

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029469

引用格式:吴甜甜,易军鹏,董晶寅,等.蒸汽爆破预处理对芝麻粕蛋白结构与功能特性的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(23):194-200. WU Tiantian, YI Junpeng, DONG Jingyin, et al. Effect of steam explosion pretreatment on the structure and functional properties of sesame meal protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(23): 194-200.

蒸汽爆破预处理对芝麻粕蛋白结构与功能特性的影响

吴甜甜¹, 易军鹏^{1*}, 董晶寅¹, 李欣²

1(河南科技大学 食品与生物工程学院, 河南 洛阳, 471000) 2(河南科技大学 化工与制药学院, 河南 洛阳, 471000)

摘要 为探究蒸汽爆破预处理对芝麻粕蛋白的影响, 采用碱提酸沉法提取蛋白质, 对其结构与功能特性进行分析。结果表明, 经过蒸汽爆破处理后, 芝麻粕蛋白微观结构发生改变, 亮度降低, 氨基酸含量下降, 疏水性增加, 溶解度升高, 蛋白持油、起泡和乳化性能得到改善。差式扫描量热仪和热重分析仪数据显示, 蒸汽爆破后的芝麻粕蛋白的热性能有所提高; 红外光谱结果表明, 蒸汽爆破处理后芝麻粕蛋白二级结构发生变化, 且 β 折叠结构增加; 蛋白质糖基化结果显示, 在蒸汽爆破过程中, 美拉德反应被激活。该研究表明, 用蒸汽爆破可改善芝麻粕蛋白的功能特性。

关键词 芝麻粕蛋白; 蒸汽爆破; 碱提酸沉; 蛋白结构; 功能特性

芝麻也叫油麻, 是生长周期为一年的主要油料作物, 我国 2000~2019 年芝麻的平均产量达到 60.17 万 t。在我国约有 4/5 以上的芝麻用来榨油^[1], 芝麻粕是芝麻榨油后的副产物, 其蛋白含量可达 42.5%~47.9%, 且含有多种氨基酸, 不含抗营养因子^[2], 其氨基酸符合联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)/世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 推荐的人体蛋白质标准, 并含有 30% 的必需氨基酸, 是一种较好的植物蛋白来源, 可用作食品中的功能蛋白^[3]。而热榨后的芝麻粕中蛋白质严重变性, 功能性质差^[4]。目前针对蛋白质进行改性的方法包括化学改性、物理改性、酶法改性和基因工程改性等。化学改性使用较广、效果好, 但专一性差, 有试剂残留, 安全性不高等问题; 物理改性主要包括加热、微波、机械作用等, 它具有无毒副作用、高效等优点, 但通常无蛋白质一级结构的改变; 酶法改性容易产生苦味肽且不易在酸沉工艺中回收; 基因工程改性安全性不明、时间长等^[5]。

蒸汽爆破是一种绿色、经济的物理处理方法, 主要应用于植物原料的预处理, 它通过高压蒸汽对原料浸润后瞬间泄压, 从而使原料内部蒸汽瞬间膨胀而“爆破”, 使纤维断裂、细胞破碎等。因此有利于原料纤维的降解、酶和化学物的可及性以及细胞内容物的溶出。王堃等^[6]提出蒸汽爆破处理可使木质纤维原

料的纤维聚合度下降, 半纤维素和部分木质素降解, 纤维素内氢键断裂, 从而使其用于乙醇生产的酶解效率提高。CARVALHO 等^[7]将蒸汽爆破技术用于处理富含木聚糖的甘蔗渣, 与常用的步骤繁复的碱提酶解法效果相当。张燕鹏等^[8]发现蒸汽爆破技术可用于解决高温豆粕蛋白因变性导致的溶解性低的问题。那治国等^[9]研究了汽爆处理后的米糠粕蛋白, 发现蛋白质的提取率 and 功能特性都得到了提高。ZHANG 等^[10]研究了汽爆处理后的油茶籽蛋白质, 发现在不同的 pH 条件下, 其溶解度、起泡和乳化性能均明显高于未处理的油茶籽蛋白。

本文选取芝麻粕蛋白作为研究对象, 探讨蒸汽爆破预处理对其溶解、持油、起泡和乳化性的影响。通过色差分析、氨基酸组成分析、傅立叶变换红外 (Fourier transform infrared, FTIR) 光谱仪、差示扫描量热法 (differential scanning calorimetry, DSC)、热重分析仪 (thermal gravimetric analyzer, TGA)、荧光光谱分析等方法, 考察了蒸汽爆破预处理对芝麻粕蛋白质结构与功能性质的影响, 旨在为芝麻饼粕的高值化开发利用提供理论参考和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

芝麻粕, 河南省南阳市当地市场油坊, 为未脱壳

第一作者: 硕士研究生 (易军鹏副教授为通信作者, E-mail: yijunpeng@126.com)

基金项目: 河南省科技攻关计划项目 (182102110085)

