

豆浆中食盐添加量对白豆干质构特性的影响

Effects of the levels of NaCl added in soymilk on texture characteristics of white dried beancurds

舒媛珂 黄轶群 俞健 刘永乐 李彦

SHU Yuan-ke HUANG Yi-qun YU Jian LIU Yong-le LI Yan

(长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114)

(School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

摘要:目的:探究豆浆中食盐添加量对白豆干质构特性的影响。方法:采用全质构分析、蠕变行为试验、扫描电子显微镜等对基于不同食盐添加量(0~1%)豆浆生产的白豆干质构特性及蛋白质凝胶网络结构进行综合评价。结果:豆浆中食盐的添加使得白豆干蛋白凝胶体系内水分含量显著升高($P < 0.05$)、其网络结构的致密性以及凝胶结构的强度总体降低,且豆浆中食盐添加量与白豆干得率和水分含量高度正相关(r 为 0.967~0.982),但与白豆干的保水性、凝胶强度、黏聚性、弹性模量等质构特性高度负相关(r 为 -0.901~-0.994)。结论:在豆浆中添加 0.50%~0.75% 的食盐可提供白豆干所需咸味,维持豆干良好的质构特性。

关键词:豆干;食盐;豆浆;质构;黏弹性

Abstract: Objective: This research aimed to understand the effects of different levels of NaCl added in soymilk on textural characteristics of resulted white dried beancurds. **Methods:** The textural characteristics and protein-gel network structures of dried beancurds produced from soymilk added with different levels of NaCl (0~1%) were fully evaluated through texture profile analysis, creep test, scanning electron microscopy and others. **Results:** The addition of NaCl in soymilk led to a significant increase ($P < 0.05$) of water held in the protein-gel network of dried beancurds as well as a less compact protein-network structure and overall weaker protein-gel. In addition, the levels of NaCl added in soymilk were highly correlated (r was 0.967~0.982) with the yield and water content of the resulted white dried beancurds, but negatively correlated (r was

-0.901~-0.994) with water holding capacity, gel strength, cohesiveness, elastic modulus and other textural properties of dried beancurds. **Conclusion:** The soymilk added with 0.50%~0.75% of NaCl resulted in dried beancurds with required salty taste and acceptable textural characteristics.

Keywords: dried beancurd; NaCl; soymilk; texture; viscoelasticity

豆干通常是由大豆通过浸泡、磨浆、煮浆、点浆、破脑、压制成型制得豆腐,再经脱水(烘干或风干)、卤制等步骤制成的豆制品。根据 GB/T 23494—2009,成品豆干含水量不得超过 75%。豆腐或豆干加工过程中可以去掉大豆中的大部分抗营养因子,显著提高大豆消化率,全熟大豆的消化率为 65% 左右,而成品豆干的消化率可达 92%~96%^[1]。豆干具有高蛋白、高不饱和脂肪酸和低胆固醇的营养特点,以干基计算,每 100 g 豆干含有大约 37.5~38.9 g 蛋白质、21.7~22.0 g 脂肪、3.6 g 灰分、0.3 g 粗纤维等^[2-3],且以钙盐(如硫酸钙、乳酸钙等)作为凝固剂制作的豆干属于高钙食品。随着近年来便捷食品的快速发展,高钙豆干的相关研制被认为具有良好的产业潜力和经济价值^[4]。

传统卤豆干加工需将豆腐白胚在卤水中长时间煮制,往往会由于卤水的重复利用以及卤制时间过长造成微生物污染^[5-6]。白豆干的生产通过改变豆腐制备过程中的压制条件,使成型时白胚的水分含量降低至 75% 以下,以符合国家标准,因其无需卤煮,生产时间缩短,降低了微生物污染风险和生产成本,但在食用前需进行调味。因此,研究在豆浆中加入食盐等调味料生产无需卤制的风味豆干。目前,关于豆干食用品质的研究大多集中在卤制工艺的改进上,例如,李海涛等^[1]采用真空脉冲卤制以提高豆干的生产效率,降低微生物污染风险;毛佳怡等^[7]将秘制卤水与经硫酸钙点脑后的豆花一起浸渍后再

基金项目:湖南省教育厅科学研究重点项目(编号:22A0237)

