SDS-PAGE 图谱及条带定量分析

由图 1 可见:经热处理后, FPI 进样槽口残留的

不溶性聚集体含量增加,但随着加热时间的延长无明显变化;250 kDa 以上的可溶性聚合体条带随着加热时间的延长无明显变化;200 kDa 处的 Band 1 随加热时间的延长逐渐变浅,可能解离成了相对分子质量更小的肽链;相对分子质量 35 ~ 50 kDa 附近的蛋白组分(AB 亚基, $\beta$  亚基与相对分子质量 37 kDa 的 Band 2 为主)经加热后消失较快;A 亚基与 B 亚基的含量随着加热时间延长而逐渐增加,相对分子质量 20 kDa 的 Band 3 含量也随着加热时间延长而增加。可见,热处理能使一些亚基发生解离形成小分子肽链,也可导致一些肽链聚集成大分子的聚合体或不溶性聚集体。随着加热时间的延长,SPI 进样槽口残留的聚集体含量增加比 FPI 程度更大,分离胶中的条带也随加热时间延长而逐渐加深,原因可能为蛋白质热变性程度加剧,形成大分子不溶性聚集体;SPI 中 7S 组分( $\alpha$ 、 $\alpha'$  和  $\beta$ )含量无明显变化,而 11S(包括 A 肽链和 B 肽链)随加热发生变化;AB 亚基含量随加热时间延长而减少,而解离后 A 肽链和 B 肽链的含量增加;A5B3 加热后消失,可能生成了不溶性沉淀。也有研究报道,100 °C 热处理能够使 7S 和 11S 全部变性,解离生成不溶性沉淀,继续加热又使其与可溶性亚基聚集形成可溶性的聚集体,从而提高蛋白溶解性<sup>[13]</sup>。图 1 定量分析结果表明,热处理后各蛋白亚基的含量发生明显的变化,并且随着加热时间的延长呈现一定的变化规律。不同的蛋白组分具有不同的溶解性,加热后相互之间能够发生复杂的解离或者聚集,导致加热后蛋白质的功能性质发生改变,这也与加热的程度有密切的联系。

### 2.3 热处理对 FPI 挥发性物质的影响

利用 GC-MS 分别对未加热与加热的 FPI 中的挥发性物质进行分析,总离子流图如图 2 所示。由图 2 可见,加热后,FPI 出峰数量明显增多,对两个样品的挥发性组分进行详细分析,结果如表 1 所示。由表 1 可见,未经热处理的 FPI 中检出 32 种挥发性物质,主要包含 4 种类型的挥发性物质,即醛类(相对含量为 75.07%)、醇类(相对含量为 12.27%)、酮类(相对含量为 9.99%)和其他类(相对含量为 2.68%)。加热后两种醇类物质(2-戊烯-1-醇和 1-环己基-2-烯-1-醇)消失,产生了 12 种新的挥发性物质,共检出 42 种挥发性风味物质,包括醛类(相对含量为 54.30%)、醇类(相对含量为 18.74%)、酮类(相对含量为 11.09%)以及其他类(相对含量为 15.89%)。在其他类中,加热后不愉快的风味物质增加,如甲氧基苯基肟相对含量从

