

限制性酶水解对大豆分离蛋白乳状液 酸诱导凝胶的影响

李琪¹, 关惠文¹, 尚丝育¹, 任柏颖¹, 高艳玲², 袁子惠¹, 顾钰璘¹, 孔祥珍¹

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122; 2. 国际香料(中国)有限公司上海分公司, 上海 200333)

摘要:旨在为生产质量更高、口感更佳的大豆基酸奶类产品提供理论指导, 采用不同蛋白酶(木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、中性蛋白酶、风味蛋白酶、胃蛋白酶)对大豆分离蛋白(SPI)进行限制性酶水解处理, 以SPI水解物及其对照品未经酶水解的SPI(HUE)为原料制备SPI乳状液酸诱导凝胶, 对HUE和SPI水解物的亚基组成及分子质量进行表征, 并分析了限制性酶水解对SPI乳状液酸诱导凝胶机械性能、摩擦学特性以及微观结构的影响。结果表明:经木瓜蛋白酶水解后SPI的7S、11S组分几乎完全消失, 经菠萝蛋白酶、中性蛋白酶、风味蛋白酶水解后SPI的7S组分明显减少, 11S组分无明显变化, 经胃蛋白酶水解后SPI的11S组分几乎消失, 而7S组分无明显变化;与HUE制备的凝胶相比, 经酶水解后SPI制备的凝胶其硬度和摩擦系数均降低, 经木瓜蛋白酶水解后制备的凝胶网络结构不均匀, 持水力降低, 而经风味蛋白酶水解后制备的凝胶的持水力和微观结构的均匀程度提高。综上, 经过合适的蛋白酶适当水解, 可以制备硬度更低、持水力更好、摩擦系数更低、微观结构更均匀的SPI乳状液酸诱导凝胶。

关键词:大豆分离蛋白; 限制性酶水解; 酸诱导凝胶; 机械性能; 摩擦学特性

中图分类号: TS201.7; TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2024)11-0027-07

Effect of limited enzymatic hydrolysis on the acid - induced gel of soybean protein isolate emulsion

LI Qi¹, GUAN Huiwen¹, SHANG Siyu¹, REN Boying¹, GAO Yanling²,
YUAN Zihui¹, GU Yuying¹, KONG Xiangzhen¹

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Shanghai Branch, International Flavors & Fragrances (China) Co., Ltd., Shanghai 200333, China)

Abstract: To provide theoretical guidance for the production of soybean based yogurt products with higher quality and better taste, soybean protein isolate (SPI) was subjected to limited enzymatic hydrolysis by different proteases (papain, bromelain, neutral protease, flavor protease, pepsin), and the SPI hydrolysates and the control samples HUE (no enzymolysis) were used to prepare acid - induced gel. The subunit composition and molecular weight of HUE and SPI hydrolysates were characterized. The effects of limited enzymatic hydrolysis on the mechanical properties, tribological properties and microstructure of acid - induced gel prepared by SPI emulsion were analyzed. The results showed that the 7S and 11S components of SPI almost disappeared after papain hydrolysis. The 7S components of SPI hydrolyzed by bromelain, neutral protease and flavor protease decreased significantly, while the 11S components had no significant change. After hydrolysis with pepsin, the 11S components of SPI almost

收稿日期: 2023-11-15; 修回日期: 2024-06-22

作者简介: 李琪(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为油脂及植物蛋白工程(E-mail) l294000257@163.com。

通信作者: 孔祥珍, 教授, 硕士生导师(E-mail) xzkong@jiangnan.edu.cn。

disappeared, while the 7S components had no obvious change. Compared with the gel prepared with HUE, the hardness and friction coefficient of the acid - induced gel prepared with SPI hydrolysates decreased, the gel prepared with SPI

hydrolysates by papain hydrolysis exhibited uneven network structure and reduced water holding capacity, while the gel prepared by flavor protease hydrolysis showed improved water holding capacity and microstructure uniformity. In conclusion, acid - induced gel prepared with SPI emulsion with lower hardness, better water holding capacity, lower friction coefficient and more uniform microstructure can be prepared by proper hydrolysis of appropriate proteases.