作者简介:舒媛珂,女,长沙理工大学在读硕士研究生。

通信作者:李彦(1970—),女,长沙理工大学副教授,硕士。

E-mail: 122511021@qq.com

收稿日期:2022-12-01 改回日期:2023-04-01

压制成卤豆干,从而省略了卤煮过程。

食盐作为传统卤制等调味豆干中不可或缺的组分,不仅提供咸味及增鲜作用^[8],还会影响豆干的质构特性,传统卤制豆干的硬度、黏聚性、弹性及咀嚼度等均与卤水中食盐的添加量有关^[7]。此外,关于 NaCl 对大豆分离(SPI)蛋白凝胶性能的影响也有一些报道,Huang 等^[9]研究发现,0.2 mol/L 的 NaCl 可增强谷氨酰胺转氨酶诱导的 SPI 凝胶的分子间作用力和改善凝胶性能,而 0.4~0.8 mol/L 的 NaCl 对 SPI 凝胶形成有抑制作用,并显著降低了凝胶强度;Yu 等^[10]发现 0.2~0.4 mol/L 的 NaCl 可以促进 SPI 的聚集并提高其乳液凝胶的冻融稳定性。目前,尚未见在豆浆中直接添加食盐对最后压制成型的豆腐或白豆干品质影响的报道。

在文献^[11]的基础上,研究选用乳酸钙作为钙凝固剂生产白豆干,评价在豆浆中添加不同量的食盐(0~1.00%)对于后续压制成型的白豆干质构特性的影响,为进一步与香辛料混合以简化传统风味豆干的研制提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

大豆(*Glycine max*):红丰 16 号,4 ℃密封保存,黑龙江弘扬农业有限公司;

乳酸钙:食品级,河南万邦实业有限公司;

精制无碘食盐:雪天盐业集团股份有限公司;

Tris-HCl、甘油、十二烷基硫酸钠、溴酚蓝、 β -巯基乙醇、过硫酸铵、四甲基乙二胺:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

分离式磨浆机:DM-LB80 型,沧州利达民用机械厂;

水浴锅:DF-101T 型,上海力辰仪器设备有限公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9145A 型,上海精宏实验设备有限公司;

高速离心机:LG10-24A 型,北京金立离心机有限公司;

离心机:Centrifuge 5430R 型,德国 Eppendorf 公司;

真空冷冻干燥机:SCIENTZ-10N 型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

垂直电泳仪:DYY-12 型,北京六一仪器厂;

电子扫描显微镜:JSMIT500 型,日本 Electron Optics Laboratory 公司;

质构分析仪:TA-XT Plus 型,英国 Stable Micro System 公司。

1.2 方法

1.2.1 高钙白豆干的制作 参考 Chen 等^[11]的方法并修

改。称量 1 000.0 g 大豆,清洗,加入 3 倍质量的蒸馏水,室温下浸泡 12 h,沥干后称重(最终湿豆为干豆质量的 2.2~2.3 倍),分别加入干豆质量 4,3 倍的蒸馏水,研磨,过 100 目筛,生浆分装入相同规格的不锈钢盆,于水浴锅中 15 min 内加热至沸腾,加入食盐,分别制得食盐质量分数为 0,0.25%,0.50%,0.75%,1.00%的豆浆,保持 5 min,将熟浆冷却至 80 ℃,采用点浆法加入乳酸钙溶液(30 mmol/L 豆浆),使得最终豆干中钙含量>240 mg/100 g,符合高钙食品标准^[12]。80 ℃水浴 20 min,所得凝乳随即倒入 12 cm×12 cm×9 cm 的内衬奶酪布的模具,使用 60 g/cm² 方形铁块压制 30 min,称重,按每 100 g 大豆制得新鲜白豆干的重量计算得率,4 ℃贮藏 15 h 后用于后续相关指标的检测。白豆干的制作及后续相关指标的检测重复 3 批次,每批次 3~6 个平行,其均值用于数据分析。

1.2.2 水分含量测定 按 GB 5009.3—2016 执行。

1.2.3 保水性测定 参考 Puppo 等^[13]的方法并修改。将样品切成 5 cm×5 cm×5 mm 立方体,取 4 块(约 5.00 g)至 50 mL 离心管中,7 104×g 离心 20 min,使用干滤纸拭去表面残余水,称重,于 102 ℃烘干至恒重,按式(1)计算保水性(WHC)。

$$W_{HC} = \frac{M_1 - M_2}{M_0 - M_2}, \quad (1)$$

式中:

