

# 碱热改性南瓜籽分离蛋白的制备 及其乳化性能研究

王秋博<sup>1,2</sup>, 王珂<sup>1,2</sup>, 王颖<sup>1,2</sup>, 杨成<sup>1,2</sup>, 孙亚娟<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学合成与生物胶体教育部重点实验室, 江苏无锡 214122;

2. 江南大学化学与材料工程学院, 江苏无锡 214122)

**摘要:**旨在为南瓜籽分离蛋白(PSPI)的改性提供新的策略,以南瓜籽为原料,经脱脂后,采用碱溶酸沉法提取 PSPI,再采用碱热法(pH 12、温度 100 °C)对 PSPI 进行改性处理,得到碱热改性 PSPI (AH-PSPI)。测定了 AH-PSPI 的分散性、乳化性、界面性质和蛋白质结构,并与 PSPI 进行了对比。结果表明:碱热处理可以显著提高 PSPI 的分散性与乳化性能;与 PSPI 相比,AH-PSPI 的三相接触角从(124.8 ± 3.9)°降至(80.9 ± 3.5)°,Zeta 电位从(-29.86 ± 0.55) mV 降至(-36.04 ± 1.13) mV,粒径分布从(603.67 ± 26.01) nm 降至(125.21 ± 1.28) nm,且 AH-PSPI 具有更强的降低界面张力的能力;十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)、紫外光谱、红外光谱、荧光光谱表征结果显示,碱热处理可以改变 PSPI 的一级、二级、三级结构,使蛋白质分子舒展,增加柔韧性,从而提高了 PSPI 的分散性与乳化性。综上,碱热法处理 PSPI 可改变其蛋白质的一级、二级、三级结构,增加 PSPI 的分散性和乳化性。

**关键词:**南瓜籽分离蛋白;碱热处理;蛋白结构;乳化性能

中图分类号:TS201.2;TS229 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)06-0065-07

## Preparation of alkali - heat modified pumpkin seed protein isolate and its emulsification performance

WANG Qiubo<sup>1,2</sup>, WANG Ke<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>1,2</sup>, YANG Cheng<sup>1,2</sup>, SUN Yajuan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Synthetic and Biological Colloids, Ministry of Education, Jiangnan University,

Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. School of Chemical & Material Engineering, Jiangnan

University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

**Abstract:** Aiming to provide a new strategy for the modification of pumpkin seed protein isolate (PSPI), pumpkin seeds were used as raw materials, PSPI was extracted by alkali solution and acid precipitation method after defatting, and then modified by alkali - heat method (pH 12, temperature 100 °C) to obtain alkali - heat modified PSPI (AH - PSPI). The dispersibility, emulsifying properties, interfacial properties, and protein structure of AH - PSPI were determined and compared with PSPI. The results indicated that alkali - heat treatment can significantly improve the dispersibility and emulsification performance of PSPI. Compared with PSPI, the three - phase contact angle of AH - PSPI decreased from (124.8 ± 3.9)° to (80.9 ± 3.5)°, the Zeta potential decreased from (-29.86 ± 0.55) mV to (-36.04 ± 1.13) mV, and the particle size distribution decreased from (603.67 ± 26.01) nm to (125.21 ± 1.28) nm. AH - PSPI also had a stronger ability to reduce interfacial tension. The characterization results of

收稿日期:2024-03-25;修回日期:2025-02-06

作者简介:王秋博(1999),男,硕士研究生,研究方向为化妆品与个人护理用品(E-mail)6210610041@stu.jiangnan.edu.cn。

通信作者:孙亚娟,副研究员(E-mail)cmsun@jiangnan.edu.cn。

SDS - PAGE, UV, FTIR, and FS showed that alkali - heat treatment can alter the primary, secondary, and tertiary structures of PSPI, leading to protein stretching, increased protein flexibility, and thereby improving the dispersion

and emulsification of PSPI. In summary, alkali - heat treatment of PSPI can alter the primary, secondary, and tertiary structures of its protein, increase its dispersibility and emulsifying properties.

