

烹饪对高水分挤压大豆蛋白纤维结构及水分的影响

胡安娜, 张金闯*, 周欢, 郭峰, 王嘉煜, 王强

(中国农业科学院农产品加工研究所 农业农村部农产品加工综合性重点实验室 北京 100193)

摘要 为探究高水分挤压蛋白烹饪后的质构特性和水分特征变化,以大豆浓缩蛋白为原料进行高水分挤压,选取 3 种常见的烹饪方式(蒸制、煮制、炸制),研究烹饪方式及时间对挤出物纤维结构的影响,评估烹饪损失、收缩率的差异,并探究宏观、微观结构、质构特性和水分特征的变化。结果表明,蒸制可使挤出物保持较好的纤维结构及适中的硬度和剪切力,煮制使挤出物纤维结构更加松散,硬度、咀嚼度和剪切力减小,煮制 20 min 可使挤出物水分含量增加 10.38%。蒸制和煮制使挤出物的 T_{22} 、 T_{23} 增大,结合水比例减小,蛋白质与水分结合的紧密程度变差。炸制使挤出物中孔隙增大,渗透性增强。炸制 4 min 使挤出物的脂肪含量提高 3.65%,水分含量下降 20.49%,且使 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 分别减小 0.14, 7.31, 81.04 ms,结合水和自由水比例显著增大($P<0.05$)。结论:不同烹饪方式可改变挤出物的纤维结构、孔隙形态和组成成分,影响其质构特性和水分特征。研究结果为高水分挤压植物基肉制品后续烹饪工艺优化提供了理论参考,尤其在调控其质构和水分特征方面具有实际应用价值。

关键词 大豆浓缩蛋白;高水分挤压;烹饪;质构特性;水分特征

文章编号 1009-7848(2026)01-0189-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2026.01.017

随着全球人口的不断增长,对肉类的需求呈现急剧上升的趋势。面对供需失衡和资源紧张的问题,减少肉类消费逐渐被视为实现全球资源可持续利用的有效手段^[1]。植物基肉制品能够有效减少水资源消耗、土地资源使用、动物福利问题和温室气体排放,因此,越来越多的研究聚焦于植物基肉制品的开发与应用^[2]。Grand View Research 报告显示,2023 年全球植物肉市场规模为 71.7 亿美元,预计到 2030 年将达到 247.7 亿美元,年增长率为 19.4%^[3]。这一趋势表明,植物基肉制品市场正在快速增长,消费者对植物基肉制品的需求不断上升。虽然植物基汉堡肉饼、香肠、馅料等产品已经上市,但是现有产品仍不能很好地模拟纤维结构^[4]。高水分挤压是制备植物基肉制品的关键技术之一,其水分含量通常为 40%~80%。高水分挤压过程中,植物蛋白在高温和剪切力的共同作用下,经历从固态到黏弹性熔融态再到固态的 2 次相变,最终形成致密的各向异性纤维结构,能有效

模拟动物肉的外观和质地^[5-6],更适于植物基整块肉制品的生产应用,具有能源消耗低、废物产生少、操作效率高等优点^[7]。因此,高水分挤压技术逐渐成为国内外备受关注的制备新型植物基肉制品的前沿技术。

植物基肉制品的烹饪方式影响其理化特性^[8]。植物基肉制品的多汁性与脂肪含量、烹饪损失和压缩后的汁液渗出性相关^[9],可通过优化这些性质来调控植物基肉制品的感官品质。豆康宁等^[10]探究了蒸、煮、煎、炸、烘烤、微波 6 种烹饪方式对植物基肉饼品质的影响,结果发现 6 种烹饪方式均使植物基肉饼的色差增大,其中煎制和炸制分别使植物基肉饼的脂肪含量增加 13.95%和 18.13%,蒸制可保持水分不变,煮制使水分增加 5.26%,且咀嚼度较差,煎、炸、烘烤、微波可降低水分,增加硬度和咀嚼度,提高其感官品质。廖奕扬^[11]探究了植物基肉饼在不同蒸煮时间下的蒸煮损失率和质构特性,发现蒸煮时间越长蒸煮损失越大。Vu 等^[12]研究了烹饪对植物基肉饼和牛肉饼外观、质地、烹饪损失和收缩率的影响,结果发现烹饪后的植物基肉饼具有更高的持水性,收缩较小,且质地比牛肉饼更软,具有较低的硬度、内聚性、弹性、回复性和咀嚼度。当前研究的原料大多为市售植物基肉制品或由低水分挤压蛋白制得,仅侧重于单

收稿日期: 2025-02-24

基金项目: 北京市自然科学基金面上项目(6242027);中国科协青年人才托举工程项目(2022QNRC001)

第一作者: 胡安娜,女,博士

通信作者: 张金闯 E-mail: zhangjinchuang1002@163.com

一特性,而不同烹饪方式和时间对高水分挤压蛋白的纤维结构、质构特性和水分特征的综合影响仍缺乏系统分析。

根据先前的研究^[13-14],大豆浓缩蛋白能够形成较好的纤维结构。本研究以大豆浓缩蛋白为原料,制备高水分挤出物,采用蒸制、煮制、炸制3种常见烹饪方式对挤出物进行处理,旨在通过分析烹饪损失和收缩率探究挤出物的烹饪性质。同时,通过宏观和微观结构、质地特性和密度分析,探讨在不同烹饪方式和时间条件下挤出物的形态和纤维结构变化,明确烹饪对挤出物水分特征的影响。本研究对于优化植物基肉制品的质地和口感,提高其市场竞争力具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆浓缩蛋白(蛋白质72.65%、水分8.52%、脂肪0.31%、灰分6.53%),秦皇岛金海食品工业有限公司;小麦淀粉(食品级),常熟市宏新淀粉有限公司;食用油,益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司。

1.2 仪器与设备

FMHE36-24同向啮合双螺杆挤压机,湖南富马科食品工程技术有限公司;JHF-20L双运动飞刀分散混合机,郑州金合设备制造有限公司;TA612C热电偶测温仪配备TB601-5K型针式液体探头,苏州特安斯电子实业有限公司;CS-580色差计,浙江杭州彩普科技有限公司;TA-XT plus质构仪,英国Stable Micro Systems公司;D7200型相机,日本Nikon Corp公司;CX43光学显微镜,Olympus公司;SU8010型扫描电子显微镜,日本Hitachi公司;LYNX 4000型高速离心机,美国Thermo Scientific公司;HE53快速水分测定仪,梅特勒-托利多(上海)公司;Aqualab Series 4 TE水分活度测定仪,美国Decagon公司;VTMR20-010V-I型核磁共振分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 高水分挤压大豆蛋白的制备 将大豆浓缩蛋白与小麦淀粉按9:1的质量比加入混合机中混合均匀^[13-15],然后通过固体喂料器加入挤压机中,