W_{HC} ——保水性,%;

M_0 ——样品原始质量,g;

M_1 ——样品离心后的质量,g;

M_2 ——样品干燥至恒重后的质量,g。

1.2.4 电子扫描显微镜分析 参考 Niu 等^[14]的方法并修改。将白豆干切成约 5 mm×5 mm×1 mm 的小块,于液氮中冷冻,真空干燥后放置于双面胶带上,黄金喷涂 60 s,加速电压 20 kV,放大倍数 100 倍。

1.2.5 凝胶电泳分析 参考 Li 等^[15-16]的方法并修改。取 0.001 g 豆干冻干粉,与 1 mL 2% SDS 振荡混匀,25 ℃静置 30 min,11 100×g 离心 5 min,上清液中加入 1 mL 溶解液(0.125 mol/L Tris-HCl,pH 6.8,13%甘油、10% SDS、0.005% 溴酚蓝、5% β -巯基乙醇),沸水浴 5 min,11 100×g 离心 20 min,取 5 μ L 上清液上样。浓缩胶质量分数为 5%,分离胶质量分数为 12.5%,浓缩胶阶段恒电流 20 mA,分离胶阶段恒电流 50 mA。考马斯亮蓝 R-250 染色 2 h 后进行脱色扫描,使用 Gel Pro 4.0 软件对 α' 、 α 、 β 、A、B 亚基进行光密度分析并计算其相较于 7S 和 11S 蛋白总量的相对比例^[15]。

1.2.6 质构特性测定 将新鲜制备的白豆干用不锈钢模具切成直径为 25.0 mm、高度为 10.0 mm 的圆柱形样品,放置在 TA-XT Plus 质构分析仪的平台中心。

(1) 凝胶强度:参考李君等^[17-18]的方法并修改。使用球形探头 P/5S,采用压缩距离测定模式,测前速度 1.00 mm/s;测中速度 1.10 mm/s;测后速度 10.00 mm/s;压缩距离 5.00 mm;触发力 0.098 N。

(2) 全质构分析(TPA):参考 Szczesniak 等^[19-20]的方法并修改。使用柱形探头 P50;测前、后速度 1.00 mm/s;测中速度 0.50 mm/s;样品形变量 30%;触发力 0.049 N;循环 2 次。

(3) 蠕变行为:参考卢惠^[21]的方法并修改。使用柱形探头 P50,触发力 0.049 N,探头速度 1.00 mm/s,压缩力为 1.961 N,保持 10 min。压缩过程中记录试样的载荷和高度,将其转化为应变和应力,并使用三参数 Kelvin 模型在 Origin 软件中进行蠕变行为拟合,并分别按式(2)~式(7)进行应变应力转化及拟合。

$$\sigma = \frac{F}{\pi r^2}, \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{h}{h_0}, \quad (3)$$

$$\epsilon_t = -ae^{-\frac{t}{b}} + c, \quad (4)$$

$$a = \frac{\sigma_0}{G_m}, \quad (5)$$

$$b = \frac{\mu_m}{G_m}, \quad (6)$$

$$c = \frac{\sigma_0}{G_0}, \quad (7)$$

式中:

F ——压缩过程的压力, N;

r ——样品初始半径, mm;

h_0 ——样品初始高度, mm;

h ——样品压缩距离, mm;

ϵ ——应变;

t ——时间, s;

a, b, c ——常数;

σ_0 ——恒定的蠕变参数真应力, kPa;

G_m ——系统的弹性模量, kPa;

μ_m ——系统的黏性系数, kPa·s;

G_b ——平衡弹性模量, kPa;

μ_m/G_m ——理论松弛时间(对于某种特定的黏弹性材料,理论松弛时间固定不变^[22])。

1.2.7 数据分析 采用 IBM SPSS Statistics 23 软件进行方差分析,如有显著差异,则进一步采用最小显著差异法(LSD)进行成对比较;采用 Origin 2021 Pro 软件进行皮尔森相关性分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 对白豆干得率、水分含量和保水性的影响