收稿日期: 2021-09-29, 改回日期: 2021-11-01

白芝麻经热榨后的产物;非转基因一级大豆油,中粮福临门食品营销有限公司;水解蛋白氨基酸标品,德国曼默博尔公司;正己烷、十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)、乙醇(95%)、NaOH、CuSO₄、KBr、浓H₂SO₄、HCl等,均为分析纯,天津德恩化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

QBS-80B 蒸汽爆破设备,鹤壁正道生物能源有限公司;TM3030Plus 扫描电镜,日本日立高新技术公司;X-rite Color I5 色差计,美国爱色丽公司;VERT-TEX70 中红外光谱仪,德国布鲁克仪器公司;STA 2500 Regulus 热重分析仪,德国耐驰仪器制造有限公司;Cary Eclipse 荧光分光光度计,美国安捷伦科技有限公司;A300 全自动氨基酸分析仪,德国曼默博尔公司;DSC1 差示扫描量热仪,瑞士梅特勒-托利多公司。

1.3 实验方法

1.3.1 芝麻粕蒸汽爆破预处理

将芝麻粕洗净后,用蒸馏水浸泡 12 h,然后在蒸汽压强 2.5 MPa,处理时间 90 s 的条件下进行蒸汽爆破处理。产物经 15 ℃ 低温干燥后粉碎,过 60 目筛,经正己烷脱脂后,置于冷风干燥机中干燥。

1.3.2 芝麻粕蛋白的制备

将脱脂芝麻粕粉按 1:10 固液比(g:mL)加入蒸馏水中,调 pH 值为 10.0,磁力搅拌 2 h。将混合物置于离心机中,8 000 r/min 离心 10 min。将过滤后的上清液 pH 值调至 4.5,室温放置 1 h。再次离心,去除上清液,用蒸馏水洗涤蛋白质沉淀,重复进行 3 次,调 pH 值为 7.0,4 ℃ 下透析 48 h,冻干 24 h 后,得到芝麻粕蛋白样品,密封置于 4 ℃ 下保存。

1.3.3 芝麻粕蛋白结构表征

1.3.3.1 蛋白微观结构分析

将未汽爆和汽爆蛋白样品用离子溅射仪进行喷金处理,而后用扫描电镜放大 500 倍观察其微观结构。

1.3.3.2 色泽分析

用色差计测定芝麻粕蛋白的色泽,记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值,白度值(whiteness index, WI)按照公式(1)计算^[11]。

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

1.3.3.3 氨基酸分析

将 50 mg 芝麻粕蛋白与 10 mL 6 mol/L HCl 溶液混合,110 ℃ 下水解 22 h,采用 A300 全自动氨基酸分析仪测定氨基酸的种类和含量,疏水性 Q 值按照公

式(2)(3)计算^[12]:

$$\Delta Q_i = \frac{A_i/M_i}{\sum (A_i/M_i)} \times \Delta f_i \quad (2)$$

$$Q = \sum \Delta Q_i \quad (3)$$

式中: A_i , 100 g 蛋白中所含 i 氨基酸的质量, g; M_i , i 氨基酸的摩尔质量, g/mol; $\sum (A_i/M_i)$, 100 g 蛋白中所含氨基酸总摩尔数, mol; Δf_i , i 氨基酸的疏水性值, cal/mol。

1.3.3.4 表面疏水性测定

将芝麻粕蛋白用 0.01 mol/L 的磷酸盐缓冲液(pH 7.0)配制质量浓度 0.06、0.08、0.1 mg/mL 的溶液,各取 8 mL 分别加入 40 μL 的 8-苯胺-1-萘磺酸(8-anilino-1-naphthalenesulfonic acid, ANS)溶液(8.0 mmol/L ANS,用 0.01 mol/L, pH 为 7.0 的磷酸盐缓冲液配制),混合均匀,用荧光分光光度计在激发波长 390 nm,发射波长 400 ~ 600 nm,狭缝宽度均为 5 nm,电压 800 V 下测定其荧光强度。以芝麻粕蛋白浓度为横坐标,荧光强度为纵坐标作图,其初始斜率即为芝麻粕蛋白的表面疏水性。

1.3.3.5 中红外光谱分析

将芝麻粕蛋白与 KBr 粉末以 1:100 研磨压制薄片,在中红外光谱 4 000 ~ 400 cm⁻¹ 进行扫描,并以 KBr 薄片作为空白对照。通过 OMNIC 软件对数据进行基线校正,差谱,利用 Peakfit 软件将 1 600 ~ 1 700 cm⁻¹ 的谱带拟合,计算芝麻粕蛋白二级结构相对含量。

1.3.3.6 热性能测定

用差示扫描量热仪对芝麻粕蛋白进行测定。取 3.0 mg 芝麻粕蛋白,密封条件下,在 30 ~ 200 ℃ 加热,扫描速度为 10 ℃/min,试验所需气体为 N₂。