挤压机5个区段的温度依次设置为60,80,145,150,130℃,水分含量为60%,螺杆转速为240 r/min,喂料速度为8 kg/h,模具温度为70℃,稳定后取样并进行后续烹饪处理。

1.3.2 高水分挤压大豆蛋白的烹饪处理 烹饪处理参考文献^[10]、^[16]、^[17]中的方法并稍作修改。

1) 蒸制 将水烧开,蒸笼预热5 min后将挤出物置于蒸笼内进行加热,分别于蒸制5,10,20 min时取样,冷却至室温,用吸水纸拭去表面水分。

2) 煮制 将水烧开,放入挤出物开始计时,分别于煮制5,10,20 min时取样,冷却至室温,用吸水纸拭去表面水分。

3) 炸制 炸锅中倒入食用油,将挤出物完全浸入油中,在180℃下分别炸制1,2,4 min时取样,沥油冷却至室温。

所有处理后样品均冷却至室温并称重,测量尺寸,计算烹饪损失和收缩率,剩余样品于-80℃冰箱中保存。

1.3.3 烹饪损失 参考Bhuiyan等^[18]的方法并稍作修改,通过分析烹饪前、后挤出物的质量差异来确定挤出物的烹饪损失。

$$\text{烹饪损失}(\%) = (M_1 - M_2) / M_1 \times 100 \quad (1)$$

式中: M_1 为烹饪前挤出物的质量,g; M_2 为烹饪后挤出物的质量,g。

1.3.4 收缩率 参考Bhuiyan等^[18]的方法并稍作修改,通过分析烹饪前、后挤出物的尺寸差异来确定挤出物的收缩率。

$$\text{收缩率}(\%) = [(R_L - P_L) + (R_W - P_W) + (R_T - P_T)] / (R_L + R_W + R_T) \times 100 \quad (2)$$

式中: R_L 、 R_W 、 R_T 分别为挤出物烹饪前的长度、宽度、厚度,mm; P_L 、 P_W 、 P_T 分别为挤出物烹饪后的长度、宽度、厚度,mm。

1.3.5 色泽 使用彩谱CS-600分光测色仪对挤出物样品进行测定。挤出物的总色差(ΔE)根据下式计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2} \quad (3)$$

式中:标准白色板的 L^* 、 a^* 和 b^* 值分别为89.73,-0.78和1.88。

1.3.6 宏观结构

1.3.6.1 外观观察 将新鲜的挤出物样品分别沿

挤出方向和垂直于挤出方向切开及从中部撕开,用相机拍照,观察挤出物内部纤维结构。

1.3.6.2 光学显微镜观察 将挤出物切成厚度约0.5~1 mm的薄片,室温下用光学显微镜观察,调整光强度以减少对样品的影响。

1.3.7 扫描电镜观察 将挤出物样品切成3 mm×2 mm×7 mm的小块,用戊二醛固定48 h,再用锇酸固定2 h,经过超临界CO₂干燥后,进行粘台、喷金。使用扫描电子显微镜在×200和×2 000倍和加速电压10 kV条件下拍照。

1.3.8 密度 使用DH-3000密度仪对挤出物样品进行测定。校正和水温补偿操作后,将网球放入吊栏中央,玻璃杯放到测量架上,扣除玻璃杯和网球的质量。然后将样品放入测量架上的玻璃杯中,记录样品质量,再将样品倒入网球中,用酒精清洗后放入吊栏中央,测得样品密度。

1.3.9 质构特性

1.3.9.1 硬度、弹性和咀嚼度 参考张金闯^[9]的方法,将样品裁剪成边长为15 mm×15 mm×15 mm的立方体。质构仪的操作参数为:TPA模式,探头P/36R,测试前速度2.0 mm/s,测试速度1.0 mm/s,测试后速度2.0 mm/s,下压程度50%。得到硬度、弹性和咀嚼度3个指标,综合反映质构特性。每个样品重复操作10次,去掉2个最大值和2个最小值,取平均值。

1.3.9.2 组织化度 参考张金闯^[9]的方法,将样品裁剪成边长为15 mm×15 mm×7.5 mm的长方体。质构仪的操作参数为:剪切模式,探头A/CKB,测试前速度2.0 mm/s,测试速度1.0 mm/s,测试后速度2.0 mm/s,剪切程度75%。每个样品重复测定10次,去掉2个最大值和2个最小值,取平均值。采用垂直于挤出方向与平行于挤出方向的剪切力比值定量表征组织化度。

1.3.10 离心损失 将挤出物样品切成边长为5 mm左右的小块,准确称重,使用3层滤纸将样品裹住放入50 mL离心管中,于5 000×g,4℃离心15 min,离心结束后,立即取出样品并再次称重。离心损失的计算如下:

$$\text{离心损失率}(\%) = (M_1 - M_2) / M_1 \times 100 \quad (4)$$

式中: M_1 为离心前挤出物的质量,g; M_2 为离

心后挤出物的质量,g。

1.3.11 脂肪含量 挤出物的脂肪含量参照《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》(GB 5009.6—2016)中索氏抽提法进行测定^[20]。

1.3.12 水分含量 使用HE53型快速水分测定仪测定挤出物的水分含量。称取1 g样品放入空样品盘,开始测定,测定完成后记录数据,清理样品,待温度降至48℃以下继续测定。

1.3.13 水分活度 使用Aqualab Series 4 TE水分活度仪进行测定。将挤出物裁剪成边长为5 mm×5 mm×2 mm的小块,放入水分活度仪中测定,待数据稳定后记录。

1.3.14 渗透性和汁液渗出性 参考Wang等^[21]的方法并稍作修改,将挤出物切成边长为15 mm×15 mm×15 mm的小块,记录质量,将其放入真空密封袋中,使用真空包装机在5%胭脂虫红色素溶液中真空浸泡30 min,真空度为98%。浸泡后,用纸巾吸去多余的腌渍液,记录腌渍后样品的质量,并在平行和垂直挤出方向上切割、拍照。渗透率根据以下公式计算:

$$\text{渗透率}(\%) = (M_2 - M_1) / M_1 \times 100 \quad (5)$$

式中: M_1 为浸泡前挤出物的质量,g; M_2 为浸泡后挤出物的质量,g。

使用P/36R探头沿垂直于挤出方向对每个样品进行多次压缩测试,直至其原始厚度的50%。测前、测中、测后速度分别为2,1,2 mm/s。每次压缩后记录挤出物的质量,得到从挤出物中渗出汁液的质量。

