

热超声处理对绿豆浆液理化性质 及腐竹品质特性的影响

Comparison of physicochemical properties of mung bean liquid and quality characteristics of mung bean yuba by different thermoultrasonic treatment

孙嘉辉¹ 王俊彤^{1,2} 郑喜群^{1,2} 左 锋^{1,3}

SUN Jiahui¹ WANG Juntong^{1,2} ZHENG Xiqun^{1,2} ZUO Feng^{1,3}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江八一农垦大学
国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319; 3. 粮食副产物加工与利用
教育部工程研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

(1. Food College of Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2. National Grain Engineering Technology Research Center of Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 3. Engineering Research Center for Processing and Utilization of Grain Byproducts, Ministry of Education, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

摘要:[目的]研究热超声条件对绿豆浆液理化性质及腐竹品质的影响。[方法]以绿豆为原料,采用不同热超声条件对绿豆浆液进行处理并将其制成腐竹。[结果]与未处理浆液相比,随温度的升高,粒径和巯基含量增加幅度呈先升高后降低的趋势,50℃时,100,150 W 的粒径分别从 156.27 nm 增大到 208.06,191.96 nm,巯基含量分别从 16.83 μmol/L 增大到 22.63,25.35 μmol/L。内源荧光光谱表明,温度越高,浆液中色氨酸残基数量越多。100,150 W 的腐竹质量分别由 4.09 g 增长至 5.26,5.08 g,弹性分别由 0.08 mm 增长至 0.16,0.13 mm,蒸煮损失率分别由 13.28% 降至 7.51%,8.02%,其中 100 W 处理的腐竹质构指标更为显著增加,蒸煮损失率更为显著降低。[结论]热超声处理改善了绿豆浆液理化性质及腐竹品质特性。

关键词:腐竹;绿豆;质构特性;蒸煮损失

Abstract: [Objective] This study aimed to study the effect of thermal ultrasound on the physicochemical properties of mung bean milk liquid and the quality of yuba. [Methods] Using mung bean as raw material, mung bean slurry was treated with

different thermal ultrasonic conditions and made into yuba. [Results] Compared with untreated slurry, with the increase of temperature, the increase in particle size and thiol content showed a trend of first increasing and then decreasing. At 50℃, the particle size of 100 and 150 W increased from 156.27 nm to 208.06 nm and 191.96 nm, and the thiol content increased from 16.83 μmol/L increased to 22.63 μmol/L and 25.35 μmol/L. The endogenous fluorescence spectrum indicates that the higher the temperature, the more tryptophan residues are present in the slurry. The mass of yuba at 100 and 150 W increased from 4.09 g to 5.26 g and 5.08 g, the elasticity increased from 0.08 mm to 0.16 mm and 0.13 mm, and the cooking loss rate decreased from 13.28% to 7.51% and 8.02%, among which the texture characteristics of yuba at 100 W increased significantly, and the cooking loss rate decreased significantly. [Conclusion] Thermo ultrasonic treatment can improve the physical and chemical properties of mung bean milk liquid and the quality characteristics of yuba.

Keywords: yuba; mung bean; texture characteristics; cooking loss

基金项目:黑龙江省重点研发计划项目(编号:GA21B011);校引进人才启动计划(编号:XDB-2017-13);大庆市指导性科技计划项目(编号:zd-2021-76)

作者简介:孙嘉辉,女,黑龙江八一农垦大学在读硕士研究生。

通信作者:左锋(1979—),男,黑龙江八一农垦大学教授,博士。

E-mail: zuofeng-518@126.com

收稿日期:2024-03-26

改回日期:2024-06-27

绿豆(*Vigna radiata*)又被称作文豆、植豆、菽豆,在中国已有 2 000 多年的种植和栽培历史^[1-2]。作为一种传统药用食品,绿豆具有清热解毒、消炎、消肿、消暑、利尿、养肝明目等功效^[3]。现代科学研究^[4]表明,绿豆富含蛋白质、多糖、多酚、生物碱等生物活性物质,其中蛋白质含量高达 20%~25%。

由于绿豆具有富含蛋白质的营养特性及良好的健康

调节功能,许多以绿豆为原料的植物产品已被开发出来,例如,美国 JUST 公司的植物蛋白产品、植物蛋白饮料和绿豆酸奶等^[5]。目前,在以“实施健康中国战略”为国家发展基本战略的背景下,将绿豆等功能原料与传统食品相结合开发新型健康食品的研究越来越受到关注,而且此类食品的开发还能丰富传统食品市场。腐竹又称腐皮或豆腐皮,是中国的传统豆制品^[6]。传统腐竹是以黄豆为原料,黄豆蛋白受到加热变性,空气/水或油/水界面产生吸热聚合反应,促使浆液中的蛋白质和脂肪发生相互作用,聚合成网络结构,形成的大豆蛋白膜^[7]。然而,绿豆含油量较低,不易形成稳定的凝胶结构。有研究^[8]表明,谷氨酰胺转氨酶(TG 酶)可通过交联蛋白质分子上的谷氨酰胺残基和赖氨酸残基,形成高分子网络结构,从而改善腐竹的弹性和咀嚼性。唐海燕等^[8]研究发现,TG 酶的交联作用可提高蛋白质的热稳定性和保水性,有助于形成强有力的凝胶,改善蛋白质基食品的品质。刘莹婕等^[9]研究表明,通过调控 TG 酶添加量,使得凝胶交联度增加,凝胶颗粒形成的界面蛋白膜越发致密,液滴间的相互作用增强,形成的凝胶结构越坚固。