1.17% 增加至 7.78%;呈现油脂味的 2-乙基呋喃和 2-正戊基呋喃分别从 0.42% 和 0.06% 增加至 3.52% 和 0.40%。

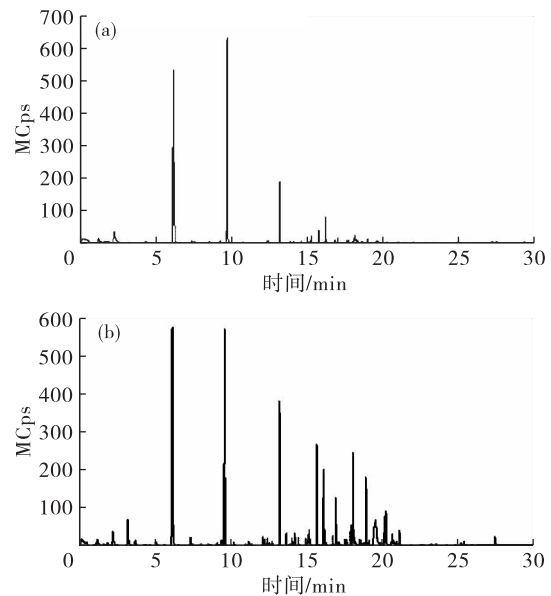


图 2 FPI(a)和热处理 FPI(b)的 GC-MS 总离子流图

未经热处理的 FPI 最主要的挥发性风味物质为反式-2-己烯醛(相对含量为 35.08%)、己醛(相对含量为 34.22%)、正己醇(相对含量为 7.94%)、2-丁酮(相对含量为 6.05%)、(3E,5E)-3,5-辛二烯-2-酮(相对含量为 3.94%)和庚二烯醛(相对含量为 2.63%)。在大豆蛋白制品中,己醛和反式-2-己烯醛的产生机制主要为脂肪氧化酶 LOX 催化亚油酸或亚麻酸的加氧反应,生成具有共轭双键的脂肪酸氢过氧化物,进而在裂解酶的作用下分解生成,这两种物质是豆腥味最主要的来源<sup>[14]</sup>。其中,反式-2-己烯醛呈现树叶味,己醛和正己醇呈现青草味,庚二烯醛呈现油炸、油脂味<sup>[15]</sup>。加热处理后反式-2-己烯醛、己醛和 2-丁酮这些主要的挥发性物质的相对含量有所降低,但仍是主要的挥发性物质。此外,加热处理后,甲氧基苯基肟、2-乙基呋喃、烯丙基正戊基甲醇这 3 种物质的相对含量也较高,分别为 7.78%、3.51% 和 4.90%。经热处理后,FPI 中主要的挥发性风味物质含量发生明显变化,己醛(相对含量为 19.67%)和反式-2-己烯醛(相对含量为 17.54%)含量最高,其次依次为正己醇(相对含量为 8.52%)、庚二烯醛(相对含量为 7.63%)、(3E,5E)-3,5-辛二烯-2-酮(相对含量为 6.86%)和 2-丁酮(相对含量为 2.50%)。可见,加热之后 FPI 释放出了更多的风味物质,呈现树叶味、青草味的风味物质相对减少,呈现油脂味、烧焦味、烤香味的风味物质增加,如新产生的糠醛类呈

现浓郁的烤香味,而含量增加明显的呋喃类呈现烧焦味<sup>[16]</sup>。有研究表明,呋喃类物质主要由亚油酸等游离态的多不饱和脂肪酸被氧化而生成<sup>[17]</sup>,加热能够抑制酶活,同时,加热过程中可能混入更多空气,反而对脂质氧化反应具有促进作用。FPI 溶液是一

种混合的体系,除了蛋白质以外,还存在干基含量为 5.78% 的脂类物质和少量的糖类物质,可能适当的热处理能够促进这些物质发生化学作用而产生更多的风味物质,具体机制仍待进一步研究。

表 1 FPI 和热处理 FPI 中挥发性物质的相对含量

编号	出峰时间/min	挥发性物质	相对含量/%	
			FPI	热处理 FPI
1	3.752	2-丁酮	6.05	2.50
2	4.671	2-乙基呋喃	0.42	3.51
3	5.144	戊醛	0.14	0.62
4	6.458	顺,反-巴豆醛	0.56	0.69
5	7.463	己醛	34.22	19.67
6	8.593	反式-2-戊烯醇	0.77	0.82
7	8.752	3-己烯醛	0.79	0.20
8	9.701	1-五烯-3-醇	0.36	0.10
9	10.528	2-正戊基呋喃	0.06	0.40
10	10.735	反式-2-己烯醛	35.08	17.54
11	11.292	3-丙基-1-环己烯	nd	0.28
12	12.226	2-壬酮	nd	0.48
13	13.120	2,3-辛二酮	nd	0.65
14	13.385	(E)-2-庚烯醛	0.47	0.48
15	13.385	2-戊烯-1-醇	0.43	nd
16	13.401	6-辛烯-2-酮	nd	0.60
17	13.534	2-戊烯-1-醇	nd	0.32
18	14.163	正己醇	7.94	8.52
19	14.569	壬醛	0.28	0.74
20	14.948	2,4-己二烯醛	0.32	0.60
21	15.122	反式-2-己烯-1-醇	0.23	0.99
22	15.340	2-辛烯醛	0.31	0.49
23	15.810	1-辛烯-3-醇	0.42	0.44
24	16.501	庚二烯醛	2.63	7.63
25	16.913	(3E,5E)-3,5-辛二烯-2-酮	3.94	6.86
26	16.975	苯甲醛	0.07	0.98
27	17.493	辛醇	0.56	0.61
28	17.862	反,顺-2,6-壬二醛	nd	0.23
29	18.255	反式-2-辛烯醇	0.50	0.46
30	18.352	2-异丙基环丙烷甲醇	0.40	0.52
31	18.617	2-乙基丁酸烯丙酯	0.29	1.37
32	18.750	烯丙基正戊基甲醇	nd	4.90
33	18.865	碳酸甲基壬基酯	0.55	0.87
34	19.170	2,4-戊二烯-1-醇	0.23	0.42
35	19.255	(2Z)-2,4-戊二烯-1-醇	nd	0.30
36	19.758	2-癸醇	nd	0.34
37	20.161	甲氧基苯基肟	1.17	7.78
38	20.724	2,4-癸二烯庚烯醛	0.20	1.79
39	20.818	2,4-二甲基苯甲醛	nd	2.02
40	21.276	辛酸	0.12	0.61
41	21.467	2-甲基-1-壬-3-炔	nd	0.26
42	21.491	1-环己基-2-烯-1-醇	0.43	nd
43	21.670	(1-丁内酯)环己烷	0.07	0.81
44	27.633	5-羟甲基糠醛	nd	0.62