由表 1 可知,随着豆浆中食盐添加量的增加,新鲜白豆干的水分含量显著增加($P < 0.05$),豆干得率显著提高($P < 0.05$),对应的豆干干重得率也呈升高趋势。在豆浆中添加食盐,使得因钙盐和加热变性导致的大豆蛋白凝胶体系可以保存更多的水分,且溶出到黄浆水中的蛋白质总量略有降低,是因为食盐的加入可以通过水合 Na^+ 与蛋白质分子上的带电基团结合,从而增强蛋白质的水化能力^[23-24]。但随着豆浆中食盐添加量的增加,白豆干的保水性呈下降趋势,说明尽管食盐的添加可以增强蛋白质的水化能力,使豆干蛋白凝胶体系中含水量显著提高,但蛋白质与水的作用力相对降低。

2.2 对白豆干微观结构及蛋白质分子量的影响

由图 1 可知,随着豆浆中食盐添加量的增加,豆干凝胶网络孔隙呈增大趋势,致密性和均一性呈下降趋势。研究^[25]表明,NaCl 的添加可通过静电作用改变蛋白质聚集的类型并调整聚集率,有利于蛋白质凝胶的形成,导致蛋白质基团更快地聚集,形成更疏松的结构。

大豆蛋白主要由大豆球蛋白(简称 11S)的酸性(A, 约 34 kDa)和碱性(B, 约 20 kDa)亚基以及 β 伴大豆球蛋白(简称 7S)的 β (45~52 kDa)、 α (57~68 kDa)、 α' (57~72 kDa)亚基组成,7S 和 11S 的不同组成比例一般与大豆品种及其制品的加工方法和品质相关^[15]。由图 2 和表 2 可知,白豆干的 7S/11S 接近 1:1,除添加 1.00% 食盐导致豆干中 β 亚基显著降低外,其他添加量对豆干的大豆蛋白亚基组成无显著性影响。

表 1 豆浆中食盐添加量对白豆干的得率、水分含量和保水性的影响[†]

Table 1 Effects of different levels of NaCl added in soymilk on the yield, moisture and water holding capacity of resulted white dried beancurds

食盐添加量/%	水分含量/%	湿重得率/($10^{-2} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)	干重得率/($10^{-2} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)	保水性/%
0.00	69.4±0.2 ^a	129.1±2.6 ^a	39.5±0.8 ^a	86.1±0.4 ^a
0.25	70.1±0.1 ^b	136.5±2.1 ^b	40.8±0.6 ^{ab}	85.7±0.6 ^a
0.50	71.7±0.4 ^c	144.4±2.4 ^c	40.9±0.7 ^{ab}	84.3±1.0 ^{ab}
0.75	73.8±0.3 ^d	158.8±2.7 ^d	41.6±0.7 ^{bc}	82.8±1.3 ^b
1.00	76.1±0.6 ^e	179.5±3.7 ^e	42.9±0.9 ^c	80.1±1.2 ^c

[†] 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

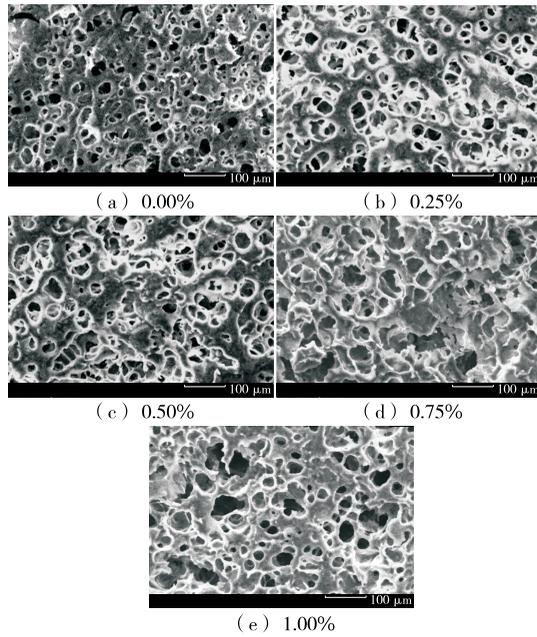


图 1 豆浆中添加不同量食盐生产的豆干的扫描电子显微镜图

Figure 1 The scanning electron microscope images of dried beancurds produced from soymilk added with different concentrations of NaCl ($\times 100$)