Key words: soybean protein isolate; limited enzymatic hydrolysis; acid - induced gel; mechanical property; tribological property

随着全球对健康饮食认知的不断深入,大豆蛋白因其优异的营养价值和环境可持续性,正逐渐在食品工业中占据重要位置^[1-2]。大豆蛋白作为一种优质植物蛋白,具有良好的功能特性^[3],如乳化性、凝胶性和持水性,这使得大豆蛋白成为食品配料中的热门研究对象。尽管如此,大豆蛋白在食品加工过程中表现出的某些技术性挑战,如凝胶形成、口感和质地控制等,仍限制了其在某些产品,特别是乳制品替代品(如大豆酸奶)中的应用。与牛奶酸奶相比,大豆酸奶在质地上存在一些问题,如质地坚硬、颗粒感强、缺乏奶油口感,严重影响了消费者的感官体验,这可能是由于大豆蛋白分子质量大,在热处理过程中易形成大聚集体和凝胶微观网络结构过于致密、不均匀以及较大的凝胶颗粒所致^[4-7]。

目前针对如何改善大豆酸奶口感问题的研究主要集中在改变发酵剂种类^[8-9]、工艺条件(超高压均质^[10]、高压微射流^[11])等方面,且在这些研究中忽略了大豆酸奶的颗粒感。奶油口感是食物的一个重要感官属性^[12],在以乳液为基础的食品中,乳液凝胶中的脂肪球滴在咀嚼过程中可以从凝胶基质中释放出来,并附着在口腔表面,从而减少摩擦和增加奶油口感^[13]。部分学者在针对改善大豆酸奶奶油口感的研究中,多数集中在探究油的含量和种类以及添加果胶等生物大分子^[5,14]的方向上,而从蛋白质结构角度出发的研究较少。

限制性酶水解被认为是改变蛋白质凝胶特性的有效方法。限制性酶水解可以使蛋白质肽链发生部分断裂,产生的水解物往往倾向于通过非共价相互作用聚集以影响蛋白质的凝胶行为,从而导致凝胶强度增加或降低^[15-16]。此外,也有研究发现某些多肽或水解物的存在能够改变蛋白质的聚集和凝胶性,如:乳清分离蛋白聚集体数量随着其水解度的增加而增加^[17];在多肽存在下,加热后 β -乳球蛋白溶液的聚集速度和程度都得到了提高,并且含有游离巯基的多肽表现出更大的聚集效应,导致了热诱导的 β -乳球蛋白凝胶的凝胶强度增加^[18]。上述

研究表明,基于蛋白质分子与蛋白质水解产物之间的相互作用,蛋白质水解产物的存在可能会显著影响蛋白质凝胶的结构、流变性质和质构特性。但目前的研究主要集中于改善大豆蛋白凝胶性质方面,而关于限制性酶水解对大豆蛋白乳状液酸诱导凝胶性质影响的研究较少。

本文系统地研究了不同蛋白酶(木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、中性蛋白酶、风味蛋白酶及胃蛋白酶)限制性水解对大豆分离蛋白(SPI)结构及SPI乳状液酸诱导凝胶性质的影响,以期通过对SPI进行特定的酶水解处理,改变蛋白质的分子结构和分子间相互作用,从而优化其功能特性,为生产质量更高、口感更佳的大豆基酸奶类产品提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

低变性脱脂大豆粕,山东禹王实业有限公司;大豆油,益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;木瓜蛋白酶,天野酶制剂有限公司;菠萝蛋白酶,淘宝优宝嘉食品旗舰店;中性蛋白酶、风味蛋白酶,诺维信生物技术公司;胃蛋白酶,国药化学试剂有限公司;葡萄糖酸- δ -内酯,北京伊诺凯化学试剂有限公司。其他化学试剂均为分析级。

1.1.2 仪器与设备

Himac CR21 G II型冷冻离心机,日本日立公司;垂直电泳仪、凝胶成像仪,伯乐生命医学产品有限公司;Scientz-10ND冷冻干燥机,江苏秉宏生物科技有限公司;TA.XT Plus型物性分析仪,美国TA公司;微牵引力测定仪,英国PCS Instrument公司;Carl Zeiss LSM 710激光共聚焦扫描显微镜,德国蔡司公司;高效液相色谱仪,美国沃特世公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SPI的制备

参照文献[19]采用碱溶酸沉法制备SPI。

1.2.2 SPI的限制性酶水解

向质量分数3%的SPI溶液中分别加入木瓜蛋

白酶、菠萝蛋白酶、中性蛋白酶、风味蛋白酶或胃蛋白酶,在酶添加量 700 U/g(以 SPI 质量为基准)下酶解 15 min。其中:加入木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、中性蛋白酶和风味蛋白酶前,将 SPI 溶液 pH 调至 7.5,温度保持在 60 ℃;加入胃蛋白酶前,将 SPI 溶液 pH 调至 2.0,温度保持在 37 ℃。酶解结束后,迅速调节 SPI 溶液 pH 至 7.0,在 95 ℃ 下加热 15 min 灭酶,得到 SPI 水解物。将经木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、中性蛋白酶、风味蛋白酶、胃蛋白酶水解制备的 SPI 水解物分别记为 HE1、HE2、HE3、HE4、HE5,对照样品为未经酶水解 SPI(即不添加蛋白酶,在 95 ℃ 加热 15 min 的 SPI 溶液),记为 HUE。