1.3.15 水分状态和分布 使用VTMR20-010V-I NMR分析仪测定挤出物的低场核磁共振,利用Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)脉冲序列进行扫描,获得样品 T_2 横向弛豫曲线,并分别对挤出物平行和垂直于挤出方向的截面获取质子密度加权成像伪彩图。

1.4 数据处理

每组试验至少重复3次,结果以“平均值±标准差”表示,采用IBM SPSS Statistics 27软件对数据进行处理与分析,采用Duncan多重比较法进行显著性分析($P < 0.05$),采用Origin 2024软件绘图。

2 结果与分析

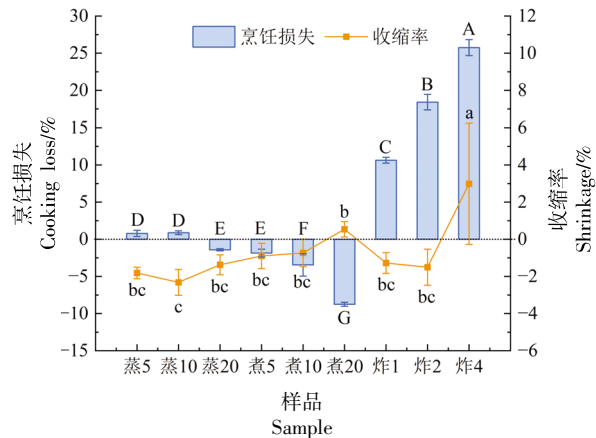
2.1 烹饪性质

2.1.1 烹饪损失 烹饪损失以烹饪前、后挤出物质量的差异来表示,烹饪损失为正值表示烹饪后挤出物质量减小,反之增大。由图1可知,蒸制5 min和10 min后挤出物质量减小,而蒸制20 min后挤出物质量增加,蒸制初期(5 min和10 min),水分流失速度较快,导致挤出物质量减小,蒸制20 min时,挤出物内部结构发生了变化,水分的蒸发与吸收之间达到平衡,随后吸收了蒸汽中的水分,导致挤出物质量增加。煮制不同时间均使挤出物质量增大,且随煮制时间延长,质量逐渐增大。炸制造成挤出物中水分的大量损失,因此质量减小,且炸制时间越长,质量越小。

2.1.2 收缩率 收缩率通过烹饪前、后挤出物的尺寸变化计算,收缩率为正值表示烹饪后挤出物发生收缩,反之之膨胀。由图1可知,经过蒸制和煮制的挤出物收缩率均呈负值,且无显著性差异,表明样品膨胀而不同蒸制和煮制时间对收缩率的影响差异不显著。炸制1 min和2 min时,挤出物表面形成一些气泡,超过原来的尺寸,导致收缩率为负值,这是由于挤出物放入热油后,表面的水分立刻蒸发,水蒸气向外逸出形成气泡^[22]。炸制4 min时,水分损失较大,挤出物收缩率达到2.99%。

2.2 色泽

色泽是影响植物基肉制品感官特性的关键因

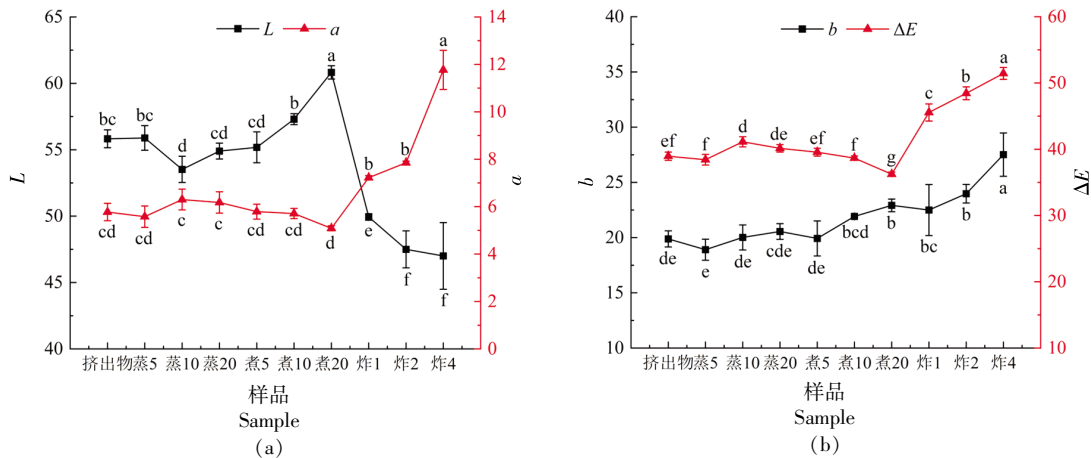


注:不同字母表示不同组别间具有显著性差异($P < 0.05$)。蒸5、蒸10、蒸20分别代表蒸制5、10、20 min的挤出物;煮5、煮10、煮20分别代表煮制5、10、20 min的挤出物;炸1、炸2、炸4分别代表炸制1、2、4 min的挤出物,下同。

图1 高水分挤压大豆蛋白的烹饪损失和收缩率

Fig.1 Cooking loss and shrinkage of high-moisture extruded soy protein

素,它直接影响消费者对产品的接受度。由图2可知,煮制时间越长,挤出物亮度越高,红绿值 a 减小,黄蓝值 b 增大。炸制时间越长,挤出物亮度越低,红绿值 a 和黄蓝值 b 均增大,炸制过程导致挤出物表面水分迅速蒸发,随着炸制时间延长,水分流失增加,并且由于油炸过程中发生美拉德反应,随着炸制时间延长,美拉德反应程度加剧,挤出物亮度降低,红绿值 a 和黄蓝值 b 增大。



注:不同小写字母表示不同组别间具有显著性差异($P < 0.05$)。

图2 高水分挤压大豆蛋白烹饪前、后的色泽变化

Fig.2 Color change of high-moisture extruded soy protein before and after cooking

2.3 结构特征和质构特性

2.3.1 宏观和微观结构 由图 3a 可知,未烹饪的挤出物表面较为光滑,呈现出较为均匀的外观,无明显裂痕。沿挤出方向切开,内部具有孔隙结构,纤维呈现出沿挤出方向排列。掰开后,显示出明显的纤维结构和孔隙结构,外层纤维结构较为紧密,结构不易松散,内部孔隙明显。经过蒸制和煮制处理的挤出物,沿挤出方向切开,纤维之间的间隙较小,呈现出均匀分布,在垂直于挤出方向的切面上也观察到孔隙减少,这是蛋白质基质吸水膨胀所致。掰开后,纤维排列较为疏松,结构较弱。煮制时间较长的挤出物表面较为平整,光滑度较高。炸制挤出物表面呈现出明显的焦黄色,归因于油脂的