近年来,研究人员强化营养价值的同时也关注腐竹品质与感官的改善,一些研究人员选择通过物理场、化学试剂和生物酶等来改变其物理特性。热超声处理技术作为一种新颖的加工技术,融合了超声空化效应和热效应^[10],经常被用于蛋白质结构改性和聚集行为调控。安然^[11]对绿豆和芸豆蛋白进行热超声处理,发现该处理促进了蛋白质结构的展开,提高了绿豆水解物的溶解度和抗氧化活性;利用热超声处理来调节大豆分离蛋白的聚集行为,发现提高处理温度和超声波频率均可促进蛋白质可溶性聚集体的形成,并提高大豆分离蛋白的溶解度。

研究拟以绿豆为原料,添加 TG 酶作为交联剂,采用添加大豆油的方式补充油脂含量,探究不同加热温度以及不同超声功率处理对绿豆浆液粒径、游离巯基、内源荧光光谱和腐竹品质特性的影响,以期为新型腐竹的开发和中国传统食品的多样化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

东北绿豆:市售;

转谷氨酰胺酶:100 U/g,青岛德慧海洋生物科技有限公司;

大豆油:九三粮油工业集团有限公司;

Tris,β-巯基乙醇、硝基苯甲酸(DTNB)、1-苯氨基萘-8-磺酸(ANS):分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

超声波细胞破碎仪:JY92-iiin 型,上海比朗仪器制造有限公司;

高分子剪切乳化机:HR-90Z 型,德国 IKA 公司;

激光粒度仪:Malvern-3000 型,英国 Malvern 公司;

荧光光度计:RF-6000 型,日本岛津公司;

物性测试仪:TA-XT Plus 型,上海保圣实业发展有限公司。

1.3 方法

1.3.1 绿豆浆液制备 称取经筛选的原料绿豆 100 g,洗涤表面浮尘,加入 500 mL 水室温泡豆 12 h,加 700 mL 水在 10 000 r/min 下搅打 1 min,重复搅打 2 次后过滤得到绿豆浆液,使绿豆浆液固形物含量为 8.7%,蛋白含量为 2.7%。随后该绿豆浆液进行热超声处理。

1.3.2 热超声处理 将绿豆浆液置于超声波细胞破碎仪并保持温度为 30,50,70 ℃,超声功率为 100,150 W,分别进行热超声处理 10 min,即得改性绿豆浆液,待测。

1.3.3 绿豆浆液粒径及 zeta 电位测定 采用动态光散射法测定浆液的粒径,将绿豆浆液稀释 10 倍后吸取 1 mL 至马尔文激光粒度仪的测试皿中进行测定,每个样品测定 3 次。

1.3.4 游离巯基和二硫键含量测定

(1) 游离巯基(—SH)含量:根据 Jaros 等^[12]的方法略作修改。准确吸取 0.5 mL 样品溶液,加入 2.5 mL 缓冲溶液(0.086 mol/L Tris、0.09 mol/L 甘氨酸、8 mol/L 尿素,pH 8.0),充分混合后,向其中加入 0.02 mL pH 为 8.0 的 DTNB 溶液,混匀后将其置于 25 ℃下恒温反应 30 min,在 412 nm 处测定其吸光度值,每组样品测定 3 次,取其平均值。按式(1)计算游离巯基含量。

$$X_1 = \frac{75.35A \times D}{C}, \quad (1)$$

式中:

X_1 ——游离巯基含量,μmol/g;

A ——吸光度值;

D ——稀释系数;

C ——样品最终质量浓度,mg/mL。

(2) 二硫键(—S—S—)含量:根据 Jaros 等^[12]的方法。

1.3.5 表面疏水性测定 根据 Zhang 等^[13]的方法略作修改。使用 1-苯氨基萘-8-磺酸(ANS)为荧光探针测定样品表面疏水性(H_0)。将浆液样品中的蛋白质质量浓度调至 0.1~0.5 mg/mL,设置激发波长 390 nm,发射波长 470 nm,通过线性回归分析荧光强度与蛋白质质量浓度之间的关系,得到 H_0 。