**Key words:** pumpkin seed protein isolate; alkali - heat treatment; protein structure; emulsification performance

乳液是一种多相分散体系,通常是由小分子表面活性剂作为乳化剂来降低界面张力以维持乳液的稳定。这类由表面活性剂稳定的乳液在化学、食品、医药等领域应用广泛<sup>[1]</sup>。但某些表面活性剂对一些有益微生物有害,引发环境污染,甚至对人体健康造成损害<sup>[1-2]</sup>。与由表面活性剂稳定的乳液相比,由固体颗粒稳定的乳液因其安全性高、环境友好且具备优良的乳化性能受到了广泛的研究与关注<sup>[3-5]</sup>。在稳定乳液的各类固体颗粒中,蛋白来源的固体颗粒因来源天然,且具有两亲性,是较为理想的乳化材料,如大豆蛋白<sup>[6]</sup>、玉米醇溶蛋白<sup>[7-8]</sup>、乳清分离蛋白<sup>[9]</sup>已被开发应用于乳液的制备,并取得了良好的应用效果。但从动植物中直接提取的蛋白的乳化效果欠佳,需要先对其进行改性处理,才能使其得到进一步的应用。

蛋白改性的方法众多,例如 pH 循环法、反溶剂法、化学交联法、酶解法等,但都有其各自的缺点,如: pH 循环法滴定比较费时<sup>[10]</sup>;反溶剂法需要使用大量乙醇作为劣溶剂<sup>[11]</sup>;化学交联法可能引入有害试剂,如戊二醛<sup>[12]</sup>;酶解法虽然具有特异性,但酶的价格较高,不适合大规模使用<sup>[13]</sup>。相比之下,碱热法操作简便,成本低廉,适合大规模生产。Qiao 等<sup>[14]</sup>利用碱热法改性豌豆蛋白,成功制备了豌豆蛋白纳米颗粒,提高了豌豆蛋白的界面活性,证明了碱热法改性蛋白的可行性,但目前关于碱热法改性机制的研究并不是很全面。南瓜籽分离蛋白(PSPI)作为一种植物蛋白,不仅具有丰富的营养价值<sup>[15]</sup>,且其水解物多肽中具有抗氧化<sup>[16-17]</sup>和 ACE 抑制<sup>[18]</sup>等多种活性功能,是一种优质的蛋白质来源。然而关于 PSPI 改性的研究报道相对较少,使用碱热法改性 PSPI 还未见报道。本文以 PSPI 为原料,通过碱热法对其进行改性,测定其分散性与乳化性的变化,并通过三相接触角、界面张力、粒径、Zeta 电位、十二烷基硫酸钠 - 聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS - PAGE)、紫外光谱(UV)、红外光谱(FTIR)、荧光光谱(FS)等表征解释碱热法改性 PSPI 的内在机制,以期为 PSPI 的改性研究提供一种新的策略。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

南瓜籽,购于无锡当地超市;BCA 蛋白浓度试

剂盒、标准蛋白[彩色预染蛋白分子质量标准(10 ~ 180 kDa)],上海碧云天科技有限公司;石油醚(沸程 60 ~ 90 °C)、盐酸、氢氧化钠,国药集团化学试剂有限公司;异硫氰酸荧光素(FITC),上海阿拉丁生化科技有限公司;橄榄油,上海麦克林生化科技有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

IKA T18 型高速分散机,Leica ICC50 型光学显微镜,5804 R 型离心机,OCA15EC 型视频光学接触角测量仪,NanoBrook Omni 型 Zeta 电位及纳米粒度分析仪,DYY - 6C 型 十二烷基硫酸钠 - 聚丙烯酰胺凝胶电泳装置,SCIENTZ - 10 型冷冻干燥机,TU - 1950 型紫外光谱仪,Nicolet iS5 型傅里叶红外光谱仪,FS5 型荧光光谱仪,MAZ3000 型激光衍射法粒度分析仪,KQ3200E 型超声波清洗器,YP - 2 型红外压片机。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 PSPI 的提取与组成成分测定

##### 1.2.1.1 PSPI 的提取

参考文献[19]和文献[20]的方法并略作改动提取 PSPI。将南瓜籽剥壳,仁粉碎,得到南瓜籽粉,按照料液比 1:4 加入石油醚,在 40 °C 水浴下机械搅拌 4 h,抽滤除去石油醚,重复上述操作 3 次,将滤渣在通风橱中放置过夜以去除残余的石油醚,得到脱脂南瓜籽粉。按照料液比 1:30 向脱脂南瓜籽粉中加入去离子水,用 1 mol/L NaOH 溶液调节其 pH 至 9.5,使用超声波清洗器(功率 150 W、频率 40 kHz)在常温下辅助提取 3 h,然后使用机械搅拌继续辅助提取 3 h,在 8 000 r/min 下离心 10 min,取上清液并用 1 mol/L HCl 溶液调节其 pH 至 4.5,在 8 000 r/min 下离心 10 min,用去离子水将离心得到的沉淀再次分散,调节分散液 pH 至 7 后,置于 -20 °C 冰箱中冷冻,最后用冷冻干燥机冷冻干燥得到 PSPI。