注:nd 表示未检出。

## 2.4 热处理对 FPI 功能性质的影响

### 2.4.1 热处理对 FPI 溶解性的影响(见图 3)

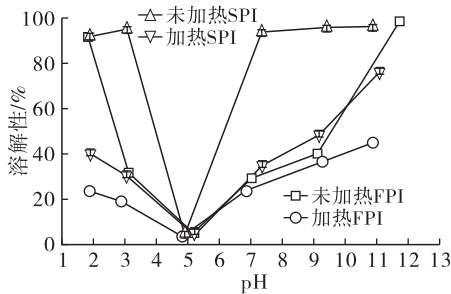


图3 热处理对 FPI 与 SPI 溶解性的影响

由图3可知, FPI与SPI的溶解性随pH变化的关系均呈“V”型,在等电点附近溶解性均最低,随着pH远离等电点,溶解性逐渐增大。因为等电点附近两种蛋白质所带电荷为零,溶解度最小,当pH远离等电点时,由于蛋白质表面所带电荷增加,静电斥力增大,溶解度会提高<sup>[18]</sup>。不同之处在于, SPI在pH 7.0或pH 3.0下,溶解性已经高达95%,继续增大或者减小pH,其溶解性趋于稳定甚至减小。而FPI在远离等电点时,溶解性增加较

缓慢,在中性条件下, FPI的溶解性仅30%,在极端的酸碱条件下, FPI的溶解性可达到95%。经过热处理,在pH 2.0和pH 11.0下, FPI的溶解性大大降低,而在其他pH下,溶解性降低程度较小。在中性条件下, FPI的溶解性从30%降至25%,而SPI在等电点以外的pH下溶解性降低程度均较大。结合2.2的SDS-PAGE分析结果,加热能够使一些可溶性的蛋白质发生聚集而沉淀,这也是蛋白质溶解性降低的原因之一。FPI在偏中性的条件下,各蛋白组分含量变化明显,但溶解性变化较小,这可能是两方面共同作用的结果:一方面可能因为适当加热使一些难溶性的组分解聚而溶解,另一方面由于一些组分受热变性生成了不溶性的沉淀,导致溶解性降低。亦有研究表明<sup>[19]</sup>,高温作用使FPI溶解性降低,原因为蛋白质分子结构展开,非极性基团暴露,导致与水的氢键作用力减弱而降低FPI的溶解性。

2.4.2 热处理对 FPI 乳化特性以及持水性、持油性的影响(见表2)

表2 热处理对 FPI 与 SPI 乳化特性以及持水性、持油性的影响

样品	乳化活性/(m <sup>2</sup> /g)	乳化稳定性/min	持水性/%	持油性/%
FPI	17.43 ± 0.43 <sup>c</sup>	43.28 ± 0.28 <sup>b</sup>	370 ± 4 <sup>b</sup>	300 ± 24 <sup>b</sup>
SPI	22.01 ± 1.01 <sup>b</sup>	45.59 ± 0.59 <sup>a</sup>	343 ± 8 <sup>c</sup>	157 ± 18 <sup>c</sup>
加热 FPI	26.03 ± 1.03 <sup>a</sup>	37.45 ± 0.45 <sup>d</sup>	344 ± 9 <sup>bc</sup>	294 ± 21 <sup>b</sup>
加热 SPI	16.47 ± 0.47 <sup>c</sup>	40.85 ± 0.85 <sup>c</sup>	650 ± 16 <sup>a</sup>	452 ± 20 <sup>a</sup>