1.3.6 内源荧光光谱 将绿豆浆液用 PBH 缓冲溶液稀释至蛋白质质量浓度为 200 μg/mL,测定时设置激发波长为 290 nm,发射波长为 300~460 nm,狭缝宽度为 5 nm。

1.3.7 绿豆腐竹制备 取未改性和经热超声处理改性的绿豆浆液 800 mL,加入 10 g 大豆油,10 000 r/min 下均

质 1 min 后加入 1.5 mg/kg 的 TG 酶,置于 50 °C 下反应 10 min,将绿豆浆液煮沸 2~3 min,转入不锈钢槽,将其置于水浴中保温,揭膜温度控制在 90 °C,并开始计时,每隔 20 min 揭皮,共揭皮 4 次,重复 3 次,将所得腐竹皮晾干,均选取第 1 张腐竹作为研究对象。

1.3.8 绿豆腐竹质量测定 取干燥后的绿豆腐竹进行称重,每组样品测定 3 次,取其平均值。

1.3.9 质构特性测定 参照葛宏贺等^[14]的方法,将腐竹充分复水(室温浸泡 0.5 h)后,裁成大小为 3.0 cm×9.0 cm 的长条,以长边 3 等分折叠成 3 层,用 TA-XT Plus 质构仪进行 TPA 试验,测定腐竹的硬度、黏性以及弹性等。测试方法采用压缩式,选择 TPA 模式;探头选用 P/0.5。

1.3.10 蒸煮损失率测定 根据刘伟峰等^[15]的方法略作修改。将腐竹干燥后裁成 2 cm×2 cm 大小,置于 85 °C 水浴中煮制 15 min,沥出水分,置于 105 °C 烘箱中干燥至恒重,取干燥后的绿豆腐竹进行称重。每组样品测定 3 次,取其平均值。按式(2)计算蒸煮损失率。

$$Z = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

Z——蒸煮损失率,%;

M_1 ——煮制前质量,g;

M_2 ——煮制后质量,g。

1.3.11 数据分析 采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和显著性检验,结果以平均值±标准差表示, $P < 0.05$,差异显著。图表使用 Origin8.0 绘制;每次试验重复 3 次,取其平均值。

2 结果与讨论

2.1 热超声处理对粒径的影响

由图 1 可知,未处理的绿豆浆液只出现了一个明显

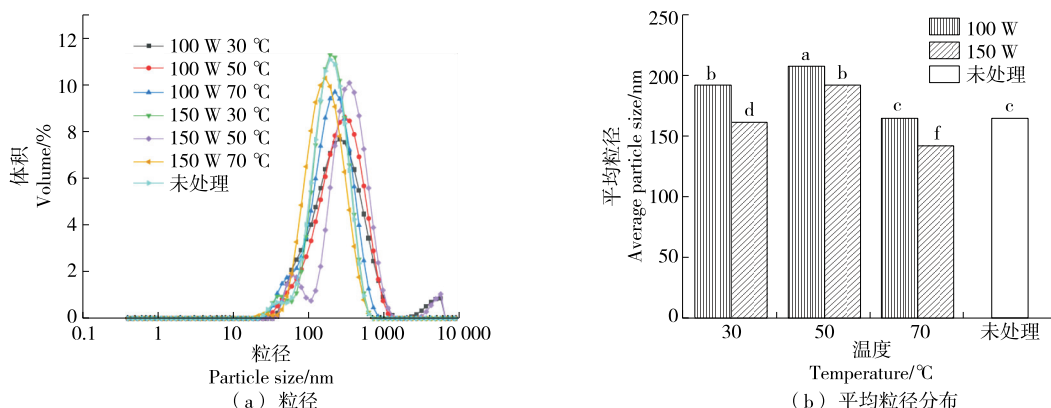
粒径峰,在 24~615 nm 处。经过热超声处理后,粒径分布在 38~1 280 nm 处出现主峰,在 18~32,2 670~5 560 nm 处出现两个小峰。这可能由于超声过程中的一些自由基攻击蛋白质的氨基酸侧链,从而导致肽键断裂形成小颗粒的分子^[16]。在同一温度下随着超声功率的增大,绿豆浆液的粒径逐渐向小粒径方向移动,并伴随着其平均粒径逐渐减小,说明更高强度的超声处理会出现优异的蛋白质聚集体破碎能力。Ma 等^[17]指出,超声会破坏蛋白质间的非共价相互作用,破坏蛋白质聚集体,从而减小蛋白质颗粒。

在相同超声功率下,随着温度的增加,绿豆浆液的粒径(28~615 nm)先向大粒径(38~1 280 nm)的方向移动后向小粒径(18~615 nm)的方向移动,随之平均粒径也呈先增大后减小的趋势,其中 50 °C 的加热处理最能显著促进蛋白质聚集,此时,经过 100 W 处理的浆液粒径为 208.06 nm,较未处理浆液相比提高了 33.38%,表明适宜的温度会促进蛋白质的聚集。70 °C 超声后的粒径逐渐减小,这可能是由于高温诱导结构展开后,更容易受到剪切力的影响,超声的空化效应得到加强^[18]。