用热重分析仪对芝麻粕蛋白进行测定。取 7.0 mg 芝麻粕蛋白样品,在 30 ~ 800 ℃ 加热,升温速度为 10 ℃/min,流速为 20 mL/s,试验所需气体为 N₂。

1.3.3.7 荧光光谱测定

室温下,用荧光分光光度计测定芝麻粕蛋白糖基化荧光。用 0.01 mol/L 磷酸缓冲液将芝麻粕蛋白样品稀释为 0.3 mg/mL,8 000 r/min 下离心 10 min。以 340 nm 为激发波长,在 360 ~ 600 nm 处进行扫描,以磷酸盐缓冲液作为空白对照。

1.3.4 芝麻粕蛋白功能性质

1.3.4.1 溶解度测定^[13]

将芝麻粕蛋白样品以 1:100 的质量比溶解分散

于蒸馏水中并调 pH 值为 7.0, 室温下搅拌 2 h, 而后在 4 ℃, 8 000 r/min 下离心 10 min, 收集上清液。采用全自动凯氏定氮仪分别检测样品和上清液中的蛋白质含量。以上清液中蛋白质占样品中蛋白质的百分比表示芝麻粕蛋白的溶解度。

1.3.4.2 持油性测定^[14]

将 0.1 g 芝麻粕蛋白与 5 mL 大豆油置于预先称好的离心管中, 混合均匀。静置 0.5 h, 将样品在 8 000 r/min 下离心 20 min, 去除上清液后, 称重, 根据公式(4)计算蛋白质样品持油性:

$$FAC = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad (4)$$

式中: FAC, 蛋白质样品持油性; m_2 , 离心后沉淀和离心管总质量, g; m_1 , 离心管和蛋白样品干重的总质量, g; m_0 , 蛋白样品的质量, g。

1.3.4.3 起泡性(foaming characteristic, FC)测定^[15]

将 0.3 g 芝麻粕蛋白与 30 mL 蒸馏水加入到烧杯中, 混合均匀, 用均质机在 10 000 r/min 下搅拌 1 min, 迅速将蛋白溶液及泡沫转移至量筒内, 测量泡沫体积。静置 0.5 h 后再次测量泡沫体积。蛋白样品的 FC 及起泡稳定性(foaming stability, FS)按照公式(5)(6)计算:

$$FC/\% = \frac{V_1}{V_0} \times 100 \quad (5)$$

$$FS/\% = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (6)$$

式中: V_0 , 蛋白溶液的体积, mL; V_1 , 初始泡沫体积, mL; V_2 , 静置 0.5 h 后的泡沫体积, mL。

1.3.4.4 乳化性测定^[16]

将 0.1 g 芝麻粕蛋白与 0.01 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 7.0)20 mL 充分混匀, 从中取 6 mL 蛋白溶液, 加入 2 mL 大豆油, 用均质机(10 000 r/min)在室温条件下搅拌 1 min。分别在 0 和 10 min 吸取 125 μ L 乳浊液, 与 25 mL 质量分数 0.1% SDS 混匀, 以 SDS 为空白参比, 测定溶液在 500 nm 处的吸光度 A , 用 0 min 的吸光度值表示乳化性。乳化稳定性指数(emulsion stability index, ESI)按照公式(7)计算:

$$ESI = \frac{A_0 \times \Delta t}{A_0 - A_1} \quad (7)$$

式中: A_0 , 0 min 的吸光度值; A_1 , 10 min 的吸光度值; Δt 为时间差, min。

1.3.5 数据处理分析

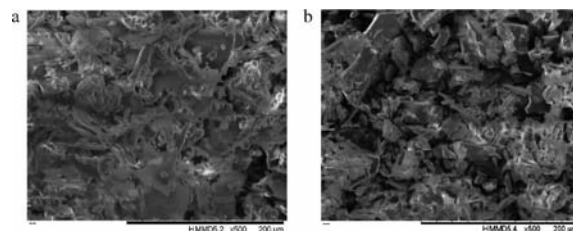
所有试验检测均平行测定 3 次。数据处理分析采用 Origin 2021b 和 IBM SPSS 22 软件, $P < 0.05$ 被

认为差异显著。

2 结果与分析

2.1 芝麻粕蛋白扫描电镜结果分析

图 1-a、图 1-b 分别为未汽爆和经过汽爆的芝麻粕蛋白微观结构图。未经蒸汽爆破处理的蛋白样品有聚集现象, 出现团状聚合物, 且具有较大片状结构, 而汽爆处理后的芝麻粕蛋白则以较小的片状形式存在, 结构变得松散, 因此可看出, 经过汽爆处理后提取的芝麻粕蛋白聚集程度变弱, 分子间排列相对松散, 由此也可解释汽爆后蛋白样品溶解性的提高。



a - 未蒸汽爆破; b - 蒸汽爆破

图 1 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白微观结构的影响

Fig. 1 Effect of steam explosion on protein micro structure of sesame meal

2.2 芝麻粕蛋白色泽

芝麻粕富含蛋白质和碳水化合物, 因此在蒸汽爆破的高温高压条件下, 会有美拉德反应的发生, 生成棕黑色物质^[17], 而蛋白的颜色可以显示美拉德反应的程度。汽爆及未汽爆处理的样品颜色变化见表 1。相对于未汽爆样品, 汽爆处理后得到的芝麻粕蛋白 L^* 、 a^* 、 b^* 、WI 值均下降, 说明亮度降低, 绿色度和蓝色度增加, 此外, 白度值的降低表明蒸汽爆破处理后蛋白样品发生了更程度的美拉德反应, 产生更多的棕色物质。