1.2.3 SPI 乳状液酸诱导凝胶的制备

向 SPI 水解物和未经酶水解 SPI 溶液中加入 3% 的大豆油(以 SPI 乳状液质量为基准),在 14 000 r/min 下剪切 2 min,再经高压均质机于 40 MPa 下均质制得 SPI 乳状液。向 SPI 乳状液中加入 0.75% 的葡萄糖酸- δ -内酯(以 SPI 乳状液质量为基准),搅拌 2 min 混合均匀,酸化 8 h 后得到 SPI 乳状液酸诱导凝胶。酸化终点 pH 为 4.5。将以 HE1~HE5 为原料制备的 SPI 乳状液酸诱导凝胶记为 G1~G5,对照样品为以 HUE 为原料制备的 SPI 乳状液酸诱导凝胶,记为 G0。

1.2.4 十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)分析

参考 Laemmli^[20]的方法对样品进行 SDS-PAGE 分析。其中,浓缩胶和分离胶的质量浓度分别为 3 g/100 mL 和 12.5 g/100 mL。使用 Image Lab 软件对电泳胶拍照、分析。

1.2.5 分子量分布测定

参照吴超^[21]的方法,用超纯水将样品稀释至蛋

白质质量浓度为 5 mg/mL,经 0.45 μ m 水系滤膜过滤后,采用体积排阻色谱法分析样品分子量分布,并以峰面积归一化法计算组分相对含量。

1.2.6 质构特性测定

参照 Wang 等^[22]的方法,将制备的 20 g 凝胶在 4 ℃ 下储藏过夜后,取出,在室温下放置平衡至少 30 min,然后使用物性分析仪测定凝胶的质构特性(硬度、稠度、黏聚性)。测定条件:P25 探头,形变量 30%,触发力 5 g,测前、测中、测后速度分别为 1、0.5、1 mm/s。

1.2.7 持水力测定

参照王旭峰^[23]的方法测定凝胶的持水力。将 5 g 左右凝胶置于 10 mL 离心管中,在 25 ℃、2 000 g 条件下离心 15 min,使用注射器将离心管中上层清液吸出,再将离心管倒置,沥干析出水分后称其质量。按式(1)计算持水力(C_w)。

$$C_w = m_1/m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为沥干吸出水分后凝胶的质量,g; m_0 为凝胶的初始质量,g。

1.2.8 摩擦系数测定

采用微牵引力测定仪测定凝胶的摩擦系数。测定条件:滑动速率 1~1 000 mm/s,滚滑比 50%,载荷 2 N,测试温度 37 ℃。

1.2.9 微观结构测定

参照王旭峰^[23]的方法,使用激光共聚焦扫描显微镜测定凝胶的微观结构。

2 结果与讨论

2.1 限制性酶水解对 SPI 亚基组成的影响

图 1 为不同蛋白酶水解后 SPI 的 SDS-PAGE 图谱。

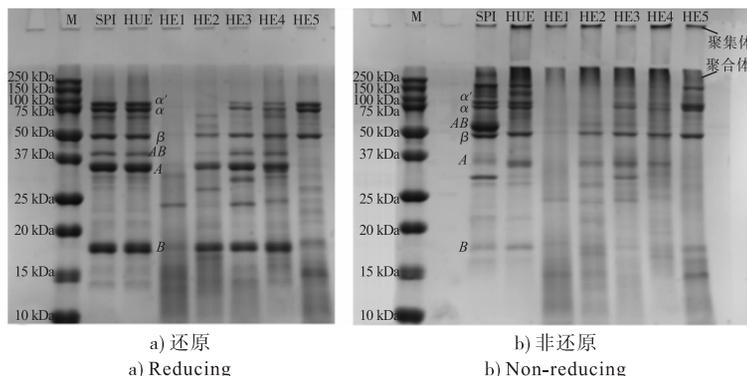


图 1 不同蛋白酶水解后 SPI 的 SDS-PAGE 图谱

Fig. 1 SDS-PAGE profiles of SPI after hydrolysis by different proteases

从图 1a 可以看出,经不同蛋白酶水解后 SPI 的亚基组成有着较为明显的差异。相较于 HUE,经木瓜蛋白酶水解后 7S 组分(α' 、 α 、 β 条带)和 11S 组分