2.2 热超声处理对 Zeta 电位的影响

Zeta 电位与绿豆浆液中蛋白质分子表面的电荷强度有关,并出现静电排斥或静电吸引,不同热超声处理对绿豆浆液 Zeta 电位的影响如图 2 所示。

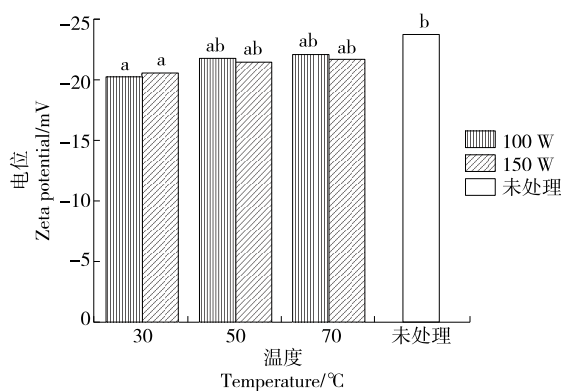
由图 2 可知,绿豆浆液的 Zeta 电位均为负值,说明其分子表面带有负电荷,并出现静电排斥现象。与原绿豆浆液相比,在 30 °C 下经 100,150 W 超声处理的绿豆浆液 Zeta 电位绝对值显著降低($P < 0.05$),分别为 -20.23, -20.56 mV。在相同温度下,经 100 W 或 150 W 超声处理均能降低其 Zeta 电位,但数值变化较小,结合巯基含量[图 3(a)]和表面疏水性(图 4),热超声处理可能导致绿豆蛋白在溶液系统中的分子相互作用力增加,从而减少了



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 1 热超声处理对粒径的影响及平均粒径分布

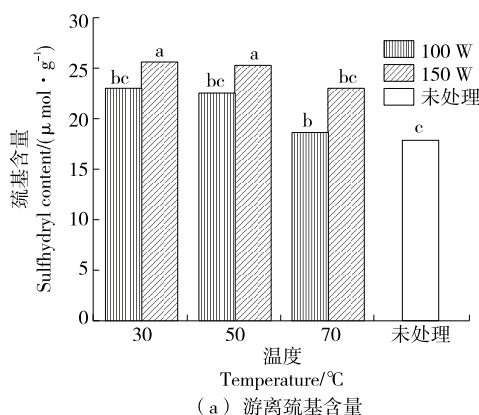
Figure 1 The effect of thermal ultrasound treatment on particle size and average particle size distribution



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

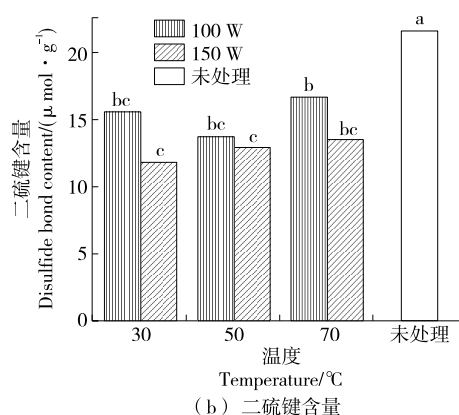
图 2 热超声处理对 Zeta 电位的影响

Figure 2 Effects of thermos ultrasound treatment on Zeta potential



(a) 游离巯基含量

小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)



(b) 二硫键含量

图 3 热超声处理对游离巯基含量和二硫键含量的影响

Figure 3 Effect of different thermal ultrasound treatments on thiol content and disulfide bond content

离巯基含量增加和二硫键含量降低^[15]。Guo 等^[19]认为,游离巯基含量增加的现象也有助于绿豆浆液中可溶性聚集体的转化和活性基团的暴露,并促进分子韧性的增强。

其中,在相同温度下,经 150 W 超声处理的游离巯基含量进一步显著增加 ($P < 0.05$),较未处理浆液分别提高了 52.29% (30 °C), 50.62% (50 °C), 37.67% (70 °C), 而二硫键含量却进一步减少,这可能是较高强度的超声波在空化气泡中产生瞬态的自由基,这些自由基发生交叉反应生成过氧化氢^[20]。超声产生的过氧化氢会氧化游离巯基,引发巯基—二硫键交换反应,促进形成可溶性聚集体^[21]。在相同的超声功率下,经 70 °C 热处理的游离巯基含量增加的幅度开始减小,此时较未处理浆液分别提高了 11.35% (100 W), 37.67% (150 W), 而二硫键含量却开始增加,这可能是由于蛋白质中最活跃的官能团(巯基基团)被氧化形成了新的二硫键^[22]。