##### 1.2.1.2 PSPI 组成成分测定

蛋白质含量,参照 GB 5009.5—2016 采用凯氏定氮法测定(蛋白质折算系数 6.25);脂肪含量,参照 GB 5009.6—2016 采用索氏抽提法测定;灰分含量,参照 GB 5009.4—2016 测定;多糖含量,参照 SN/T 4260—2015 测定。

### 1.2.2 碱热改性 PSPI(AH-PSPI)的制备

配制 10 mg/mL 的 PSPI 分散液,室温下搅拌过夜,确保 PSPI 充分水合;用 1 mol/L NaOH 溶液将 PSPI 分散液的 pH 调至 12,在 100 °C 油浴下加热 2 h,冷却后用 1 mol/L HCl 溶液将体系的 pH 调至 7,室温下磁力搅拌 1 h,得到 AH-PSPI 分散液。取部分分散液冷冻干燥后得到 AH-PSPI 粉末,其余分散液置于 4 °C 冰箱保存备用。

### 1.2.3 蛋白的分散性与乳化性测定

分散性的测定:取 3 mL AH-PSPI 分散液于玻璃瓶中,室温放置,分别在 0、1、12 h 和 5 d 后拍摄其外观照片,同时使用 BCA 蛋白浓度试剂盒测定放置 12 h 与 5 d 的分散液上清液中蛋白质含量。以 10 mg/mL PSPI 分散液作为对照。每组实验重复 3 次。

乳化性的测定:以 AH-PSPI 分散液作为水相,橄榄油作为油相,二者混合后使用高速分散机在 16 000 r/min 下均质 2 min 制备乳液,拍摄乳液的外观图;用去离子水对乳液进行稀释后,用移液枪取 10  $\mu$ L 左右滴加到载玻片上,盖好盖玻片,之后使用光学显微镜拍摄微观图。通过调节油水比(油相与水相体积比)考察 AH-PSPI 的最大载油能力。以 10 mg/mL PSPI 分散液作为对照。每组实验重复 3 次。

### 1.2.4 蛋白的界面性质表征

三相接触角的测定:使用压片机将 PSPI 和 AH-PSPI 粉末压成 2 mm 左右薄片后,分别放入含有橄榄油的透明玻璃皿中,橄榄油要没过薄片,且将薄片浸在橄榄油底部,作为固体相,橄榄油作为油相。用 1 mL 注射器抽取 2  $\mu$ L 去离子水到薄片表面上,作为水相,使用视频光学接触角测量仪测定 PSPI 和 AH-PSPI 的水-油-固三相接触角。

界面张力的测定:根据文献[14]的方法,建立油水界面后,使用滴体积法基于 Young-Laplace 方

程得到 PSPI 和 AH-PSPI 的界面张力( $\gamma$ )。

Zeta 电位及粒径测定:将 PSPI 和 AH-PSPI 分散液稀释到合适浓度,使用 Zeta 电位及纳米粒度分析仪测定 PSPI 和 AH-PSPI 的 Zeta 电位和粒径。

### 1.2.5 蛋白的结构表征

SDS-PAGE 分析:向稀释至 1 mg/mL 的 PSPI 和 AH-PSPI 分散液和质量浓度为 1 mg/mL 的标准蛋白溶液中加入等量的上样缓冲液,沸水浴处理 10 min 后,分别取含 30  $\mu$ g 标准蛋白、PSPI、AH-PSPI 的溶液至预制胶孔中,开始电泳。电泳结束后,使用考马斯亮蓝快速染色液染色 1 h,确保染色充分。最后,用去离子水洗脱凝胶背景至无色,拍照后进行分析。

紫外光谱测定:将 PSPI 和 AH-PSPI 分散液分别稀释至 0.2 mg/mL,使用紫外光谱仪测定二者在 200 ~ 500 nm 范围的紫外吸收光谱。

荧光光谱测定:将 PSPI 和 AH-PSPI 分散液分别稀释至 0.2 mg/mL,在激发波长 280 nm、狭缝宽度 1 nm 条件下,使用荧光光谱仪测定二者在 300 ~ 500 nm 范围的荧光光谱。

红外光谱测定:使用溴化钾压片法测定 PSPI 和 AH-PSPI 粉末的红外光谱。使用 Peakfit 4 软件对酰胺 I 带(1 600 ~ 1 700  $\text{cm}^{-1}$ )进行分峰拟合处理,分析其二级结构的变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PSPI 的组成成分

经检测,PSPI 的蛋白质含量为(96.43  $\pm$  0.20)%,脂肪含量为(1.36  $\pm$  0.23)%,灰分含量为(0.49  $\pm$  0.02)%,多糖含量为(0.52  $\pm$  0.04)%。