(A、B、AB 条带)的条带几乎完全消失,出现大量小于 37 kDa 的条带;经菠萝蛋白酶水解后 α' 、 α 条带完全消失,11S 组分的条带略微变浅,出现大量小于

20 kDa 的条带;经胃蛋白酶水解后 7S 组分的条带无明显变化,而 11S 组分的条带几乎完全消失;经过中性蛋白酶和风味蛋白酶水解后 α' 、 α 条带明显变浅,尤其是 α' 条带,而 11S 组分的条带仅略微变浅,小于 20 kDa 的条带较少。SPI 经不同蛋白酶水解后结构展开,疏水基团暴露,在疏水相互作用力、二硫键以及静电相互作用力的作用下,其聚集方式和程度均会受到影响^[24]。从图 1b 可以看出,相比于 HUE,经不同蛋白酶水解后聚合体条带和聚集体条带灰度有着不同程度的降低,说明 SPI 的聚集程度下降^[19]。SPI 经木瓜蛋白酶水解后聚合体的条带最浅,其次是经胃蛋白酶水解后的,而经中性蛋白酶水解后聚集体的条带最浅。对比图 1a 和图 1b 发现,相比于还原 SDS - PAGE 图谱,非还原 SDS - PAGE 图谱出现明显的聚集体条带和聚合体条带,同时 SPI 水解后产生的小分子肽链条带变浅,说明这些小分子肽链会通过二硫键聚集,但是经水解能力强的蛋白酶(木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、胃蛋白酶)水解的 SPI 中仍有较多未参与形成聚集体的小分子肽链(<20 kDa)。

2.2 限制性酶水解对 SPI 分子质量分布的影响

图 2 为不同蛋白酶水解后 SPI 中可溶性部分的分子质量分布情况。

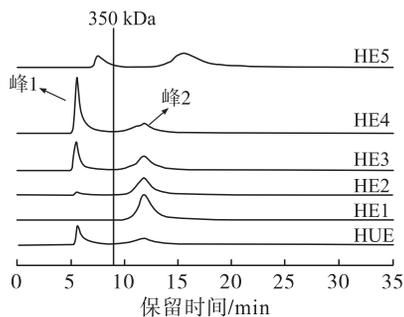


图 2 不同蛋白酶水解后 SPI 中可溶性部分的分子质量分布

Fig. 2 Molecular mass distribution of the soluble fraction in SPI after hydrolysis by different proteases

由图 2 可以看出,HUE 和经菠萝蛋白酶、中性蛋白酶、风味蛋白酶、胃蛋白酶水解后的 SPI 的分子质量分布均呈现双峰分布。其中:峰 1 为加热过程中形成的可溶性聚集体,分子质量大于 350 kDa,峰 2 为未参与形成聚集体的其他可溶性组分。经木瓜蛋白酶水解后 SPI 的分子质量分布呈现单峰分布,并未出现大分子质量的蛋白质聚集体,原因可能是经木瓜蛋白酶水解后 SPI 中的 7S、11S 组分均被完全水解成小分子肽链,这些小分子肽链在加热过程中聚集絮凝,形成不溶性聚集体。Li 等^[25]在探究木瓜蛋白酶对大豆蛋白结构的影响时发现,木瓜蛋白酶

的限制性水解会使大豆蛋白结构展开,游离巯基含量和表面疏水性增加,在加热过程中,过多暴露的疏水基团和游离巯基会使得蛋白质分子间相互聚集而不溶。此外,本研究发现,经胃蛋白酶水解后 SPI 的分子质量分布图中的出峰时间均延后,这可能是由于其 11S 组分均被水解形成小分子肽链,以及在加热过程中形成的可溶性聚集体分子质量降低导致的。

表 1 为不同蛋白酶水解后 SPI 中可溶性聚集体 (>350 kDa) 的相对含量。

表 1 不同蛋白酶水解后 SPI 中可溶性聚集体的相对含量
Table 1 Relative content of soluble aggregates in SPI after hydrolysis by different proteases

样品	相对含量/%
HUE	36.48
HE1	0
HE2	7.29
HE3	34.96
HE4	50.19
HE5	17.79

由表 1 可以看出,经木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、中性蛋白酶、风味蛋白酶、胃蛋白酶水解后 SPI 中可溶性聚集体含量 (>350 kDa) 分别为 0%、7.29%、34.96%、50.19%、17.79%。HUE 中可溶性聚集体含量为 36.48%。结合 SDS - PAGE 的结果,说明经风味蛋白酶和中性蛋白酶水解的 SPI 因水解程度小同时疏水基团暴露,更易形成大分子可溶性聚集体,而经其他蛋白酶水解的 SPI 水解程度大,产生大量小分子肽链,不利于在加热过程中形成可溶性聚集体。