浸入和美拉德反应。炸制挤出物表面凹凸不平且颜色不均匀,这是由于油炸时表面水分立即蒸发,水蒸气向外逸出形成气泡,使挤出物表面形成壳层^[2],导致表面不平且气泡处颜色较浅。炸制时间较长的挤出物切开后,可见内部孔隙较大,尤其是炸制 4 min 的挤出物内部具有较大空腔。光学显微镜图像(图 3b)显示,蒸制和煮制处理后挤出物的孔隙减少,炸制处理后孔隙增加,且炸制时间较长时孔隙增大。扫描电镜图像(图 3b)显示,在放大 200 倍观察时,蒸制处理的挤出物保持了较好的纤维结构,而煮制时间较长的挤出物表面纤维取向减弱。放大 2 000 倍时也观察到煮制处理使纤维结构减弱。

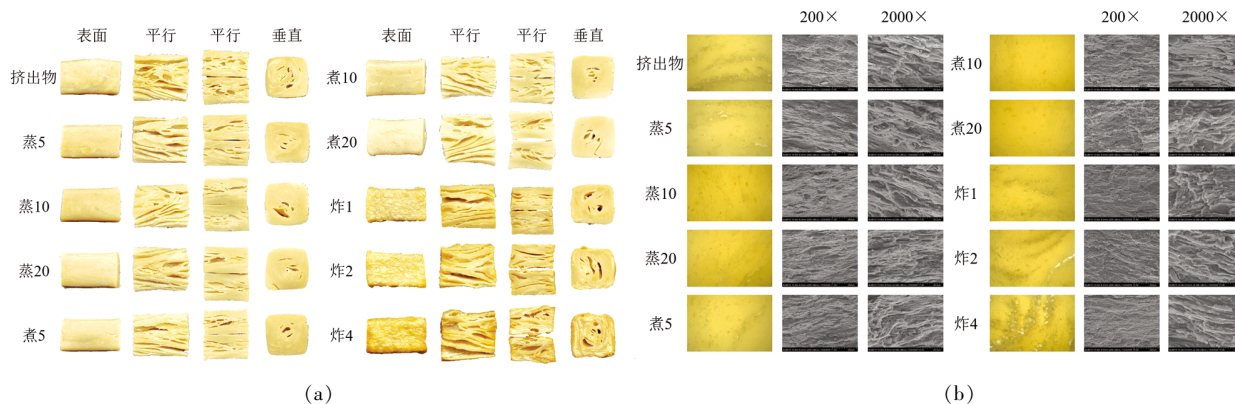
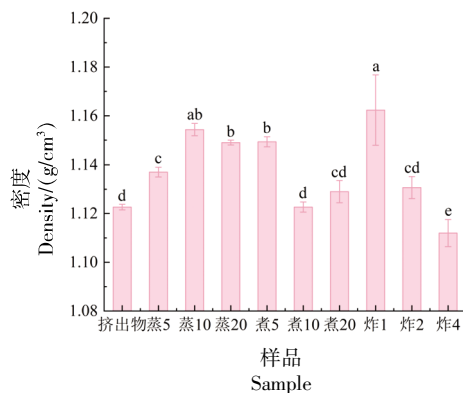


图 3 高水分挤压大豆蛋白烹饪前、后的宏观(a)与微观结构(b)

Fig.3 Macro- (a) and micro- structure (b) of high-moisture extruded soy protein before and after cooking

2.3.2 密度 挤出物的密度会影响吸水性等理化性质,这为调整产品特性提供了可能^[23]。由图 4 可知,蒸制不同时间均使挤出物的密度增大。煮制 5 min 时挤出物密度增大,随着煮制时间延长,水逐渐浸入挤出物中,使质量减小,同时缝隙被填充使体积增加,导致密度降低。炸制 1 min 时,挤出物密度增大,这是由于短时间油炸主要作用在表面,挤出物表层迅速脱水、结构紧缩,挤出物体积减小,而内部仍保持一定水分,因此密度最大。在炸至 2~4 min 时,挤出物密度减小,炸制 4 min 时密度最小,为(1.112±0.006)g/cm³,随着油炸时间延长,水分损失增加,内部结构变得多孔,导致密度下降,且炸制过程中由于食用油的浸润,部分水分被油脂替代,而油的密度比水和蛋白质基质的密度小,导致密度最小。



注:不同小写字母表示不同组别间具有显著性差异(P<0.05)。

图 4 高水分挤压大豆蛋白烹饪前、后的密度

Fig.4 Density of high-moisture extruded soy protein before and after cooking

2.3.3 质构特性 质构特性会影响消费者对高水分挤压植物基肉制品的接受度。TPA 和剪切测试揭示了不同烹饪方式处理挤出物的质构特性。由表 1 可知,蒸制和煮制时间越长,挤出物的硬度和咀嚼度越小,这主要归因于水分含量的变化。长时间煮制使挤出物结构变得松散,剪切力降低。与煮制相比,蒸制避免了水分直接浸泡的影响,挤出物保留一定硬度,且蒸制比煮制保留了更多纤维结构。经过 3 种烹饪方式处理后,挤出物的弹性无显著差异。与未烹饪挤出物相比,蒸制和煮制使挤出物的剪切力减小。煮制使纵向剪切力减小的程度

较横向剪切力大,这是由于挤出物中存在沿挤出方向连通的孔隙,水分沿挤出方向浸入到挤出物内部,导致煮制对纵向剪切力影响较大。炸制增强了挤出物的硬度、咀嚼度和剪切力。炸制时,食品表面温度迅速升高,水分急剧蒸发,导致表面形成坚硬的外壳。炸制时间越长,挤出物的硬度、咀嚼度和剪切力越高(炸 4>炸 2>炸 1)。长时间炸制使挤出物外壳更硬,且内部蛋白基质结构更致密。炸制时间从 1 min 延长至 4 min 使挤出物的组织化度从 1.04 ± 0.02 增加至 1.32 ± 0.05 ,说明炸制时间对横向剪切力影响较大。

表 1 高水分挤压大豆蛋白烹饪前、后的质构特性

Table 1 Textural properties of high-moisture extruded soy protein before and after cooking