总的来说,热超声可以通过调节蛋白质巯基和二硫键之间的相互转化以及含硫化化合物的生成来影响蛋白质

蛋白质分子的表面净电荷,Zeta 电位水平下降。此外,这也可能与超声能够诱导自由基效应有关。Guo 等^[19]研究发现,自由基诱导了蛋白质展开氢键并破坏其高级结构,导致某些带电荷的氨基酸减少。

2.3 热超声处理对游离巯基及二硫键含量的影响

巯基(—SH)和二硫键(—S—S—)是蛋白质中的重要官能团,可以通过巯基和二硫键结合之间的相互转化来控制蛋白质空间构象并发挥功能特性。如图 3 所示,与未处理绿豆浆液(16.83 μmol/L)相比,热超声处理后的游离巯基含量显著增加,而二硫键含量与未处理绿豆浆液(20.28 μmol/L)相比却显著降低,这是由于绿豆浆液系统中的蛋白质分子受到了能量场的影响。因此,热超声处理能够促进浆液中蛋白质形成的二硫键被裂解,然后转化为游离的巯基,将分子内部的巯基基团暴露,导致游

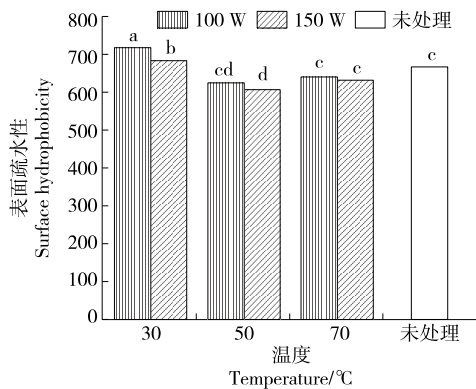
聚集体的生成,从而实现对蛋白质功能特性的调控。

2.4 热超声处理对表面疏水性的影响

表面疏水性主要利用 8-苯基氨基-1-萘磺酸(ANS)探针与蛋白质表面疏水氨基酸的特异性结合来进行测定,与蛋白质的构象变化和功能特性密切相关^[23]。如图 4 所示,与未处理浆液(628.52)相比,50 °C 下超声处理的表面疏水性出现降低(627 和 610),说明加热会促进经过蛋白质分子的共价和非共价交联,并在浆液系统中重组,使疏水基团更多地嵌入到蛋白质中,引起表面疏水性的降低。其中 150 W 超声更能明显降低其表面疏水性 ($P < 0.05$),结合图 2 可以看出,150 W 超声处理会减弱蛋白质分子之间的静电斥力,减少疏水性基团的数量,从而降低了浆液的表面疏水性。

2.5 荧光光谱

如图 5 所示,经不同功率和温度的超声处理后,浆液的荧光强度会显著增加,其中 150 W 超声处理对荧光强度的增加最大,并且在相同功率下,温度越高,荧光强度



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 热超声处理对表面疏水性的影响

Figure 4 Effects of different thermal ultrasound treatments on surface hydrophobicity

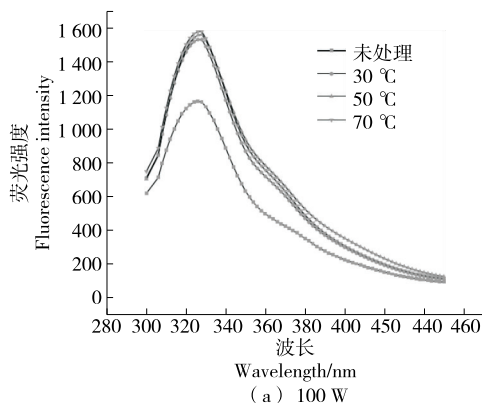


图5 100 W热超声和150 W热超声处理下的荧光光谱

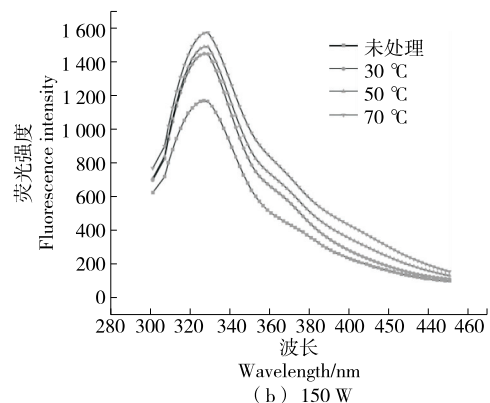


Figure 5 Fluorescence spectra under 100 W thermal ultrasound and 150 W thermal ultrasound treatment