### 2.2 PSPI 和 AH-PSPI 的分散性与乳化性

#### 2.2.1 分散性

PSPI 和 AH-PSPI 分散液的外观及其上清液中蛋白质含量随储存时间的变化如图 1 所示。

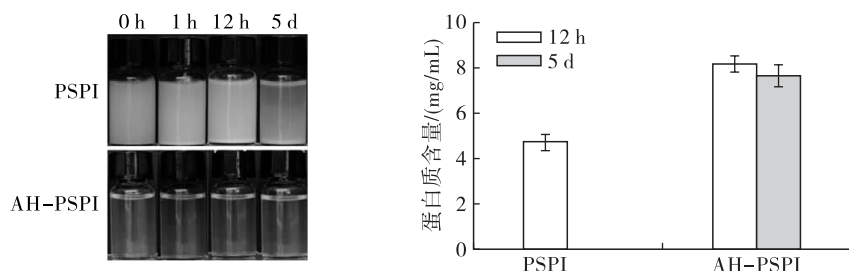


图 1 PSPI 和 AH-PSPI 分散液的外观及其上清液中蛋白质含量随储存时间的变化

Fig. 1 Appearance of PSPI and AH-PSPI dispersions and the change of protein content in its supernatant with storage time

由图 1 可知:随着储存时间的延长,PSPI 分散液逐渐开始沉降,其上清液中蛋白质含量也逐渐下降,且在 5 d 时检测不到蛋白质,说明其在 5 d 时完

全沉降;而 AH-PSPI 分散液始终保持均一透明状,且随着储存时间的延长,其上清液中蛋白质含量略微下降。上述结果表明,与 PSPI 相比,经碱热法处

理后的 PSPI 具有更加优异的分散性和稳定性。

### 2.2.2 乳化性

不同载油量(油相体积分数)的 PSPI 和 AH-PSPI 乳液的外观和显微镜图如图 2 所示。

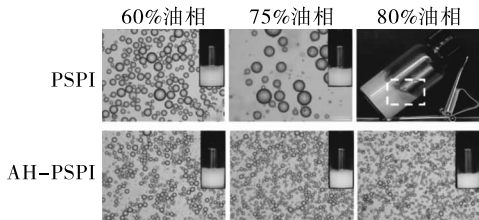


图 2 不同载油量的 PSPI 和 AH-PSPI 乳液的外观和显微镜图(标尺 200  $\mu\text{m}$ )

Fig. 2 Appearance and microscopic images of PSPI and AH-PSPI emulsions with different oil loadings (scale 200  $\mu\text{m}$ )

由图 2 可知:PSPI 最多能稳定 75% 油相的乳液,且随着油相体积分数的增加,乳液粒径逐渐增大,60% 油相的乳液平均粒径为 90  $\mu\text{m}$ ,75% 油相的乳液平均粒径超过 100  $\mu\text{m}$ ;而 AH-PSPI 可稳定 80% 油相的乳液,60% 油相的乳液平均粒径为 30  $\mu\text{m}$ ,且随着油相体积分数的增加,乳液粒径几乎没有变化。上述结果表明,相较于 PSPI,AH-PSPI 的乳化性能更优。

为进一步评价 AH-PSPI 的乳化性能,考察了 AH-PSPI 制备的 50% 和 75% 油相乳液储存 30 d 期间外观和显微镜图的变化,并与 PSPI 制备的乳液进行了对比,结果如图 3 所示。

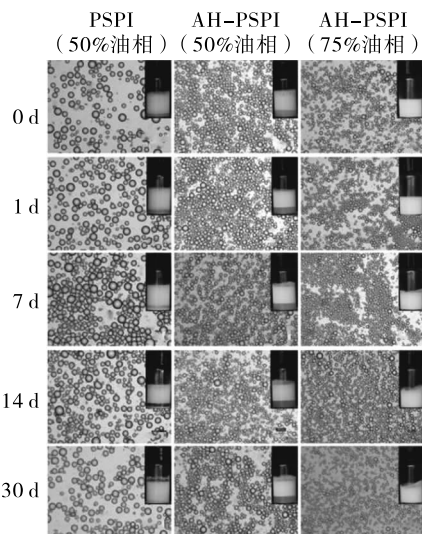


图 3 PSPI、AH-PSPI 制备的 50%、75% 油相乳液在 30 d 储存期间的外观与显微镜图(标尺 200  $\mu\text{m}$ )

Fig. 3 Appearance and microscopic images of PSPI and AH-PSPI emulsions with 50% and 75% oil phases during 30 d storage (scale 200  $\mu\text{m}$ )