组别	硬度/kg	弹性/%	咀嚼度/kg	横向剪切力/kg	纵向剪切力/kg	组织化度
挤出物	12.17 ± 0.82^e	85.38 ± 1.37^{abc}	6.83 ± 0.66^{cd}	1.67 ± 0.15^{cd}	1.41 ± 0.03^d	1.19 ± 0.08^e
蒸 5	13.94 ± 1.49^d	85.37 ± 1.90^{abc}	7.63 ± 0.67^c	1.39 ± 0.01^{ef}	0.97 ± 0.09^f	1.43 ± 0.11^{de}
蒸 10	12.77 ± 0.35^{de}	81.38 ± 5.09^c	6.57 ± 0.87^d	1.53 ± 0.01^{def}	1.00 ± 0.06^{ef}	1.54 ± 0.09^{cd}
蒸 20	11.83 ± 0.36^e	85.48 ± 2.87^{abc}	6.67 ± 0.40^{cd}	1.52 ± 0.05^{def}	0.93 ± 0.15^f	1.66 ± 0.24^c
煮 5	13.97 ± 0.82^d	85.04 ± 3.64^{abc}	7.62 ± 0.67^c	1.74 ± 0.06^{cd}	1.24 ± 0.05^{de}	1.40 ± 0.03^{de}
煮 10	9.86 ± 0.86^f	86.55 ± 2.8^{ab}	5.45 ± 0.41^e	1.42 ± 0.03^{def}	0.76 ± 0.08^g	1.88 ± 0.15^b
煮 20	8.57 ± 0.83^f	88.39 ± 1.87^a	5.01 ± 0.33^e	1.26 ± 0.05^f	0.61 ± 0.05^g	2.06 ± 0.13^a
炸 1	18.70 ± 0.41^c	84.93 ± 1.35^{abc}	9.86 ± 0.45^b	1.98 ± 0.11^c	1.90 ± 0.11^c	1.04 ± 0.02^g
炸 2	20.07 ± 1.07^b	83.70 ± 2.17^{bc}	10.48 ± 0.73^{ab}	2.87 ± 0.29^b	2.72 ± 0.12^b	1.05 ± 0.06^g
炸 4	21.90 ± 1.48^a	84.94 ± 1.03^{abc}	10.94 ± 0.95^a	6.75 ± 0.55^a	5.13 ± 0.47^a	1.32 ± 0.05^{df}

注:不同小写字母表示不同组别间具有显著性差异($P<0.05$)。

2.4 脂肪含量和水分特征

2.4.1 脂肪含量 由表 2 可知,蒸制和煮制处理后挤出物的脂肪含量无显著变化,炸制处理后挤出物的脂肪含量显著增加($P<0.05$),且炸制时间较长时脂肪含量较高。炸制过程中挤出物与食用油直接接触,油脂进入挤出物的孔隙中,将挤出物取出冷却时,表面孔洞内的水蒸气处于过热状态,随后内部蒸汽压力随温度降低而降低,在孔洞内外形成压差,使孔隙表面附着的油被吸入^[22]。炸制时间较长的挤出物,孔隙增大,使孔隙中附着的油增多,进而导致脂肪含量增加。

2.4.2 水分含量 由表 2 可知,挤出物经过蒸制后水分含量略有增加,煮制使水分含量增加较多,且随烹饪时间延长,水分含量增量较大,这是由于在蒸制处理时,挤出物的接触介质为水蒸气,而煮

制过程中挤出物浸泡在水中,水直接进入挤出物的孔隙中,使挤出物充分吸收水分,导致水分含量大幅度增加。炸制使挤出物水分含量降低,在 180 °C 下油炸使挤出物水分迅速蒸发,随炸制时间延长,水分持续蒸发,炸制 4 min 时水分含量降低了 20.49%。

2.4.3 水分活度 水分活度反映食品中水的自由度,影响食品的贮藏稳定性^[24]。由表 2 可知,挤出物水分活度结果表明,蒸制对挤出物水分活度的影响不显著,煮制使水分的自由程度增大,且煮制时间越长变化越明显。炸制处理后挤出物内的水分流动性较低,随着炸制时间的延长,水分活度由 0.9843 ± 0.0005 显著下降至 0.9479 ± 0.0061 ($P<0.05$),炸制使挤出物中的水分大量蒸发,被蛋白质束缚住的水分占比升高,使水分流动性降低。

表 2 高水分挤压大豆蛋白烹饪前、后的脂肪含量和水分特征

Table 2 Fat content and water characteristics of high-moisture extruded soy protein before and after cooking

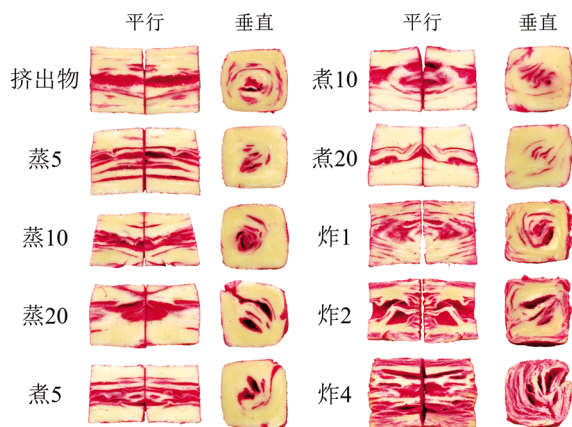
组别	脂肪含量/%	水分含量/%	水分活度	离心损失/%
挤出物	0.12 ± 0.03 ^d	51.00 ± 0.19 ^f	0.9866 ± 0.0009 ^{de}	2.09 ± 0.10 ^d
蒸 5	0.12 ± 0.03 ^d	52.82 ± 0.29 ^e	0.9902 ± 0.0006 ^{cd}	2.11 ± 0.09 ^d
蒸 10	0.11 ± 0.01 ^d	52.45 ± 0.30 ^e	0.9901 ± 0.0007 ^{cd}	2.35 ± 0.20 ^{cd}
蒸 20	0.10 ± 0.02 ^d	53.63 ± 0.27 ^d	0.9894 ± 0.0005 ^{cd}	2.17 ± 0.15 ^{cd}
煮 5	0.11 ± 0.07 ^d	54.89 ± 0.40 ^e	0.9917 ± 0.0004 ^{bc}	2.47 ± 0.10 ^{cd}
煮 10	0.10 ± 0.00 ^d	58.41 ± 0.20 ^b	0.9943 ± 0.0003 ^{ab}	2.54 ± 0.26 ^c
煮 20	0.07 ± 0.02 ^d	61.38 ± 0.09 ^a	0.9957 ± 0.0009 ^a	4.24 ± 0.29 ^a
炸 1	2.46 ± 0.12 ^e	43.54 ± 0.42 ^g	0.9843 ± 0.0005 ^e	2.93 ± 0.34 ^b
炸 2	3.15 ± 0.01 ^b	40.04 ± 0.37 ^h	0.9804 ± 0.0009 ^f	2.99 ± 0.05 ^b
炸 4	3.87 ± 0.12 ^a	30.51 ± 0.73 ⁱ	0.9479 ± 0.0061 ^g	3.92 ± 0.27 ^a