表 1 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白色泽的影响

Table 1 Effect of steam explosion on color of sesame meal protein

芝麻粕蛋白	L^*	a^*	b^*	WI
未蒸汽爆破	47.57 $\pm$ 0.23 ^a	6.78 $\pm$ 0.09 ^a	12.47 $\pm$ 0.47 ^a	45.75 $\pm$ 0.31 ^a
蒸汽爆破	42.40 $\pm$ 0.30 ^b	4.32 $\pm$ 0.09 ^b	8.27 $\pm$ 0.20 ^b	41.65 $\pm$ 0.18 ^a

注: 同一列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) (下同)

2.3 氨基酸组成分析

由表 2 可知, 芝麻粕蛋白中 Asp、Glu、Leu、Phe、Arg 含量较高, 而 Pro、Cys-Cys 含量较低, 这与之前的报道一致。其中 Asp 和 Glu 为呈鲜味氨基酸, 占芝麻粕蛋白氨基酸总量的 34%, 因此芝麻粕蛋白可以用

于生产食品工业中富含鲜味的产品。经过蒸汽爆破处理后,芝麻粕蛋白中氨基酸总量下降,可能是在汽爆过程中,较高的温度促使芝麻粕中蛋白质与还原性糖结合发生美拉德反应,因此用于测定氨基酸含量的汽爆蛋白样品纯度降低,从而氨基酸含量降低。此外,表2显示,未汽爆样品、汽爆样品的 Q 值分别为

表2 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白氨基酸组成、疏水性的影响

Table 2 Effects of steam explosion on protein amino acid composition and hydrophobicity of sesame meal

氨基酸种类	摩尔质量/ ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	Δf / ($\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1}$)	含量/[$\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$]		每种氨基酸的 $\Delta Q/(\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1})$	
			未蒸汽爆破	蒸汽爆破	未蒸汽爆破	蒸汽爆破
天冬氨酸 Asp	133.1	540	9.12	6.74	56.47	46.97
苏氨酸 Thr	119.1	440	2.76	2.46	15.54	15.59
丝氨酸 Ser	105.1	40	2.90	2.55	1.68	1.67
谷氨酸 Glu	147.1	550	20.79	18.75	118.69	120.50
脯氨酸 Pro	115.1	260	0.34	0.26	11.73	10.09
甘氨酸 Gly	75.1	0	3.92	3.63	0.00	0.00
丙氨酸 Ala	89.1	730	3.75	3.49	46.85	49.15
胱氨酸 Cys ₂	240.4	0	0.22	0.19	0.00	0.00
缬氨酸 Val	117.1	160	3.82	3.56	84.18	88.31
蛋氨酸 Met	149.2	130	2.90	2.62	38.52	39.16
异亮氨酸 Ile	131.2	290	4.63	4.18	160.04	162.64
亮氨酸 Leu	131.2	240	7.20	6.78	202.64	214.95
酪氨酸 Tyr	181.2	280	4.38	4.20	105.93	114.34
苯丙氨酸 Phe	165.2	260	6.98	6.12	170.96	168.74
组氨酸 His	155.2	500	3.01	2.89	14.78	16.00
赖氨酸 Lys	146.2	150	2.93	2.73	45.90	48.14
精氨酸 Arg	174.2	730	8.43	6.86	53.91	49.41
合计			88.04	77.99	1 127.82	1 145.67

2.4 芝麻粕蛋白表面疏水性分析

表面疏水性是一个与蛋白质结构、稳定性、脂肪结合能力相关的物理化学常数。在一个溶液体系中,表面疏水性的大小会影响蛋白质与其他物质的相互作用,例如水分子、油脂等,进而影响蛋白质的功能性质^[19]。当蛋白质受到一些外部因素的影响发生变性时,其疏水性也会受到影响,如表3所示。

表3 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白表面疏水性的影响

Table 3 Effect of steam explosion on the surface hydrophobicity of sesame meal protein

样品种类	表面疏水性/($\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1}$)
未蒸汽爆破	23.268 ± 4.659^b
蒸汽爆破	34.507 ± 5.673^a