(图2)表明,150 W超声时,粒径大小开始降低,蛋白质聚集分散成了更小的颗粒,同时其二硫键含量[图3(b)]和表面疏水性(图4)也开始降低,此时的浆液中蛋白质结构松散,二硫键发生断裂,不易形成稳定的蛋白质聚集体,因此腐竹产品的质量出现了下降。当温度达到70 °C时,其质量开始下降,可能是由于高温诱导了蛋白质结构的展开,更容易受到剪切力的影响,此时超声空化效应得到加强,浆液粒径由此减小,不利于蛋白质网络的形成,导致最终的腐竹产品质量降低。

2.7 热超声处理对腐竹品质特性的影响

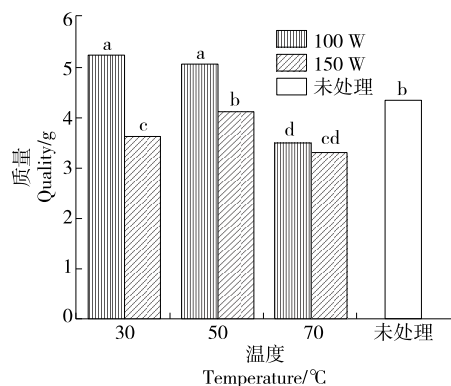
由图7可知,与未处理浆液制成的腐竹相比,热超声处理显著提高了绿豆腐竹的硬度、弹性和黏性 ($P < 0.05$),其中100 W 50 °C处理效果最为显著,较未处理的分别增加了57.15%,87.33%,71.52%。

相同超声功率下,随着温度的升高,绿豆腐竹的硬度和黏性呈先增大后减小的趋势,50 °C时,最大硬度为26.66 N,较未处理的增加了57.22%,最大黏性为15.65 N,较未处理的增加了71.15%,这是由于适宜的温

越大,暴露在浆液中的色氨酸残基数量越多。这可能是由于热超声处理产生的高速剪切和分子碰撞效应可能导致绿豆浆液的结构断裂和亚基解离。因此,由于氧化聚集,被掩埋在蛋白质结构内部的荧光发射基团逐渐暴露于外部极性环境中^[15]。Wang等^[24]的研究指出,超声可导致蛋白质分子去折叠和 Trp/Tyr 聚合物的接触,使荧光强度增加。Tao等^[25]发现,超声可以通过干扰蛋白质颗粒之间的化学键和结合来调节蛋白质的三级结构,从而改变蛋白质聚集颗粒的结构。

2.6 热超声处理对腐竹质量的影响

与未处理浆液制成的腐竹相比,30,50 °C下超声处理可以有效增加绿豆腐竹质量。100 W超声下经30,50 °C热处理的绿豆腐竹质量分别增加了28.16%,23.63%。而150 W超声处理下的腐竹质量出现降低,结合粒径分析

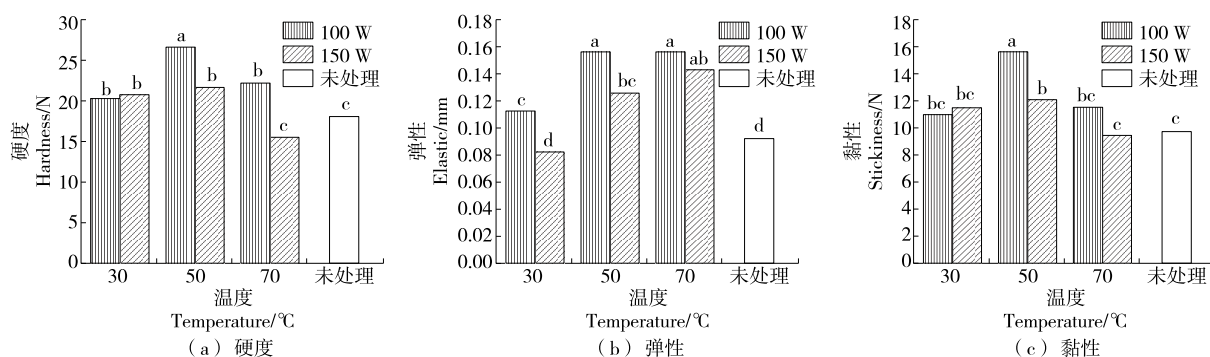


小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图6 热超声处理对腐竹质量的影响

Figure 6 Effects of different thermoacoustic treatments on the quality of Rolls of dried bean milk creams

度能够显著促进蛋白质聚集,也可能是油滴在静电相互作用和疏水相互作用下与蛋白质结合,参与了腐竹网络结构的形成,参与形成网络结构的油滴越多,腐竹的硬度越大^[26]。然而,弹性随着温度的升高逐渐增加,70 °C时,