2.3 SPI 乳状液酸诱导凝胶的质构特性和持水力

表 2 为不同蛋白酶水解后制备的 SPI 乳状液酸诱导凝胶的质构特性和持水力。

由表 2 可以看出,相较于未经酶水解 SPI 制备的凝胶,经蛋白酶水解后制备的凝胶的硬度、稠度以及黏聚性均显著降低 ($p < 0.05$)。经木瓜蛋白酶水解后制备的凝胶,其硬度、稠度、黏聚性最低,这可能是木瓜蛋白酶水解效率高,酶水解后的 SPI 主要以小分子蛋白为主,而这对蛋白质相互交联,导致形成的凝胶网络结构疏松脆弱所致。经胃蛋白酶水解后制备的凝胶,其硬度、稠度、黏聚性仅高于用经木瓜蛋白酶水解后制备的凝胶的,其原因可能是经胃蛋白酶水解后 SPI 中 11S 组分几乎完全被水解,而大豆蛋白中 11S 组分越少,其形成凝胶的硬度、黏度越低^[26]。相较于未经酶水解 SPI 制备的凝胶,经菠萝蛋白酶、中性蛋白酶、风味蛋白酶水解后制备的凝胶的硬度分别降低了 56.78%、48.43%、

55.97%。此外,相较于未经酶水解 SPI 制备的凝胶,经不同蛋白酶水解后制备的凝胶的持水力变化不一,如:风味蛋白酶水解后制备的凝胶的持水力提高了6.80% ($p < 0.05$),经中性蛋白酶水解后制备的凝胶的持水力无显著变化 ($p > 0.05$),而经其他

3种蛋白酶水解后制备的凝胶的持水力均显著降低 ($p < 0.05$)。考虑 SPI 乳状液酸诱导凝胶需要适宜的硬度和持水力来保证顺滑的口感以及稳定性,确定经风味蛋白酶水解后制备的 SPI 乳状液酸诱导凝胶具有最佳的质构特性。

表2 不同蛋白酶水解后制备的 SPI 乳状液酸诱导凝胶的质构特性和持水力

Table 2 Textural properties and water holding capacity of acid - induced gels of SPI emulsion prepared by different proteases hydrolysis

样品	硬度/g	稠度/(g·s)	黏聚性/g	持水力/%
G0	172.98 ± 1.26 ^a	1 127.31 ± 52.60 ^a	-15.95 ± 0.22 ^d	73.06 ± 0.71 ^b
G1	9.79 ± 0.11 ^e	70.34 ± 3.35 ^e	-2.63 ± 0.23 ^a	60.02 ± 2.59 ^d
G2	74.75 ± 2.37 ^e	541.82 ± 20.87 ^e	-12.39 ± 1.51 ^e	64.59 ± 2.23 ^e
G3	89.20 ± 3.16 ^b	628.53 ± 8.03 ^b	-10.97 ± 1.05 ^e	74.01 ± 0.95 ^b
G4	76.17 ± 1.52 ^e	534.27 ± 6.84 ^e	-11.87 ± 0.97 ^e	78.03 ± 2.40 ^a
G5	23.30 ± 1.60 ^d	186.94 ± 3.31 ^d	-5.73 ± 0.23 ^b	45.37 ± 4.21 ^e

注:同列不同字母表示存在显著差异 ($p < 0.05$)

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$)

2.4 SPI 乳状液酸诱导凝胶的摩擦学特性

凝胶润滑性能的好坏在很大程度上决定了凝胶是否具有受欢迎的爽滑口感,而凝胶的摩擦学特性反映了凝胶的润滑性能^[5,13]。凝胶的摩擦学特性主要通过 Stribeck 曲线来表征。Stribeck 曲线是通过绘制凝胶在摩擦副接触面之间剪切时滚动速率与摩擦系数的关系曲线,其包括3个不同区域:边界润滑区域、混合润滑区域和流体动力润滑区域^[5]。图3为经不同蛋白酶水解后的 SPI 乳状液酸诱导凝胶的 Stribeck 曲线。