经过蒸汽爆破处理后,芝麻粕蛋白的疏水性增加,可能由于汽爆破坏了蛋白质分子之间的疏水作用力,改变了蛋白样品的结构,使其内部疏水基暴露出来,致使表面疏水性增加。

2.5 傅里叶变换红外谱图分析

由图2可知,蒸汽爆破处理前后得到的芝麻粕蛋白都显现出基本一致的吸收峰,包括在 $3\,500 \sim 3\,000 \text{ cm}^{-1}$

$1\,127.82$ 、 $1\,145.67 \text{ cal/mol}$, Q 值的升高可能是由于汽爆使更多疏水性氨基酸暴露出来,增加了芝麻粕蛋白的疏水性。同时,蛋白的疏水性与苦味也相关联,当 Q 值高于 $1\,400 \text{ cal/mol}$ 时,蛋白具有苦味^[12,18]。因此可推测,经过汽爆处理之后蛋白样品疏水性增加,但不易使其产生苦味。

($\text{O}-\text{H}$ 和 $\text{N}-\text{H}$ 伸缩)、 $2\,980 \sim 2\,850 \text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}-\text{H}$ 伸缩)、 $1\,700 \sim 1\,600 \text{ cm}^{-1}$ (酰胺 I 带, $\text{C}=\text{O}$ 伸缩)、 $1\,580 \sim 1\,480 \text{ cm}^{-1}$ (酰胺 II, $\text{C}-\text{N}$ 伸缩, $\text{N}-\text{H}$ 弯曲)、 $1\,300 \sim 1\,220 \text{ cm}^{-1}$ (酰胺 III 带, $\text{C}-\text{O}$ 和 $\text{C}-\text{N}$ 伸缩, $\text{O}=\text{C}-\text{N}$ 和 $\text{N}-\text{H}$ 弯曲)处都出现了典型的酰胺带振动^[20],由此说明蒸汽爆破过程中没有新的官能团产生。

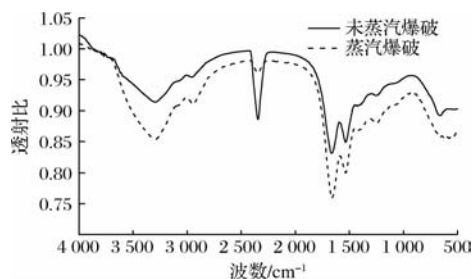


图2 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白二级结构的影响

Fig.2 Effect of steam explosion on protein secondary structure of sesame meal

对酰胺 I 进行高斯二阶导数处理及谱图曲线拟合来表示芝麻粕蛋白二级结构,根据 α -螺旋($1\,650 \sim$

1 660 cm^{-1})、无规则卷曲(1 640 ~ 1 650 cm^{-1})、 β -折叠(1 610 ~ 1 640 cm^{-1} ; 1 670 ~ 1 680 cm^{-1})、 β -转角(1 660 ~ 1 670 cm^{-1} ; 1 680 ~ 1 700 cm^{-1})的各子峰积分面积计算各二级结构的相对含量^[21]。表4结果显示,汽爆后酰胺 I 波段中 β -折叠、 β -转角、无规则卷曲含量增加, α -螺旋减少,这表明蒸汽爆破使 α -螺旋向 β -折叠、 β -转角、无规则卷曲转变,芝麻粕蛋白的二级结构被破坏,部分有序二级结构转变为未折叠或无序的结构。此外,二级结构的变化表明,蒸汽爆破过程中发生了溶解和再生,导致蛋白质结构的变性。

表4 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白二级

结构含量的影响

单位: %

Table 4 Effect of steam explosion treatment on protein secondary structure content of sesame meal

样品	α -螺旋	无规则卷曲	β -折叠	β -转角
未蒸汽爆破	33.80 $\pm$ 0.24 ^a	9.55 $\pm$ 0.21 ^b	39.26 $\pm$ 0.18 ^b	17.39 $\pm$ 0.08 ^b
蒸汽爆破	12.89 $\pm$ 0.19 ^b	14.68 $\pm$ 0.13 ^a	47.53 $\pm$ 0.05 ^a	24.90 $\pm$ 0.12 ^a

2.6 热性能分析

DSC 可测定蛋白质热稳定性,同时也能显示出蛋白质有序构象的变化。通过表5及图3可知,未汽爆和汽爆处理的芝麻粕蛋白样品的变性温度分别为66.17 和 74.17 $^{\circ}\text{C}$,热焓值分别为151.78 和 97.12 J/g 。 T_d 的升高说明蒸汽爆破处理后,蛋白样品的热稳定性增强, ΔH 的减少说明汽爆后芝麻粕蛋白分子变得更无序。

表5 蒸汽爆破处理前后芝麻粕蛋白 T_d 、 ΔH 的变化Table 5 Changes of T_d , ΔH of sesame meal protein before and after steam explosion

样品类型	$T_d/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
未蒸汽爆破	66.17	115.78
蒸汽爆破	74.17	97.12