注:不同小写字母表示不同组别间具有显著性差异($P < 0.05$)。

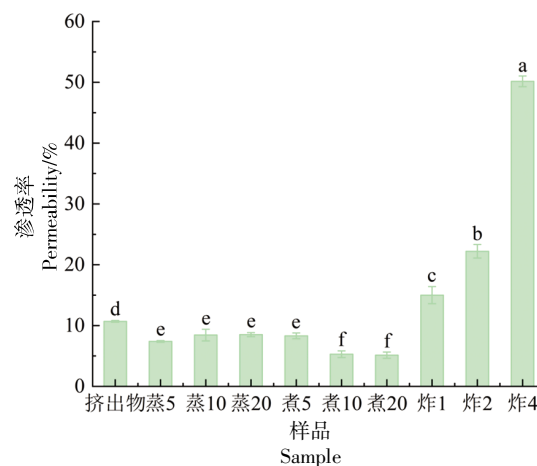
2.4.4 离心损失 离心损失反映食品在离心力作用下流失的水分或其它成分,通常与食品的持水能力相关。在本研究中,对于未烹饪、蒸制和煮制处理的挤出物,离心损失可表示其持水性,离心损失越大表明其持水性越差,而炸制处理挤出物的离心损失包含部分油脂的损失。由表 2 可知,蒸制对挤出物持水性无显著影响,煮制显著降低了挤出物的持水性($P < 0.05$),且煮制时间越长挤出物持水性越小。虽然炸制使挤出物的离心损失增加,但仍小于煮制 20 min 时挤出物的离心损失(4.24 ± 0.29)%,这是由于炸制处理的挤出物中水分含量较少,且水分流动性弱,不易在离心过程中损失。

2.4.5 渗透性和汁液渗出性 由图 5 可知,腌制后胭脂虫红色素沿着纤维分布间的孔隙渗入挤出

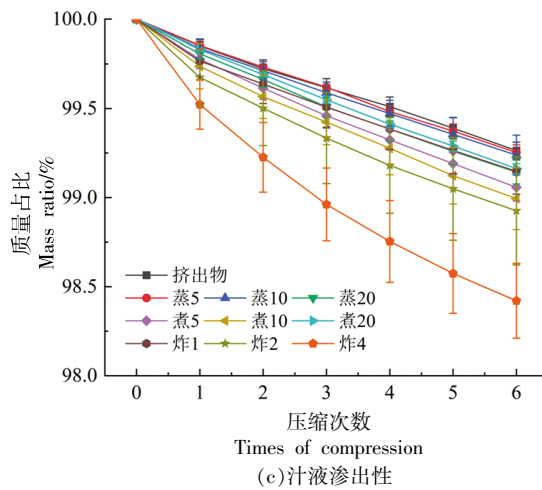
物中,挤出物的孔隙率和孔隙的形状和方向会影响色素进入的范围,孔隙率越高,渗透性越强。渗透率数据(图 5b)和宏观结构图(图 5a)中呈现的胭脂虫红色素的渗透程度共同反映了挤出物对液体的吸收能力。蒸制和煮制处理使挤出物的渗透率减小,煮制时间较长时变化更为显著。宏观结构图片显示,煮制时间较长的挤出物孔隙较小,色素进入挤出物中较少,这是由于煮制过程中蛋白质基质在水中浸泡发生膨胀,孔隙被压缩甚至消失,导致渗透率减小。炸制使挤出物的渗透率增大,且随炸制时间延长,渗透率显著增加($P < 0.05$),炸制 4 min 的挤出物渗透率达到(50.16 ± 0.88)%,这是由于经过炸制处理后,挤出物中孔隙数量增多,尺寸增大,并且增强了孔隙之间的连通性从而使挤



(a)腌制后挤出物的宏观结构



(b)渗透率



注:不同小写字母表示不同组别间具有显著性差异($P<0.05$)。

图5 高水分挤压大豆蛋白烹饪前、后的渗透性和汁液渗出性

Fig.5 Permeability and marinade release of high-moisture extruded soy protein before and after cooking

出物的渗透率增大^[21],这在宏观图片中也得到了体现,经过炸制处理(尤其是较长时间)的挤出物色素分布均匀且扩散范围较广,渗透性较强。通过对挤出物进行压缩后称量挤出物的质量来评估挤出物的汁液渗出性,如图5c所示。经过压缩后,炸制后的挤出物渗出的汁液最多,这也归因于前期浸泡时吸收液体较多,存在于孔隙中的液体经压缩后释放出来。

2.4.6 水分状态和分布 低场核磁共振测量水分分布是一种有效的评估植物基肉制品质地的方法,它与汁液流失和持水性直接相关,且能反映植物基产品中蛋白质或其它聚合物组分的水分结合能力^[25]。由图6a和表3可知,在0.01~10 000 ms弛豫时间内分布有3个峰,其中第1个峰代表结合水 T_{21} ,第2个峰代表不易流动水 T_{22} ,第3个峰代表自由水 T_{23} ,挤出物中大部分水为不易流动水,结构较为稳定。与未烹饪挤出物相比,蒸制和煮制处理使挤出物的 T_{22} 和 T_{23} 增大,结合水比例减小,不易流动水比例增大,说明蒸制和煮制使挤出物中蛋白质与水分结合的紧密程度变差。炸制使挤出物 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 均减小,炸制4 min时, T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 分别减小了0.14,7.31,81.04 ms,且结合水和自由水比例显著增加,不易流动水比例显著降低($P<0.05$)。炸制过程中,水分状态可能发生重新分布,部分原本结合相对较紧密的水(不易流动水)被释

放出来,变成了自由水,而部分水分又与蛋白质形成了新的结合水。弛豫时间缩短反映水分与蛋白质间相互作用可能增强。孔隙度增加,水分子能够更自由地流动,这可能导致自由水比例增加。