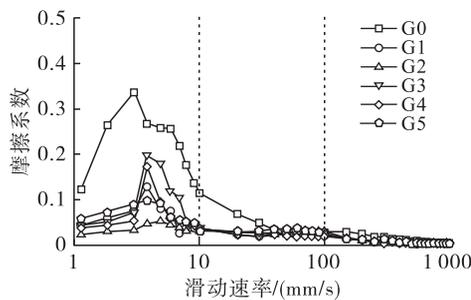


图3 不同蛋白酶水解后制备的 SPI 乳状液酸诱导凝胶的摩擦系数

Fig. 3 Friction coefficients of acid - induced gels of SPI emulsion prepared by different proteases hydrolysis

由图3可以看出,不同凝胶样品表现出不同的润滑性质。相较于未经酶水解 SPI 制备的凝胶,经不同蛋白酶水解后制备的凝胶在低速区具有更低的摩擦系数,这可能是由于经不同蛋白酶水解后制备的凝胶的网络结构疏松,凝胶硬度低,更容易破裂,使得蛋白质与油更快地从凝胶中释放,形成一层薄薄的润滑膜^[27],对摩擦副起到润滑作用,从而使得

摩擦系数降低。当滑动速率增加时,所有凝胶样品的摩擦系数均先升高后快速下降。在滑动速率为10 mm/s时(混合润滑区域),相较于未经酶水解 SPI 制备的凝胶,经不同蛋白酶水解后制备的凝胶的摩擦系数均明显降低,这说明经过这5种蛋白酶水解后制备的凝胶具有较好的润滑性能和较好的爽滑口感。Wijk等^[28]研究证明了油滴的大小和浓度会影响半固体产品的摩擦系数,小油滴和高脂肪浓度的产品具有较高润滑性质。而本研究中经过不同蛋白酶水解后制备的凝胶之间摩擦系数的差异,则还可能与凝胶颗粒、黏度有关^[14,29]。

2.5 SPI 乳状液酸诱导凝胶的微观结构

不同蛋白酶水解后制备的 SPI 乳状液酸诱导凝胶的微观结构如图4所示。

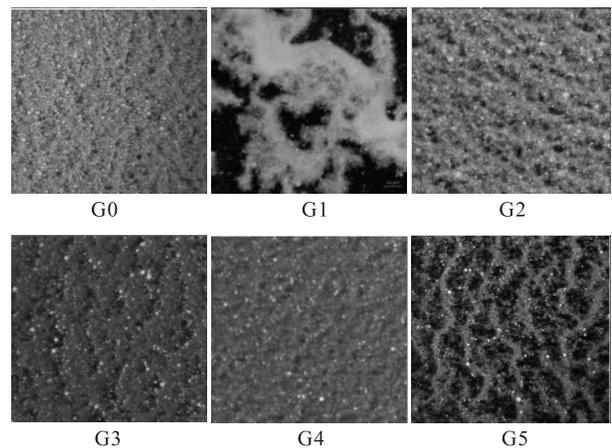


图4 不同蛋白酶水解后制备的 SPI 乳状液酸诱导凝胶的微观结构

Fig. 4 Microstructure of acid - induced gels of SPI emulsion prepared by different proteases hydrolysis

由图4可见:相较于未经酶水解 SPI 制备的凝胶,经风味蛋白酶和中性蛋白酶水解后制备的凝胶其微观结构更加均匀,孔隙更小;而经木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、胃蛋白酶水解后制备的凝胶其结构较为疏松,孔隙较大。这说明,SPI 经过适当酶水解处理后可以提高其所制备的凝胶网络结构的均匀程度,进而提高凝胶的持水力,而酶水解程度增大则会使凝胶中的孔隙变大,持水力下降,可能是因为酶水解程度增大使得 SPI 产生较小的肽链,不利于在酸化过程中形成致密均匀的网络结构。

3 结论

本文研究了不同蛋白酶(木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、中性蛋白酶、风味蛋白酶、胃蛋白酶)的限制性水解对 SPI 结构及其乳状液酸诱导凝胶质构特性、持水力、摩擦学特性、微观结构的影响。结果表明:限制性酶水解可以降低 SPI 聚集程度,使凝胶的硬度和摩擦系数降低;凝胶的持水力、微观结构的均匀程度与 SPI 的酶解程度有关;木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、胃蛋白酶对 SPI 的水解作用强,水解后产生的大量小分子肽链不利于在酸化过程中蛋白质之间的相互交联,使得凝胶网络结构疏松不均匀、持水力差,而经风味蛋白酶水解后制备的凝胶微观结构的均匀程度和持水力均提高。因此,经合适的蛋白酶适当水解,可以制备硬度更低、持水力更好、摩擦系数更低的大豆酸奶提供一定的理论指导。

参考文献:

- [1] FERNÁNDEZ - QUINTELA A, MACARULLA M T, DEL BARRIO A S, et al. Composition and functional properties of protein isolates obtained from commercial legumes grown in northern Spain[J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 1997, 51(4): 331 - 341.
- [2] HARPER A R, DOBSON R C J, MORRIS V K, et al. Fermentation of plant - based dairy alternatives by lactic acid bacteria [J]. *Microb Biotechnol*, 2022, 15(5): 1404 - 1421.
- [3] 李传运. 酶处理对大豆蛋白凝胶性的影响研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [4] YAZICI F, ALVAREZ V B, HANSEN P M T. Fermentation and properties of calcium - fortified soy milk yogurt[J]. *J Food Sci*, 1997, 62(3): 457 - 461.
- [5] NINGTYAS D W, TAM B, BHANDARI B, et al. Effect of different types and concentrations of fat on the physico - chemical properties of soy protein isolate gel[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 111: 106226 [2023 - 11 - 15]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106226>.
- [6] ZHANG T, GUO J, CHEN J F, et al. Heat stability and rheological properties of concentrated soy protein/egg white protein composite microparticle dispersions [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 100: 105449 [2023 - 11 - 15]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105449>.
- [7] CAYOT P, SCHENKER F, HOUZÉ G, et al. Creaminess in relation to consistency and particle size in stirred fat - free yogurt[J]. *Int Dairy J*, 2008, 18(3): 303 - 311.
- [8] 任海东. 商业发酵剂菌株分离以及组合菌在豆奶基中的发酵特性和对大豆酸奶品质的影响[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2022.
- [9] 周艳平, 张彩猛, 孔祥珍, 等. 酸奶发酵剂对大豆酸奶品质的影响[J]. *大豆科学*, 2018, 37(1): 149 - 156.
- [10] FERRAGUT V, CRUZ N S, TRUJILLO A, et al. Physical characteristics during storage of soy yogurt made from ultra - high pressure homogenized soymilk [J]. *J Food Eng*, 2009, 92(1): 63 - 69.
- [11] 雷勇刚, 郑茵, 李理. 微射流处理对发酵豆乳流变学特性及微观结构的影响[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(2): 251 - 255, 263.
- [12] DICKINSON E. On the road to understanding and control of creaminess perception in food colloids [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 77: 372 - 385.
- [13] MU S, REN F Z, SHEN Q W, et al. Creamy mouthfeel of emulsion - filled gels with different fat contents: Correlating tribo - rheology with sensory measurements [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 131: 107754 [2023 - 11 - 15]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107754>.
- [14] SAAVEDRA ISUSI G I, PAZ P, VAN DER SCHAAF U S. Texturing fermented emulsion gels from soy protein: Influence of the emulsifying agent - soy protein vs. pectin microgels - on gel microstructure, rheology and tribology [J/OL]. *Foods*, 2022, 11(3): 294 [2023 - 11 - 15]. <https://doi.org/10.3390/foods11030294>.
- [15] LAMSAL B P, JUNG S, JOHNSON L A. Rheological properties of soy protein hydrolysates obtained from limited enzymatic hydrolysis [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2007, 40(7): 1215 - 1223.
- [16] HRCKOVA M, RUSNAKOVA M, ZEMANOVIC J. Enzymatic hydrolysis of defatted soy flour by three different proteases and their effect on the functional properties of resulting protein hydrolysates [J]. *Czech J Food Sci*, 2002, 20(1): 7 - 14.
- [17] CREUSOT N, GRUPPEN H, VAN G A, et al. Peptide - peptide and protein - peptide interactions in mixtures of whey protein isolate and whey protein isolate hydrolysates [J]. *Int Dairy J*, 2006, 16(8): 840 - 849.

兰素本底。焙炒会造成油菜籽中香兰素含量大幅升高,并随制油过程进入菜籽油和压榨饼中,成品菜籽油中的香兰素含量低于压榨饼的,但高于油菜籽原料的,因此市售菜籽油及含有菜籽油的调和油中检测到的香兰素很可能是内源性的香兰素本底存在。不同炒制温度所得的油菜籽、压榨菜籽原油和压榨菜籽饼中均检出香兰素,其中炒制油菜籽中香兰素含量随炒制温度升高而明显增大,且压榨菜籽饼中含量显著高于压榨菜籽原油的,分析认为油菜籽种皮中木质素在焙炒过程的热降解可能是香兰素增加的重要原因。综上,油菜籽中存在内源性香兰素,以菜籽油及其调和油中检测出香兰素作为添加了外来香兰素的评判依据存在瑕疵。未来持续开展菜籽油生产过程中香兰素形成机制的研究,探讨不同工艺条件对其含量的影响,为菜籽油的市场监管提供更科学的理论支持。