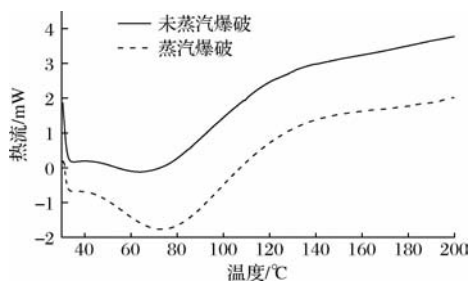


图3 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白 DSC 的影响

Fig. 3 Effect of steam explosion on DSC of sesame meal protein

对图4分析可知,蛋白样品热裂解主要分为2个阶段:第一失重阶段在30 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$,主要是样品中水

分损失所致;第二失重阶段在200 ~ 500 $^{\circ}\text{C}$,可能是由于高温导致S—S、O—N、O—O键断裂,从而使蛋白降解^[10],与未汽爆的蛋白样品相比,蒸汽爆破处理后提取的蛋白具有更高的热稳定性,这与DSC测定结果相对应,进而证实了蒸汽爆破可以提高芝麻粕蛋白的热稳定性。

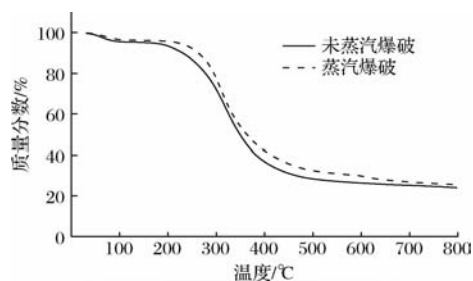


图4 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白热重的影响

Fig. 4 Effect of steam explosion on thermal weight of sesame meal protein

2.7 蛋白质糖基化

荧光物质是美拉德反应的产物之一,同时它也是颜色物质的前提物^[22],因此,可通过蛋白质糖基化产物的荧光光谱图来判断芝麻粕蛋白美拉德反应进行的程度。通常在420 ~ 440 nm的荧光波长可表示蛋白质糖基化终产物的形成^[22]。如图5所示,相比未汽爆样品,蒸汽爆破处理后的蛋白荧光强度下降,可能在高温高压条件下美拉德反应更为剧烈,使更多的荧光物质向有色物质转变,这也与蛋白色泽分析结果相一致。

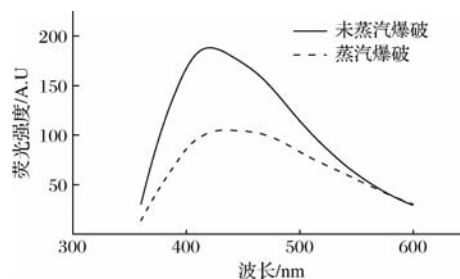


图5 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白荧光的影响

Fig. 5 Effect of steam explosion on protein fluorescence of sesame meal

2.8 蒸汽爆破对芝麻粕蛋白功能性质的影响

由表6可知,经过蒸汽爆破处理后,芝麻粕蛋白的溶解度提高。蒸汽爆破时,芝麻粕处于一种高压高温的环境,而适当的热处理可改善蛋白质的溶解性,可能由于热处理使蛋白样品的结构发生改变,从而其聚集状态发生变化。此外,在蒸汽爆破过程中,蛋白质可能与亲水基团发生美拉德反应,增加了蛋白质的溶解度。

表6 蒸汽爆破处理对芝麻粕蛋白功能性质的影响

Table 6 Effect of steam explosion on functional properties of sesame meal protein

功能性质	样品	
	未蒸汽爆破	蒸汽爆破
溶解性/%	52.48 ± 0.26 ^b	69.19 ± 0.14 ^a
起泡性/%	42.33 ± 1.04 ^b	56.67 ± 1.50 ^a
起泡稳定性/%	33.07 ± 0.90 ^a	50 ± 1.45 ^b
吸油性/(g · g ⁻¹)	6.26 ± 0.08 ^a	8.34 ± 0.04 ^b
乳化性	0.100 ± 0.002 ^b	0.128 ± 0.001 ^a
乳化稳定性/min	25.16 ± 0.16 ^a	34.59 ± 0.27 ^b

如表6所示,经过蒸汽爆破处理的芝麻粕蛋白起泡性及起泡稳定性均高于未汽爆样品。起泡性及起泡稳定性的改善可能是由于在汽爆过程中,芝麻粕蛋白分子的展开导致越来越多的疏水区域暴露出来,氨基酸测定数据表明了汽爆后蛋白疏水性的增加,中红外光谱仪测定数据也证实了汽爆后芝麻粕蛋白结构的变化。高溶解度是蛋白质优良起泡性及起泡稳定性的基础,当蛋白质溶解度较高时会增加溶液的黏度,从而使泡沫结构更硬、更稳定^[23]。