实验发现,由 PSPI 制备的 75% 油相乳液稳定

性差,在放置 1 d 就观察到出油现象,故后续未继续观察。由图 3 可知,PSPI 制备的 50% 油相乳液稳定性较好,储存 30 d 内,无明显出油现象,但是从微观显微镜图上发现,液滴有逐渐变大趋势。对比发现,AH-PSPI 制备的 50% 和 75% 油相乳液比较稳定,在储存 30 d 内无出油现象,且液滴也无明显变化。

利用激光衍射粒度分析仪测定了由 AH-PSPI 制备的 50% 和 75% 油相乳液以及由 PSPI 制备的 50% 油相乳液在 30 d 储存期间其表面积平均粒径( $d_{3,2}$ )的变化,结果如图 4 所示。

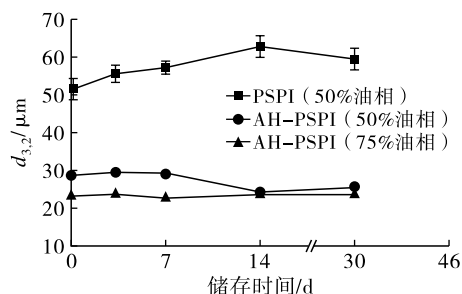


图 4 PSPI、AH-PSPI 制备的 50%、75% 油相乳液在 30 d 储存期间  $d_{3,2}$  的变化

Fig. 4 Changes in  $d_{3,2}$  of PSPI and AH-PSPI emulsions with 50% and 75% oil phases during 30 d storage

由图 4 可知:储存 0 d,由 PSPI 制备的 50% 油相乳液的  $d_{3,2}$  为 52  $\mu\text{m}$  左右,且随着储存时间的延长, $d_{3,2}$  逐渐增大,储存 30 d 时其  $d_{3,2}$  为 60  $\mu\text{m}$  左右;而由 AH-PSPI 制备的 50%、75% 油相乳液在 30 d 的储存期间粒径几乎无变化,其中 50% 油相乳液在 30 d 的储存期间  $d_{3,2}$  在 28  $\mu\text{m}$  处上下浮动。

综上,PSPI 经碱热法处理后具有更加良好的乳化性能。

### 2.3 PSPI 和 AH-PSPI 的界面性质

颗粒的三相接触角、界面张力、Zeta 电位和粒径分别反映了颗粒的表面润湿性、降低界面能的能力、分散稳定性和颗粒的大小。PSPI 和 AH-PSPI 的三相接触角、Zeta 电位和粒径如表 1 所示,界面张力如图 5 所示。

由表 1 可知,PSPI 的三相接触角为 124.8°,AH-PSPI 的三相接触角为 80.9°,说明 PSPI 经碱热法处理后更加亲水。AH-PSPI 的三相接触角更接近 90°,根据 Binks<sup>[21]</sup> 的颗粒不可逆吸附理论,AH-PSPI 更易于吸附在界面,稳定乳液的效果更好。此外,AH-PSPI 比 PSPI 具有更大的 Zeta 电位绝对值和更小的粒径。由图 5 可知,与 PSPI 相比,AH-PSPI 具有更强的降低界面张力的能力,更有利于乳液内相稳定地分散到外相中。综上,碱热法处理的

PSPI 为一种纳米级蛋白颗粒,具有更好的表面活性与稳定性。

表 1 AH-PSPI 和 PSPI 的三相接触角、Zeta 电位、粒径

Table 1 Three-phase contact angles, Zeta potentials, and particle sizes of AH-PSPI and PSPI

样品	三相接触角/(°)	Zeta 电位/mV	粒径/nm
PSPI	124.8 ± 3.9	-29.86 ± 0.55	603.67 ± 26.01
AH-PSPI	80.9 ± 3.5	-36.04 ± 1.13	125.21 ± 1.28

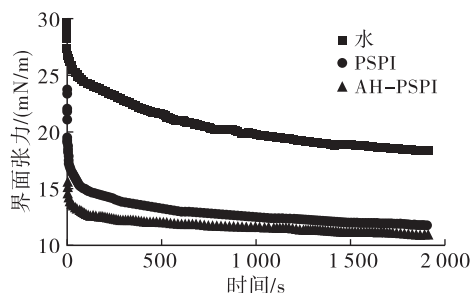


图 5 水、PSPI、AH-PSPI 与橄榄油的界面张力

Fig. 5 Interfacial tension between water, PSPI, AH-PSPI and olive oil

## 2.4 PSPI 和 AH-PSPI 的结构

### 2.4.1 SDS-PAGE 图谱

PSPI 和 AH-PSPI 的 SDS-PAGE 图谱如图 6 所示。

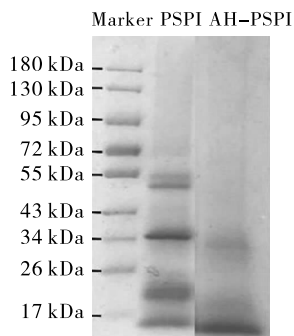


图 6 PSPI 和 AH-PSPI 的 SDS-PAGE 图谱

Fig. 6 SDS-PAGE profiles of PSPI and AH-PSPI

由图 6 可知,PSPI 分子质量分布较广,在 15、22、35、52 kDa 附近均有分布,而 AH-PSPI 主要分布在 16 kDa 附近,表明经碱热处理后,PSPI 存在一个碱水解的过程,导致其一级结构亚基构象改变,这与 Zhao 等<sup>[22]</sup>报道的结果类似。