由磁共振成像图(图6b)可知,未烹饪的挤出物显示出较为均匀的水分分布,整体信号较为平衡。蒸制和煮制处理使挤出物中的水分增加。煮制处理过程中通过直接与水接触进行加热,水分的变化更为显著。炸制处理使挤出物图像大部分呈现深蓝色,水分减少,与水分含量结果一致。炸制过程的高温 and 油脂的作用会迅速驱除挤出物中的水分,尤其是自由水。水分的减少和蛋白质基质的收缩可能导致水分分布不均,并表现出较少的信号。炸制后,蛋白质基质收缩,挤出物中孔隙增多,且孔隙边缘含水量较低。

3 结论与讨论

本文研究了以大豆蛋白为原料进行高水分挤压制备的挤出物,在不同烹饪方式和时间下的纤维结构、质构特性和水分特征变化,结果表明,蒸制使挤出物保持较好的纤维结构及适中的硬度和剪切力,蒸制和煮制处理均导致挤出物孔隙减少,渗透率降低,且结合水比例下降。随着煮制时间的延长,挤出物的结构变得更加松散,硬度和咀嚼度减小,水分含量和水分活度显著增大($P<0.05$),而

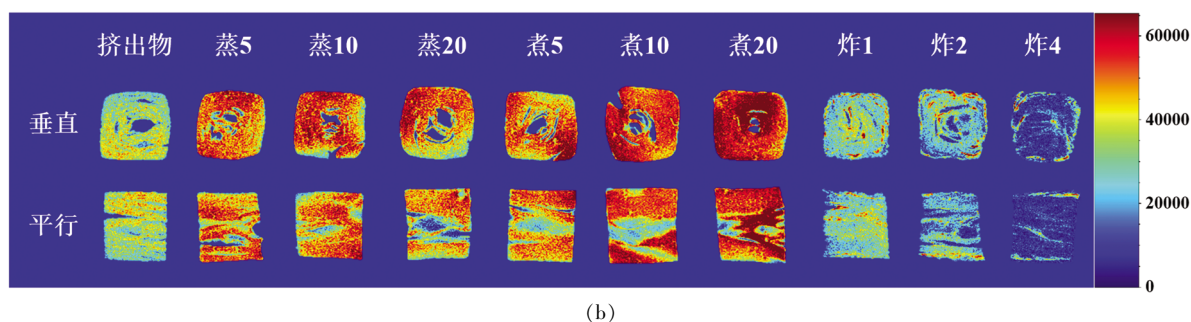
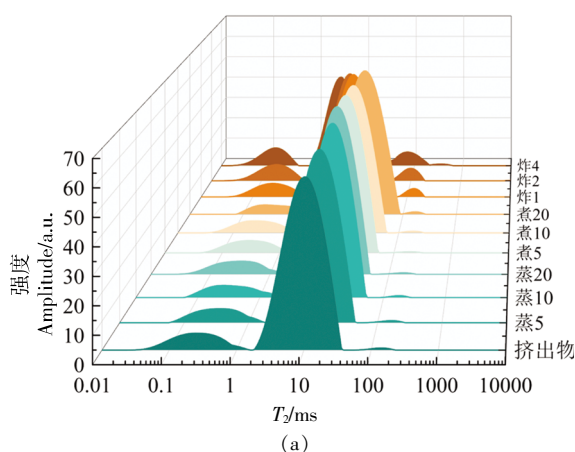


图 6 高水分挤压大豆蛋白烹饪前、后的 T_2 弛豫时间分布曲线(a)和磁共振成像图(b)

Fig.6 T_2 relaxation time distribution curve (a) and magnetic resonance imaging images (b) of high-moisture extruded soy protein before and after cooking

表 3 高水分挤压大豆蛋白烹饪前、后的 T_2 弛豫时间和比例

Table 3 T_2 relaxation times and proportions of high-moisture extruded soy protein

组别	T_{21}/ms	$A_{21}/\%$	T_{22}/ms	$A_{22}/\%$	T_{23}/ms	$A_{23}/\%$
挤出物	0.28 ± 0.00^{bc}	10.94 ± 0.20^c	10.35 ± 0.00^c	88.58 ± 0.20^c	151.75 ± 6.01^d	0.48 ± 0.02^d
蒸 5	0.33 ± 0.06^a	9.62 ± 0.34^d	12.20 ± 0.95^d	89.90 ± 0.33^b	174.36 ± 6.91^{bc}	0.48 ± 0.05^d
蒸 10	0.31 ± 0.02^{ab}	9.14 ± 0.44^d	13.69 ± 0.95^c	90.52 ± 0.40^b	182.62 ± 7.40^{ab}	0.34 ± 0.04^d
蒸 20	0.31 ± 0.02^{ab}	9.66 ± 0.89^d	13.69 ± 0.95^c	89.93 ± 0.92^b	178.34 ± 0.00^b	0.42 ± 0.03^d
煮 5	0.31 ± 0.02^{ab}	8.90 ± 0.35^d	15.00 ± 0.61^b	90.78 ± 0.37^b	191.47 ± 13.28^a	0.31 ± 0.03^d
煮 10	0.27 ± 0.02^{bc}	9.60 ± 0.18^d	15.35 ± 0.61^b	89.99 ± 0.21^b	182.62 ± 7.40^{ab}	0.41 ± 0.05^d
煮 20	0.27 ± 0.02^{bc}	7.30 ± 0.28^e	19.34 ± 0.00^a	92.06 ± 0.30^a	166.38 ± 0.00^c	0.64 ± 0.05^d
炸 1	0.26 ± 0.02^c	10.97 ± 0.50^c	9.01 ± 0.00^f	86.11 ± 0.45^d	132.08 ± 5.23^e	2.92 ± 0.32^c
炸 2	0.20 ± 0.01^d	13.23 ± 0.05^b	6.08 ± 0.25^e	81.47 ± 0.34^e	104.79 ± 4.25^f	5.29 ± 0.30^b
炸 4	0.14 ± 0.00^e	15.44 ± 0.17^a	3.04 ± 0.12^h	74.18 ± 0.96^f	70.71 ± 2.80^g	10.37 ± 0.81^a

注:不同小写字母表示不同组别间具有显著性差异($P < 0.05$)。

持水性降低。炸制能通过增大挤出物的孔隙及增加孔隙的连通性提高挤出物的渗透性。炸制时间越长,烹饪损失越大,且硬度、咀嚼度和剪切力显著增大。此外,炸制还会导致挤出物的脂肪含量增加,水分含量和水分活度降低,结合水和自由水比

例增加。综上,不同烹饪方式通过改变大豆蛋白挤出物的纤维结构、孔隙形态和组成成分,显著影响其质构特性和水分特征,本研究为进一步优化植物基肉制品的加工工艺提供了理论参考。