在很多食品和生物体系中,蛋白质的非极性键与脂类的非极性脂肪族链存在疏水性作用。通过表6可知,相比未汽爆样品,蒸汽爆破处理后芝麻粕蛋白持油性有所提高。通过对蛋白样品中疏水性氨基酸测定可知,汽爆预处理后蛋白样品发生变性,蛋白质疏水性增加,继而形成了更多脂质与蛋白质络合物,使得持油性升高^[24]。

蛋白质的乳化特性与分子性质有关,如蛋白质的柔性、美拉德反应、疏水性等。根据红外酰胺I波段二级结构的测定结果可知,汽爆后芝麻粕蛋白发生变性,蛋白样品的结构慢慢展开,有序的 α -螺旋结构被破坏,部分逐渐向未折叠或无序的结构转化,蛋白样品柔韧性增强,使其较易吸附于界面,从而增强乳化性。从色差及荧光光谱结果测定可知,汽爆后芝麻粕蛋白发生了美拉德反应,使得蛋白样品上亲水基团增多,最终形成的物质具有蛋白在油水界面上的吸附性以及糖在水相界面的溶解性质,使界面活性增强,乳化活性提高^[25]。同时蒸汽爆破促使更多的蛋白质疏水基团暴露出来,继而界面张力降低,界面吸附力升高,从而增强了油-水界膜的稳定性。

3 结论

本文研究了蒸汽爆破预处理对芝麻粕蛋白结构和功能特性的影响,旨在改善芝麻粕蛋白的功能性质。结果表明,经过蒸汽爆破处理,芝麻粕蛋白的氨

基酸含量下降,疏水性增加,亮度降低,稳定性增强, ΔH 的降低,蛋白样品变得更加无序;蛋白质红外结构表征显示,汽爆后蛋白样品酰胺I波段中 β -折叠、 β -转角、无规则卷曲含量增加, α -螺旋减少,芝麻粕蛋白的二级结构被破坏,部分有序二级结构转变为未折叠或无序的结构;荧光测定结果发现蒸汽爆破促进了蛋白样品的美拉德反应;蒸汽爆破增加了芝麻粕蛋白的溶解性、水溶性,改善了发泡和乳化性能。因此,蒸汽爆破可作为一种绿色技术来改善芝麻粕蛋白的功能特性,并使改性的蛋白质有望应用于食品产业。

参 考 文 献

- [1] 王振斌,王玺,林晓明,等.响应面法优化芝麻饼粕蛋白的制备条件[J].食品工业科技,2014,35(5):167-171.
WANG Z B, WANG X, LIN X M, et al. Preparation conditions optimization of sesame cake protein using response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(5): 167-171.
- [2] INYANG U E, IDUH A O. Influence of pH and salt concentration on protein solubility, emulsifying and foaming properties of sesame protein concentrate[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1996, 73(12):1 663-1 667.
- [3] BREWER D R, FRANCO J M, GARCIA-ZAPATEIRO L A. Rheological properties of oil-in-water emulsions prepared with oil and protein isolates from sesame (*Sesamum indicum*) [J]. Food Science and Technology, 2016, 36(1):64-69.
- [4] 张国治,袁东振,芦鑫,等.3种芝麻蛋白结构和性质比较研究[J].中国油脂,2017,42(7):55-58;64.
ZHANG G Z, YUAN D Z, LU X, et al. Comparison of structure and properties of three kinds of sesame proteins [J]. China Oils and Fats, 2017, 42(7):55-58;64.
- [5] 张燕鹏.蒸汽闪爆辅助提取高温豆粕中蛋白质的工艺及其机制研究[D].无锡:江南大学,2013.
ZHANG Y P. Study on process and mechanism of steam flash explosion-assisted extraction of protein from heat-denatured soybean meal [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [6] 王堃,蒋建新,宋先亮.蒸汽爆破预处理木质纤维素及其生物转化研究进展[J].生物质化学工程,2006,40(6):37-42.
WANG K, JIANG J X, SONG X L. Research progress on the steam explosion pretreatment of the lignocellulose and its bioconversion [J]. Biomass Chemical Engineering, 2006, 40(6):37-42.
- [7] CARVALHO A F A, MARCONDES W F, DE OLIVA NETO P, et al. The potential of tailoring the conditions of steam explosion to produce xylo-oligosaccharides from sugarcane bagasse [J]. Bioresource Technology, 2018, 250:221-229.
- [8] 张燕鹏,杨瑞金,华霄,等.蒸汽爆破辅助提取高温豆粕中的蛋白质[J].食品与发酵工业,2013,39(1):190-193.
ZHANG Y P, YANG R J, HUA X, et al. Soybean meal protein thermal extraction by steam flash-explosion [J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(1):190-193.
- [9] 那治国,佟猛,张岚,等.蒸汽闪爆处理对米糠粕中蛋白质功能特性的影响[J].食品科技,2019,44(11):206-212.
NA Z G, TONG M, ZHANG L, et al. Effect of steam flash explosion