注:同一列中不同字母表示具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

由表2可见, FPI的乳化特性略逊于SPI,经过热处理后SPI的乳化活性与乳化稳定性均降低,而FPI的乳化活性有所上升。可能的原因为FPI加热后溶解性略有降低,疏水性提高,能够加快蛋白质分子在油水界面的移动,而SPI加热后溶解性降低程度大,虽然疏水性提高,但是不溶性聚集体的含量也提高,此时蛋白质分子的柔顺性差,不利于分子在界面重排。因此,适当的加热有利于FPI具有更好的乳化特性。

FPI的持水性略高于SPI,持油性高达300%,为SPI的近2倍。经热处理后, FPI的持水性与持油性均略有降低,但不具有显著性差异。FPI在高温作用下蛋白质分子表面疏水基团暴露,使其水结合能力下降,从而持水性降低;另外,由于蛋白质的聚集和油的流动性增强,蛋白质分子与油之间的接触面积减小,从而导致持油性较差<sup>[20]</sup>。SPI的持水性与持油性经热处理后大大提高,可能的原因为热处理前, SPI充分溶解在水中,受热后发生严重变性,疏

水基团迅速暴露,而大部分水分子仍被截留,表现为持水性大大提高<sup>[21]</sup>,而表面疏水基团的增加,使其与油脂中小分子相互作用,从而持油性增大。

## 3 结论

本文采用低速磨浆,以脱壳亚麻籽为原料,制备了蛋白质含量(干基)为91.18%、提取率为50.10%的FPI。FPI中的挥发性风味物质主要为醛、醇、酮类,其中,醛类物质75.07%,主要为反式-2-己烯醛(相对含量35.08%)和己醛(相对含量34.22%)。热处理(90℃, 10 min)后FPI中挥发性风味物质种类从32种增加至42种,醛类物质相对含量减少至54.30%,呈现油脂味、烧焦味和烤香味的风味物质相对含量增加。热处理后, FPI的溶解性与亚基含量变化规律存在密切联系。同时,热处理能够提高FPI乳化活性,降低乳化稳定性,而持水性、持油性无明显的改变。FPI的结构随不同加热条件的变化规律复杂,导致其功能性质变化复杂,两者之间的联系有待进一步探究。