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

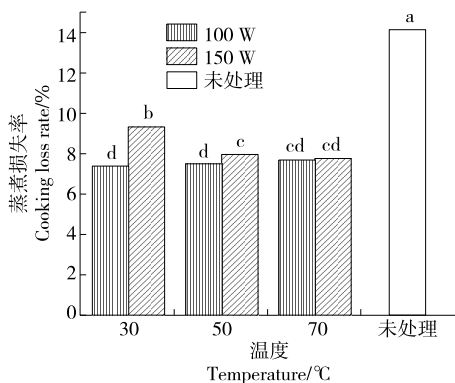
图 7 热超声处理对腐竹硬度、弹性和黏性的影响

Figure 7 Effects of different thermoacoustic treatments on hardness, elasticity and viscosity of yuba

弹性最大为 0.15 mm,较未处理的提高了 74.43%,这可能是网络的均匀性和蛋白质之间结合力增强的结果。

2.8 热超声处理对蒸煮损失率的影响

由图 8 可知,与未处理浆液制成的腐竹(13.21%)相比,热超声处理可显著降低绿豆腐竹的蒸煮损失率($P < 0.05$),其中 100 W 30 °C 和 100 W 50 °C 降低的幅度最大,较未处理的分别降低了 45.72%,43.26%,这是因为蒸煮损失率与腐竹中绿豆蛋白网络空间结构直接相关,当蛋白网络结构更紧凑时,可提高腐竹网络空隙中容纳各种物质的能力,使其在蒸煮过程中不易于从腐竹中逸出,从而减少了蒸煮损失^[27]。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 8 热超声处理对腐竹蒸煮损失率的影响

Figure 8 The effect of different thermal ultrasound treatments on the loss rate of rot cooking

3 结论

研究了不同温度(30, 50, 70 °C)和不同超声功率(100, 150 W)对绿豆浆液理化特性和腐竹质量、质构特性及蒸煮损失率的影响。结果表明,与未处理浆液相比,绿豆浆液温度在 30~70 °C 范围内,100 W 和 150 W 超声处理均能显著促进蛋白质聚集,且聚集程度随温度的增加呈先增大后减小的趋势,当温度为 50 °C 时,浆液粒径增

加了 33.38%(100 W)和 22.43%(150 W),游离巯基含量增加了 34.46%(100 W)和 50.62%(150 W)。内源荧光光谱表明,超声时温度越高,浆液中暴露的色氨酸残基数量越多。同时热超声处理能改善绿豆腐竹的品质特性,当温度为 50 °C 时,其质量增加了 23.63%(100 W)和 1.22%(150 W),弹性增加了 87.33%(100 W)和 46.51%(150 W),蒸煮损失率降低了 43.26%(100 W)和 39.57%(150 W),其中与 150 W 超声处理相比,100 W 处理能够更加显著地改善腐竹的质构特性和蒸煮损失率等。综合来看,100 W 50 °C 的热超声处理可以更好地提高绿豆浆液理化性质和腐竹品质。

参考文献

- [1] 曾志红, 王强, 林伟静, 等. 绿豆蛋白营养及功能特性分析[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(6): 51-55.
ZENG Z H, WAN Q, LIN W J, et al. Analysis of nutritional and functional characteristics of mung bean protein[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2012, 27(6): 51-55.
- [2] 杜梦霞. 绿豆蛋白酶解物的制备及其对 NCTC1469 细胞氧化损伤的保护作用[D]. 南昌: 南昌大学, 2018: 3-9.
DU M X. Preparation of mungbean protein hydrolysate and its protective effect on oxidative damage in NCTC1469 cells [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018: 3-9.
- [3] 曲美霖, 胡俊君, 程哲, 等. 绿豆预熟化工艺及品质研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 227-232.
QU M L, HU J J, CHENG Z, et al. Research progress on pre ripening technology and quality of mung beans [J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 227-232.
- [4] GANESAN K, XU B. A critical review on phytochemical profile and health promoting effects of mung bean[J]. Food Science and Human Wellness, 2018, 7(1): 11-33.
- [5] 周素梅, 李若凝, 唐健, 等. 绿豆营养功能特性及其在植物基食品开发中的应用[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 16-23, 12.
ZHOU S M, LI R N, TANG J, et al. Nutritional and functional characteristics of mung beans and their application in the