- on functional properties of rice bran meal protein[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(11):206–212.
- [10] ZHANG S Y, ZHENG L L, ZHENG X Y, et al. Effect of steam explosion treatments on the functional properties and structure of *Camellia* (*Camellia oleifera* Abel.) seed cake protein[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93:189–197.
- [11] PATHARE P B, OPARA U L, AL-SAID F A J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(1):36–60.
- [12] NEY K H. Voraussage der bitterkeit von peptiden aus deren aminosäurezu-sammensetzung[J]. Zeitschrift Für Lebensmittel-Untersuchung Und -Forschung, 1971, 147(2):64–68.
- [13] JUNG S, MAHFUZ A A. Low temperature dry extrusion and high-pressure processing prior to enzyme-assisted aqueous extraction of full fat soybean flakes[J]. Food Chemistry, 2009, 114(3):947–954.
- [14] TANG C H. Functional properties and *in vitro* digestibility of buckwheat protein products: Influence of processing[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(4):568–576.
- [15] 孔慧广. 亚麻籽饼粕中蛋白的提取及其理化性质研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2018.
- KONG H G. Extraction and physicochemical properties of protein from flaxseed cake[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018.
- [16] 管军军, 裴爱泳, 周瑞宝. 糖对大豆分离蛋白及其改性物乳化性能的影响[J]. 无锡轻工大学学报, 2004, 23(1):84–88;93.
- GUAN J J, QIU A Y, ZHOU R B. Effects of saccharides on the emulsifying characteristics of soybean protein and its modified products[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2004, 23(1):84–88;93.
- [17] MARTINS S I F S, JONGEN W M F, VAN BOEKEL M A J S. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling[J]. Trends in Food Science & Technology, 2000, 11(9–10):364–373.
- [18] CHO M J, UNKLESBAY N, HSIEH F H, et al. Hydrophobicity of bitter peptides from soy protein hydrolysates[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(19):5 895–5 901.
- [19] NAKAI S. Structure-function relationships of food proteins: With an emphasis on the importance of protein hydrophobicity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1983, 31(4):676–683.
- [20] 刘玉兰, 王莎莎, 汪学德, 等. 混合溶剂醇洗芝麻浓缩蛋白的加热改性研究[J]. 中国油脂, 2014, 39(1):15–18.
- LIU Y L, WANG S S, WANG X D, et al. Heating modification of sesame protein concentrate extracted by ethanol leaching with mixed solvents[J]. China Oils and Fats, 2014, 39(1):15–18.
- [21] LONG G H, JI Y, PAN H B, et al. Characterization of thermal denaturation structure and morphology of soy glycinin by FTIR and SEM[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(4):763–774.
- [22] MORALES F J, VAN BOEKEL M A J S. A study on advanced Maillard reaction in heated casein/sugar solutions: Fluorescence accumulation[J]. International Dairy Journal, 1997, 7(11):675–683.
- [23] COELHO M S, DE LAS MERCEDES SALAS-MELLADO M. How extraction method affects the physicochemical and functional properties of chia proteins[J]. LWT, 2018, 96:26–33.
- [24] 王振斌, 王玺, 马海乐, 等. 芝麻饼粕蛋白质的理化和功能性研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(11):30–35.
- WANG Z B, WANG X, MA H L, et al. Physicochemical and functional properties of sesame cake protein[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(11):30–35.
- [25] 王子欢, 刘丹怡, 郑嘉琛, 等. 超高压条件下大豆分离蛋白美拉德反应及乳化性质[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23):49–58.
- WANG Z H, LIU D Y, ZHENG J C, et al. Preparation and emulsifying properties of Maillard reaction products of soybean protein isolate under high hydrostatic pressure[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23):49–58.

Effect of steam explosion pretreatment on the structure and functional properties of sesame meal protein

WU Tiantian¹, YI Junpeng^{1*}, DONG Jingyin¹, LI Xin²

¹(School of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China)

²(School of Chemical and Pharmaceutical, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China)

ABSTRACT To explore the effect of steam explosion pretreatment on sesame meal protein, the protein was extracted by alkali solubilization and acid precipitation, and its structure and functional properties were analyzed. Results showed that after steam explosion treatment, the microstructure of the sesame meal protein changed, and the lightness and amino acid content of the sesame meal protein decreased while the solubility and hydrophobicity of protein increased. The oil holding, foaming, and emulsifying properties of the treated protein were higher than that of the untreated protein. Both differential scanning calorimeter and thermogravimetric analyzer analysis revealed that after steam explosion treatment, the thermal stability of protein was improved. Moreover, the FTIR spectrum showed a small change in the secondary structure of protein after steam explosion treatment with an increase in the β -sheet content. Protein glycosylation analysis indicated that the Maillard reaction had been activated during the steam explosion. These observations suggest that steam explosion could improve the functional properties of sesame meal protein.

Key words sesame meal protein; steam explosion; alkali solubilization and acid precipitation; protein structure; functional properties