参 考 文 献

- [1] JAHN S, GUHL D, ERHARD A. Substitution patterns and price response for plant-based meat alternatives[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2024, 121(50): e2319016121.
- [2] ZANG Y Y, WANG S R, GAO Y X, et al. High moisture extrusion of pulse proteins: Texture, structure, and *in vitro* digestion characteristics of extrudates[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110676.
- [3] Grand View Research. Plant-based meat market size, share & trends analysis report by source (soy, pea, wheat), by product, by type (chicken, pork, beef, fish, others), by end-use, by storage, by region, and segment forecasts, 2024-2030[R]. San Francisco: Grand View Research, 2024.
- [4] CHEN Q L, ZHANG J C, ZHANG Y J, et al. Rheological properties of pea protein isolate-amylose/amylopectin mixtures and the application in the high-moisture extruded meat substitutes[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106732.
- [5] ZHANG J C, CHEN Q L, KAPLAN D L, et al. High-moisture extruded protein fiber formation toward plant-based meat substitutes applications: Science, technology, and prospect[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 128: 202-216.
- [6] SUI X N, ZHANG T Y, ZHANG X, et al. High-moisture extrusion of plant proteins: Fundamentals of texturization and applications[J]. Annu Rev Food Sci Technol, 2024, 15(1): 125-149.
- [7] SONG J, XIA S G, MA C X, et al. Structure and flavor properties of meat analogues from yeast and soy protein prepared via high-moisture extrusion[J]. Lwt, 2024, 213: 117013.
- [8] WEN Y X, KIM H W, PARK H J. Effects of transglutaminase and cooking method on the physicochemical characteristics of 3D-printable meat analogs[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 81: 103114.
- [9] ZHANG Y F, BROUWER R, SALA G, et al. Exploring relationships between juiciness perception, food and bolus properties of plant-based meat analogue and beef patties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109443.
- [10] 豆康宁, 郭嘉林, 陈培波, 等. 熟制方式对植物基肉饼品质的影响[J]. 食品工业, 2024, 45(1): 52-56.
- DOU K N, GUO J L, CHEN P B, et al. The effect of cooking methods on the quality of plant-based meat cake[J]. The Food Industry, 2024, 45(1): 52-56.
- [11] 廖奕扬. 植物蛋白肉饼的研制与特征分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- LIAO Y Y. Preparation and characteristic analysis of vegetable protein meat cake[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.
- [12] VU G, ZHOU H L, MCCLEMENTS D J. Impact of cooking method on properties of beef and plant-based burgers: Appearance, texture, thermal properties, and shrinkage[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 9: 100355.
- [13] HU A N, LI T Q, ZHOU H, et al. Water binding ability changes of different proteins during high-moisture extrusion[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109935.
- [14] HU A N, ZHOU H, GUO F, et al. Three-dimensional porous fibrous structural morphology changes of high-moisture extruded soy protein under the effect of moisture content[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110600.
- [15] LIN S, HUFF H E, HSIEH F. Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(3): 1066-1072.
- [16] 吴丹丹. 不同热加工方法对驼肉品质及蛋白质消化性影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- WU D D. Effects of different thermal processing methods on camel meat quality and protein digestibility[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [17] JIAO Y, LIU Y F, QUEK S Y. Systematic evaluation of nutritional and safety characteristics of Hengshan goat leg meat affected by multiple thermal processing methods[J]. J Food Sci, 2020, 85(4): 1344-1352.
- [18] BHUIYAN M H R, YEASMEN N, NGADI M. Effect of food hydrocolloids on 3D meat-analog printing and deep-fat-frying[J]. Food Hydrocolloids,

- 2025, 159: 110716.
- [19] 张金闯. 高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- ZHANG J C. Conformational changes and quality control of peanut protein during the high-moisture extrusion process[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [20] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-11.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard, Determination of fat in food: GB 5009.6—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-11.
- [21] WANG Z J, JI Y, FU L W, et al. Potential use of gluten hydrolysate as a plasticizer in high-moisture soy protein-gluten extrudates[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 354: 111565.
- [22] 苏宗祧, 何定兵, 徐斐, 等. 油炸食品吸油过程的机制分析[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(5): 157-159, 163.
- SU Z T, HE D B, XU F, et al. Study on mechanism of oil absorption in fried foods[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(5): 157-159, 163.
- [23] DE ANGELIS D, VAN DER GOOT A J, PASQUALONE A, et al. Advancements in texturization processes for the development of plant-based meat analogs: A review[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2024, 58: 101192.
- [24] LABUZA T P, ALTUNAKAR B. Water activity prediction and moisture sorption isotherms [M]//*Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*, Hoboken, NJ: Wiley, 2020: 161-205.
- [25] NASROLLAHZADEH F, ALEXI N, SKOV K B, et al. Texture profiling of muscle meat benchmarks and plant-based analogues: An instrumental and sensory design approach with focus on correlations[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 151: 109829.

Effect of Cooking on the Fibrous Structure and Water Characteristics of High-moisture Extruded Soy Protein

HU Anna, ZHANG Jinchuang*, ZHOU Huan, GUO Feng, WANG Jiayu, WANG Qiang

(*Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences,*

Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193)

Abstract To investigate the changes of textural properties and water characteristics of high-moisture extruded protein after cooking, soy protein concentrate was used as the raw material for high-moisture extrusion and the impact of three common cooking methods (steaming, boiling, and frying) and cooking time on the fibrous structure of the extrudates were investigated. The differences in cooking loss and shrinkage were evaluated, and changes in the macro- and micro-structure, textural properties and water characteristics of the extrudates were explored. Results showed that steaming preserved a better fibrous structure with moderate hardness and shear force, boiling loosened the fibrous structure and reduced hardness, chewiness and shear force of extrudates. Boiling for 20 min increased the moisture content of the extrudates by 10.38%. Both steaming and boiling increased T_{22} and T_{23} , while reducing the proportion of bound water, suggesting a weakening of the protein-water binding in the extrudates. Frying enlarged the pores in the extrudates and enhanced the permeability of extrudates. Frying for 4 min increased the fat content of the extrudates by 3.65%, decreased the moisture content by 20.49% and reduced T_{21} , T_{22} , and T_{23} by 0.14, 7.31, 81.04 ms, respectively, while significantly increasing the proportions of bound water and free water ($P < 0.05$). It can be concluded that different cooking methods could affect their fibrous structure, pore morphology and components, as well as the textural properties and water characteristics of the extrudates. This study provides a theoretical reference for the optimization of subsequent cooking process for high-moisture extruded plant-based meat products, with practical value in controlling their textural and water characteristics.

Keywords soy protein concentrate; high-moisture extrusion; cooking; textural properties; water characteristics