### 2.4.2 紫外光谱

对 PSPI 和 AH-PSPI 的紫外光谱进行了测定,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,与 PSPI 相比,AH-PSPI 的最大吸收峰存在 2 nm 的偏移,且最大吸收峰的强度有所下降。同样地,与 PSPI 相比,AH-PSPI 在 280 nm(归

属于酪氨酸、色氨酸<sup>[23]</sup>的吸收)处吸收强度也有所降低。这些结果表明,经碱热法处理后,PSPI 的三级结构构象发生了转变,Ren 等<sup>[24]</sup>也报道了类似的结果。

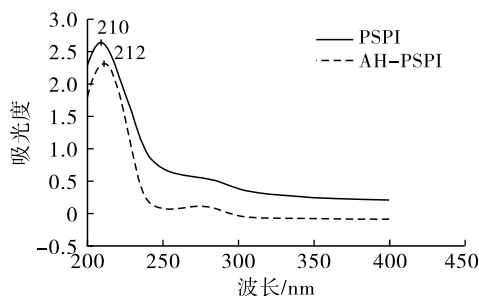


图 7 PSPI 和 AH-PSPI 的紫外光谱图

Fig. 7 UV spectra of PSPI and AH-PSPI

### 2.4.3 荧光光谱

测定了 PSPI 和 AH-PSPI 的荧光光谱,结果如图 8 所示。

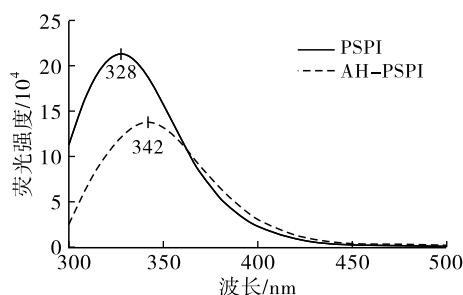


图 8 PSPI 和 AH-PSPI 的荧光光谱图

Fig. 8 Fluorescence spectra of PSPI and AH-PSPI

由图 8 可知,与紫外光谱类似,相对于 PSPI 的荧光光谱,AH-PSPI 的最大吸收峰发生了明显的红移(从 328 nm 偏移至 342 nm),吸收强度也明显下降,表明酪氨酸和色氨酸残基所处环境的极性改变<sup>[25]</sup>,说明碱热法处理改变了 PSPI 的三级结构。

### 2.4.4 红外光谱

测定了 PSPI 和 AH-PSPI 的红外光谱,结果如图 9 所示。

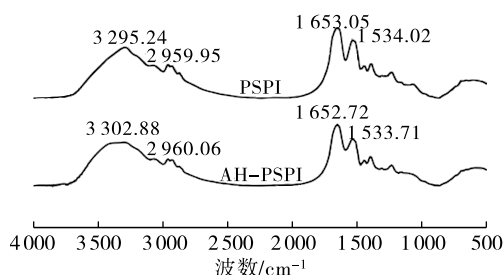


图 9 PSPI 和 AH-PSPI 的红外光谱图

Fig. 9 FTIR of PSPI and AH-PSPI

由图 9 可知,与 PSPI 相比,AH-PSPI 在酰胺 I 带(1600 ~ 1700 cm<sup>-1</sup>)的吸收峰略微偏移,表明碱

热法处理后 PSPI 的二级结构含量发生了改变,通过软件拟合可知,经碱热法处理后 PSPI 的  $\alpha$ -螺旋的相对含量由  $(18.86 \pm 0.65)\%$  增加到  $(20.78 \pm 0.41)\%$ ,  $\beta$ -转角相对含量由  $(35.06 \pm 1.05)\%$  增加到  $(36.92 \pm 2.14)\%$ , 无规卷曲相对含量由  $(17.79 \pm 0.56)\%$  增加到  $(20.69 \pm 0.41)\%$ ,  $\beta$ -折叠相对含量由  $(28.29 \pm 0.83)\%$  降低至  $(21.32 \pm 1.07)\%$ 。上述结果表明,经碱热法处理后 PSPI 的二级结构发生改变。