- development of plant-based foods [J]. Grain and Oil Food Technology, 2022, 30(2): 16-23, 12.
- [6] 季秋燕, 孔祥珍, 华欲飞. 无氧磨浆工艺对腐竹品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(6): 183-187
- JI Q Y, KONG X Z, HUA Y F. The effect of anaerobic pulping process on the quality of rolls of dried bean milk creams[J]. Food & Machinery, 2019, 35(6): 183-187.
- [7] 李嘉欣. 豆浆蛋白质与脂质组成对腐竹制备和品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 5-12.
- LI J X. Effects of protein and lipid composition of soybean milk on the preparation and quality of rolls of dried bean milk creams[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 5-12.
- [8] 唐海燕, 常海军, 朱建飞. 响应面法优化谷氨酰胺转氨酶交联大豆分离蛋白的工艺[J]. 重庆工商大学学报, 2020, 37(2): 77-82.
- TANG H Y, CHANG H J, ZHU J F. Optimization of the process for cross-linking soy protein isolate with glutamine transaminase using response surface methodology[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2020, 37(2): 77-82.
- [9] 刘莹婕, 夏梦思, 戴宏杰, 等. 不同谷氨酰胺转氨酶交联度对明胶微凝胶 Pickering 乳液界面性质和流变行为的影响[J/OL]. 食品与发酵工业. (2023-11-14) [2024-01-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037539>.
- LIU Y J, XIA M S, DAI H J, et al. Effect of different cross-linking degrees of glutamine transaminase on interfacial properties and rheological behavior of gelatin micro gel Pickering lotion[J/OL]. Food and Fermentation Industry. (2023-11-14) [2024-01-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037539>.
- [10] ANAYA-ESPARZA L M, VELAZQUEZ-ESTRADA R M, ROIG A X, et al. Thermosonication: an alternative processing for fruit and vegetable juices[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 61: 26-37.
- [11] 安然. 大豆分离蛋白可溶性热聚集行为及其超声调控研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 35-43.
- AN R. Research on the soluble heat aggregation behavior and ultrasound regulation of soybean protein isolates [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019: 35-43.
- [12] JAROS D, SHWARZENBOLZ U, RAAK N, et al. Cross-linking with microbial transglutaminase: relationship between polymerisation degree and stiffness of acid casein gels [J]. International Dairy Journal, 2014, 39: 174-178.
- [13] ZHANG Y, YIN Y, LU S, et al. Effects of modified processing methods on structural changes of black soybean protein isolate[J]. Molecules, 2018, 23(9): 21-27.
- [14] 葛宏贺, 潘思轶, 徐晓云. 不同大豆品种对腐竹品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(6): 10-14.
- GE H H, PAN S Y, XU X Y. Effects of different soybean varieties on the quality of rolls of dried bean milk creams[J]. Journal of China Cereals and Oils Association, 2015, 30(6): 10-14.
- [15] 刘伟峰, 张友胜, 黄利华, 等. 马铃薯淀粉添加量对腐竹品质的影响[J]. 广东农业科学, 2021, 48(7): 145-151.
- LIU W F, ZHANG Y S, HUANG L H, et al. Effect of potato starch addition on the quality of rolls of dried bean milk creams[J]. Guangdong Agricultural Science, 2021, 48(7): 145-151.
- [16] WANG Y C, LI B L, GUO Y N, et al. Effects of ultrasound on the structural and emulsifying properties and interfacial properties of oxidized soybean protein aggregates[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 87: 106-146.
- [17] MA W, WANG J, XU X, et al. Ultrasound treatment improved the physicochemical characteristics of cod protein and enhanced the stability of oil-in-water emulsion[J]. Food Research International, 2019, 121: 247-256.
- [18] 仲志峰. 热超声处理对绿豆分离蛋白结构和界面活性及乳化功能的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 20-25.
- ZHONG Z F. The effect of thermal ultrasound treatment on the structure, interfacial activity, and emulsifying function of mung bean protein isolate[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 20-25.
- [19] GUO Z, HUANG Z, GUO Y, et al. Effects of high-pressure homogenization on structural and emulsifying properties of thermally soluble aggregated kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106-135.
- [20] GULSEREN I, GUZEY D, BRUCE B D, et al. Structural and functional changes in ultrasonicated bovine serum albumin solutions[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14(2): 173-183.
- [21] VAN D P I, VAN L A, HENDRICKX M E. Changes in sulfhydryl content of egg white proteins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 14: 26-33.
- [22] YANG H J, ZHANG W G, LI T, et al. Effect of protein structure on water and fat distribution during meat gelling [J]. Food Chemistry, 2016, 204: 239-245.
- [23] IESEL P, ANN L, GEM H. Changes in sulfhydryl content of egg white proteins due to heat and pressure treatment[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(14): 26-33.
- [24] WANG Y T, WANG Z J, HANDA C L, et al. Effects of ultrasound pre-treatment on the structure of β -conglycinin and glycinin and the antioxidant activity of their hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 165-172.
- [25] TAO X, CAI Y J, LIU T X, et al. Effects of pretreatments on the structure and functional properties of okara protein [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 394-402.
- [26] 姜梅. 超高压均质和热处理对豆乳、豆腐和豆腐皮特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 32-41.
- JIANG M. The effect of ultra-high pressure homogenization and heat treatment on the characteristics of soy milk, tofu, and tofu skin[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014: 32-41.
- [27] 赵秋艳, 裴琪, 郭星星, 等. 不同水分含量鲜腐竹冷藏过程中品质变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(18): 211-221.
- ZHAO Q Y, PEI Q, GUO X X, et al. Study on quality change of fresh rolls of dried bean milk creams with different moisture content during cold storage[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2023, 14(18): 211-221.