参考文献:

- [1] 姚英政, 梁强, 熊伟, 等. 菜籽油营养与健康[J]. 四川农业科技, 2022(9): 101-103.
- [2] XU Y J, JIANG F, SONG J, et al. Understanding of the role of pretreatment methods on rapeseed oil from the perspective of phenolic compounds [J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(33): 8847-8854.
- [3] KRALJI Ć K, STJEPANOVI Ć T, OBRANOVI Ć M, et al. Influence of conditioning temperature on the quality, nutritional properties and volatile profile of virgin rapeseed oil[J]. Food Technol Biotechnol, 2018, 56(4): 562-572.
- [4] 蒋黎艳, 邓志薇, 李佳灵, 等. 浓香菜籽油挥发性风味物质的研究进展[J/OL]. 中国油脂; 1-11 [2024-04-15]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230309>.
- [5] WU Y, ZHOU R, WANG Z, et al. The effect of refining process on the physicochemical properties and micronutrients of rapeseed oils [J/OL]. PLoS One, 2019, 14(3): e0212879 [2024-04-15]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212879>.
- [6] 李颜, 姜敏杰, 梁强, 等. 菜籽油植物甾醇生理功能及影响因素[J]. 四川农业科技, 2023(7): 90-93.
- [7] “福建旺家喜”食用植物调和油再曝违规添加禁用香料 [EB/OL]. (2021-03-22) [2024-04-15]. https://www.cqn.com.cn/pp/content/2021-03/22/content_8675180.htm.
- [8] 国家食品药品监督管理总局. 关于香兰素的科学解读 [J]. 饮料工业, 2016, 19(2): 80.
- [9] 刘川, 林浩, 肖全伟, 等. 芝麻油中含有内源性香兰素的佐证研究[J]. 中国油脂, 2023, 48(1): 110-119.
- [10] QIN Z, HE M K, GAO X, et al. Degradation of the lignin in roasted sesame seed hull improves the oxidation stability of sesame oil[J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2023, 188: 115479 [2024-04-15]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115479>.
- [11] ZHANG Y, ZHANG H, ZHAO H, et al. Multi-omics analysis dissects the genetic architecture of seed coat content in *Brassica napus* [J/OL]. Genome Biol, 2022, 23(1): 86 [2024-04-15]. <https://doi.org/10.1186/s13059-022-02647-5>.
- (上接第 32 页)
- [18] KOSTERS H A, WIERENGA P A, VRIES R D, et al. Characteristics and effects of specific peptides on heat-induced aggregation of β -lactoglobulin [J]. Biomacromolecules, 2011, 12(6): 2159-2170.
- [19] 陈力扬, 华欲飞, 孔祥珍, 等. 预热变性程度对大豆蛋白凝胶性质的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 56-62.
- [20] LAEMMLI U K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4 [J]. Nature, 1970, 227(5259): 680-685.
- [21] 吴超. 大豆蛋白凝胶结构与非网络蛋白扩散行为或网络蛋白性质关系的研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2018.
- [22] WANG X, KONG X, ZHANG C, et al. Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of plant-based yoghurt and dairy yoghurt[J/OL]. Food Res Int, 2023, 164: 112375 [2023-11-15]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112375>.
- [23] 王旭峰. CaSO₄诱导大豆分离蛋白乳液凝胶性质影响因素的研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2018.
- [24] 郑环宇, 赵晓明, 张梦, 等. 不同酶切方式引发大豆蛋白构象变化及功能特性评价[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(6): 103-111.
- [25] LI C, WU X, MU D, et al. Effect of partial hydrolysis with papain on the characteristics of transglutaminase-crosslinked tofu gel [J]. J Food Sci, 2018, 83(12): 3092-3098.
- [26] 陈海敏, 华欲飞. 大豆蛋白组成与功能关系研究[J]. 西部粮油科技, 2001, 26(3): 36-38.
- [27] PHUONG T M N, BHESH B, SANGEETA P. Tribological method to measure lubricating properties of dairy products[J]. J Food Eng, 2016, 168: 27-34.
- [28] WIJK R A D, PRINZ J F. The role of friction in perceived oral texture [J]. Food Qual Prefer, 2005, 16(2): 121-129.
- [29] KRZEMINSKI A, TOMASCHUNAS M, KÖHN E, et al. Relating creamy perception of whey protein enriched yogurt systems to instrumental data by means of multivariate data analysis[J]. J Food Sci, 2013, 78(2): S314-S319.