综上,碱热法处理 PSPI 改变了其蛋白质的一级、二级、三级结构,使蛋白质分子舒展,柔韧性增加。

### 3 结论

本研究使用碱热法改性 PSPI,成功提高了 PSPI 的分散性与乳化性。经检测,改性后的 PSPI 为纳米级颗粒,具有良好的稳定性与界面活性。同时,通过 SDS-PAGE、紫外光谱、荧光光谱、红外光谱测定了改性前后 PSPI 的蛋白质结构变化,从蛋白质结构角度分析证明了碱热法改性 PSPI 的内在机制,为 PSPI 的改性研究提供了一种新的策略。

### 参考文献:

- [1] SHI A, FENG X, WANG Q, et al. Pickering and high internal phase Pickering emulsions stabilized by protein-based particles: A review of synthesis, application and prospective [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2020, 109: 106117 [2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106117>.
- [2] JIANG H, SHENG Y, NGAI T. Pickering emulsions: Versatility of colloidal particles and recent applications [J]. Curr Opin Colloid, 2020, 49:1-15.
- [3] DE CARVALHO - GUIMARÃES F B, CORREA K L, DE SOUZA T P, et al. A review of Pickering emulsions: Perspectives and applications [J/OL]. Pharmaceuticals, 2022, 15(11):1413 [2024-03-25]. <https://doi.org/10.3390/ph15111413>.
- [4] SHARKAWY A, BARREIRO M F, RODRIGUES A E. Chitosan-based Pickering emulsions and their applications: A review [J/OL]. Carbohydr Polym, 2020, 250: 116885 [2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116885>.
- [5] HAN Y, ZHU L, KARRAR E, et al. Pickering foams stabilized by protein-based particles: A review of characterization, stabilization, and application [J]. Trends Food Sci Technol, 2023, 133:148-159.
- [6] ZHANG X, LUO X, WANG Y, et al. Concentrated O/W Pickering emulsions stabilized by soy protein/cellulose nanofibrils: Influence of pH on the emulsification performance [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2020, 108: 106025 [2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106025>.
- [7] TAO S, JIANG H, WANG R, et al. Ultra-stable Pickering emulsion stabilized by a natural particle bilayer [J]. Chem Commun, 2020, 56(90):14011-14014.
- [8] 付思晗, 齐玉堂, 张维农, 等. 玉米醇溶蛋白/乳清蛋白纤维核复合纳米粒稳定 Pickering 乳液的制备与性质 [J]. 中国油脂, 2022, 47(1):43-47.
- [9] QIN X S, GAO Q Y, LUO Z G. Enhancing the storage and gastrointestinal passage viability of probiotic powder (*Lactobacillus plantarum*) through encapsulation with pickering high internal phase emulsions stabilized with WPI-EGCG covalent conjugate nanoparticles [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2021, 116:106658 [2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106658>.
- [10] SUN C, GAO Y, ZHONG Q. Effects of acidification by glucono-delta-lactone or hydrochloric acid on structures of zein-caseinate nanocomplexes self-assembled during a pH cycle [J]. Food Hydrocolloid, 2018, 82:173-185.
- [11] DING J, LI Y, WANG Q, et al. Pickering high internal phase emulsions with excellent UV protection property stabilized by spirulina protein isolate nanoparticles [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2023, 137:108369 [2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108369>.
- [12] CHEN S, ZHANG L M. Casein nanogels as effective stabilizers for Pickering high internal phase emulsions [J/OL]. Colloid Surface A, 2019, 579: 123662 [2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123662>.
- [13] ZHAO Y, CHEN F, LIU C. Peanut oil and protein extraction using an aqueous enzymatic method and analysis of the characteristics of the emulsions produced [J]. Cereal Chem, 2023, 100(3):762-774.
- [14] QIAO X, LIU F, KONG Z, et al. Pickering emulsion gel stabilized by pea protein nanoparticle induced by heat-assisted pH-shifting for curcumin delivery [J/OL]. J Food Eng, 2023, 350: 111504 [2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111504>.
- [15] SÁ A G A, PACHECO M T B, MORENO Y M F, et al. Processing effects on the protein quality and functional properties of cold-pressed pumpkin seed meal [J/OL]. Food Res Int, 2023, 169: 112876 [2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112876>.
- [16] PACHECO A F C, PACHECO F C, PEREIRA G Z, et al. Structural changes induced by ultrasound in proteases and their consequences on the hydrolysis of pumpkin seed proteins and the multifunctional properties of hydrolysates [J]. Food Bioprod Process, 2024, 144:13-21.