## 参考文献:

- [1] SHIM Y Y, GUI B, ARNISON P G, et al. Flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) bioactive compounds and peptide nomenclature: a review [J]. Trends Food Sci Tech, 2014, 38(1):5-20.
- [2] KHATTAB R Y, ZEITOUN M A. Quality evaluation of flaxseed oil obtained by different extraction techniques[J]. LWT - Food Sci Technol, 2013, 53(1):338-345.
- [3] DEV D K, SIENKIEWICZ T, QUENSEL E, et al. Isolation and partial characterization of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) proteins[J]. Mol Nutr Food Res, 2010, 30(3/4):391-393.
- [4] CHUNG M W Y, LEI B, LI - CHAN E C Y. Isolation and structural characterization of the major protein fraction from Norman flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) [J]. Food Chem, 2005, 90(1/2):271-279.
- [5] MARAMBE H K, SHAND P J, WANASUNDARA J P D. Release of angiotensin I - converting enzyme inhibitory peptides from flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) protein under simulated gastrointestinal digestion[J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(17):9596-9604.
- [6] DEV D K, QUENSEL E. Functional and microstructural characteristics of linseed (*Linum usitatissimum* L.) flour and a protein isolate[J]. Lebensm Wiss Technol, 1986, 19(4):331-337.
- [7] 许光映, 胡晓军, 张清华, 等. 从亚麻籽仁饼中提取分离蛋白的工艺条件[J]. 山西农业科学, 2012, 40(8):68-71.
- [8] PRATIBHA K, KIM D, STAFFORD M, et al. Preparation, characterization and functional properties of flaxseed protein isolate[J]. Food Chem, 2016, 197:212-220.
- [9] 陈海华, 许时婴. 亚麻籽胶中多糖含量的测定[J]. 粮油加工与食品机械, 2003(10):112-113.
- [10] LAEMMLI B U K. Cleavage of structural proteins during assembly of head of bacteriophage - T4 [J]. Nature, 1970, 227(5259):680-685.
- [11] 孙灵湘, 叶挺, 华欲飞, 等. 模拟体系制备豆浆及其风味研究[J]. 大豆科学, 2015, 34(4):679-684.
- [12] 吴伟, 梁盈, 林亲录, 等. 脱脂豆粕预处理对大豆球蛋白功能性质的影响[J]. 中国油脂, 2015, 40(1):22-26.
- [13] 郭凤仙, 熊幼翎, 何志勇, 等. 热处理对大豆分离蛋白功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2009, 25(6):9-11,21.
- [14] 麻浩, 官春云. 大豆种子脂肪氧化酶与豆制品产生豆腥味关系的研究进展[J]. 中国油料作物学报, 1999, 21(2):73-76.
- [15] 于文龙, 郝楠, 吴凯晋, 等. HS-SPME-GC-MS-O 联用分析不同加工工艺亚麻籽油特征香气成分[J]. 食品科学, 2019, 40(18):266-272.
- [16] 王笑园, 宋章奕, 张延琦, 等. 精炼过程对亚麻籽油风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18):55-59.
- [17] 孙灵湘. 豆浆风味模拟体系的构建及各组分对其风味组成的影响[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2015.
- [18] SINGH N, KAUR M, SANDHU K S. Physicochemical and functional properties of freeze-dried and oven dried corn gluten meals[J]. Dry Technol, 2005, 23(4):975-988.
- [19] 孔慧广, 田少君. 两种干燥方式对亚麻籽分离蛋白功能性质的影响研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(4):27-31.
- [20] 夏克东. 星油藤蛋白的制备及其理化性质的研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2016.
- [21] 邓芝串, 张超, 张晖, 等. 喷雾干燥对籽瓜种子蛋白理化及功能特性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(11):256-263.
- [14] 李徐, 徐小光, 刘睿杰, 等. 9 种市售稻米油极性物质含量的测定及组成分析[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(2):120-124.
- [15] 屠洁. 正确认识食用调和油及营养调配[J]. 食品安全导刊, 2015(19):72-73.
- [16] 王莹辉. 米糠油的煎炸应用研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2014.
- [17] 吴晓华, 刘玉兰, 黄勤生. 煎炸油及煎炸专用棉籽油的研究进展[J]. 农业机械, 2012, 36(12):45-50.
- [18] ARSLAN F N, SAPIA N, DURR F, et al. A study on monitoring of frying performance and oxidative stability of cottonseed and palm oil blends in comparison with original oils [J]. Int J Food Prop, 2016, 20(3):704-717.
- [19] 王莉蓉, 金青哲, 冯国霞, 等. 我国及欧美煎炸食用油法律法规与标准概述[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(9):3774-3779.
- [20] 胡盛本, 卓成飞, 邹古月, 等. 氢化大豆油和反刍动物油脂中甘油三酯和磷脂反式脂肪酸的位置分布[J]. 食品科学, 2017, 38(14):283-290.

(上接第 21 页)

- [8] 李丽萍, 王竹, 赵榕, 等. 两种食物胆固醇检验方法对居民膳食胆固醇摄入量评估的影响[J]. 首都公共卫生, 2018, 12(2):89-91.
- [9] TINELLO F, LANTE A, BERNARDI M, et al. Comparison of OXITEST and RANCIMAT methods to evaluate the oxidative stability in frying oils [J]. Eur Food Res Technol, 2017, 244(4):747-755.
- [10] NAYAK P K, DASH U, RAYAGURU K, et al. Physio-chemical changes during repeated frying of cooked oil: a review [J]. J Food Biochem, 2016, 40(3):371-390.
- [11] 姚迪, 何新益, 闫西纯, 等. 牛油与 4 种植物油的相容性 [J]. 食品与机械, 2018, 34(2):31-35, 110.
- [12] MARCO E D, SAVARESE M, PARISINI C, et al. Frying performance of a sunflower/palm oil blend in comparison with pure palm oil [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2007, 109(3):237-246.
- [13] 刘家伟, 杨威, 涂梦婕, 等. 高油酸菜籽煎炸油的研究 [J]. 中国油脂, 2018, 43(12):45-49.