- composition [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2015, 117 (10): 1627 – 1635.
- [15] WANG Y, HARTEL R W, ZHANG L. The stability of aerated emulsions: Effects of emulsifier synergy on partial coalescence and crystallization of milk fat [J/OL]. *J Food Eng*, 2021, 291: 110257 [2024 – 04 – 23]. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110257>.
- [16] 罗洁. 乳脂肪球的聚集特性与机制研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [17] BIASUTTI M, VENIR E, MARCHESINI G, et al. Rheological properties of model dairy emulsions as affected by high pressure homogenization [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2010, 11(4): 580 – 586.
- [18] XIE P, JIN J, XU H, et al. Effects of sucrose esters on whipping capabilities of aerated emulsions [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2023, 144: 108933 [2024 – 04 – 23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108933>.
- [19] 李扬, 李妍, 王筠钠, 等. 酪蛋白种类和二次均质工艺对再制稀奶油搅打特性的影响 [J]. *食品科学*, 2021, 42(7): 106 – 112.
- [20] FREDRICK E, WALSTRA P, DEWETTINCK K. Factors governing partial coalescence in oil – in – water emulsions [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2010, 153 (1/2): 30 – 42.
- [21] LI S, YE A, SINGH H. Seasonal variations in the characteristics of milk fat and the whipping properties of cream [J/OL]. *Int Dairy J*, 2022, 127: 105288 [2024 – 04 – 23]. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105288>.
- [22] ZENG D, CAI Y, LIU T, et al. Effect of sucrose ester S370 on interfacial layers and fat crystals network of whipped cream [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 113: 106541 [2024 – 04 – 23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106541>.
- [23] XIE P, JI G, JIN J, et al. Partial coalescence and whipping capabilities of dairy aerated emulsions as affected by inclusion of monoglycerides with different fatty acid species [J]. *Int J Dairy Tech*, 2023, 76(1): 81 – 92.
- [24] ZENG D, CAI Y, LIU T, et al. The effect of sucrose esters S1570 on partial coalescence and whipping properties [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 125: 107429 [2024 – 04 – 23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107429>.
- [25] XIE P, CUI L, YU M, et al. Elucidation of microscopic mechanisms of tweens on whipping capabilities of aerated emulsions: Fat crystal – membrane interaction perspective [J/OL]. *Food Biosci*, 2024, 62: 105334 [2024 – 04 – 23]. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105334>.
- [26] XU H, YANG L, JIN J, et al. Elucidation on the destabilization mechanism of whipping creams during static storage [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 129: 107613 [2024 – 04 – 23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107613>.
- 
- (上接第 70 页)
- [17] 王培宇, 孙培东. 南瓜籽多肽的制备及其对人体皮肤细胞的体外作用 [J]. *中国油脂*, 2020, 46 (6): 97 – 101.
- [18] LIANG F, SHI Y, SHI J, et al. A novel angiotensin – I – converting enzyme (ACE) inhibitory peptide IAF (Ile – Ala – Phe) from pumpkin seed proteins: In silico screening, inhibitory activity, and molecular mechanisms [J]. *Eur Food Res Technol*, 2021, 247 (9): 2227 – 2237.
- [19] BUCKO S, KATONA J, POPOVIC L, et al. Functional properties of pumpkin (*Cucurbita pepo*) seed protein isolate and hydrolysate [J]. *J Serb Chem Soc*, 2016, 81 (1): 35 – 46.
- [20] SUN Y, SHEN Y, DING J, et al. High ethanol tolerance of oil – in – water Pickering emulsions stabilized by protein nanoparticles [J/OL]. *Colloid Surface A*, 2022, 632: 127777 [2024 – 03 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127777>.
- [21] BINKS B P. Particles as surfactants: Similarities and differences [J]. *Curr Opin Colloid In*, 2002, 7 (1): 21 – 41.
- [22] ZHAO M, XIONG W, CHEN B, et al. Enhancing the solubility and foam ability of rice glutelin by heat treatment at pH 12: Insight into protein structure [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 103: 105626 [2024 – 03 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105626>.
- [23] SUN F, ZONG W, LIU R, et al. Micro – environmental influences on the fluorescence of tryptophan [J]. *Spectrochimica Acta A*, 2010, 76(2): 142 – 145.
- [24] REN C, XIONG W, PENG D, et al. Effects of thermal sterilization on soy protein isolate/polyphenol complexes: Aspects of structure, *in vitro* digestibility and antioxidant activity [J]. *Food Res Int*, 2018, 112: 284 – 290.
- [25] LIANG F, SHI Y, SHI J, et al. Exploring the binding mechanism of pumpkin seed protein and apigenin: Spectroscopic analysis, molecular docking and molecular dynamics simulation [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2023, 137: 108318 [2024 – 03 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108318>.