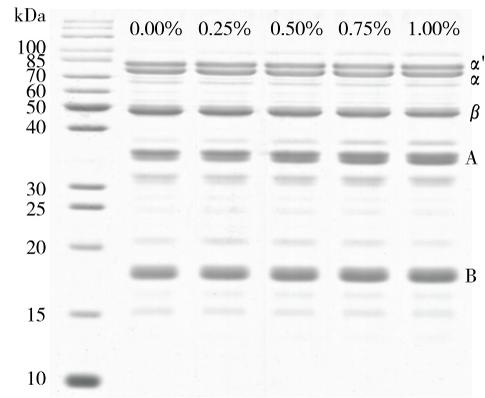


图 2 豆浆中添加不同量食盐生产的豆干的 SDS-PAGE 图

Figure 2 The SDS-PAGE map of dried beancurds produced from soymilk added with different levels of NaCl

2.3 对白豆干质构特性的影响

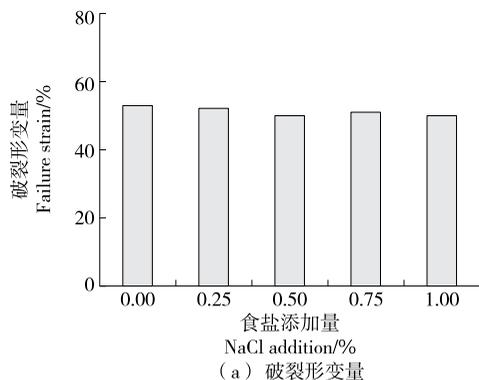
2.3.1 凝胶强度 由图 3 可知,食盐添加量对豆干破裂时的形变量无显著影响,豆干破裂时形变量均值非常接近,处于 50%~53%。但是随着豆浆中食盐添加量的增加,白豆干的破裂力和凝胶强度均呈显著降低趋势,与空白对照相比,豆浆中添加 0.25%~1.00% 的食盐制得的白

表 2 豆干中各亚基的相对比例[†]

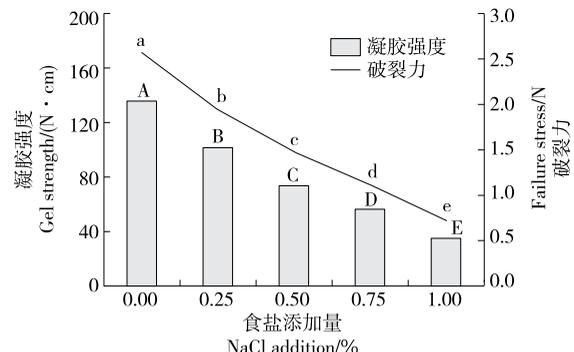
Table 2 The relative proportion of each subunit in SDS-PAGE map of dried beancurds %

食盐添加量	7S			11S	
	α'	α	β	A	B
0.00	13.48 \pm 3.48	15.05 \pm 5.05	22.93 \pm 2.93 ^a	20.14 \pm 0.14	28.40 \pm 8.40
0.25	13.29 \pm 3.29	14.19 \pm 4.19	21.02 \pm 1.02 ^{ab}	23.42 \pm 3.42	28.08 \pm 8.08
0.50	13.85 \pm 3.85	15.16 \pm 5.16	21.19 \pm 1.19 ^{ab}	22.94 \pm 2.94	26.86 \pm 6.86
0.75	13.24 \pm 3.24	15.31 \pm 5.31	20.10 \pm 0.10 ^{ab}	23.60 \pm 3.60	27.75 \pm 7.75
1.00	12.65 \pm 2.65	14.94 \pm 4.94	18.90 \pm 8.90 ^b	23.65 \pm 3.65	29.86 \pm 9.86

[†] 字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。



(a) 破裂形变量



(b) 凝胶强度与破裂力

字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 豆浆中食盐添加量对白豆干破裂时形变量、破裂力及凝胶强度的影响

Figure 3 Effects of different levels of NaCl added in soymilk on the failure strain, failure stress and gel strength of resulted white dried beancurds

豆干破裂力和凝胶强度分别降低了 24.4%~72.4%, 26.1%~74.1%, 与白豆干的微观结构结果相一致。

2.3.2 TPA 由表 3 可知,除弹性外,豆浆中食盐的添加使豆干的硬度、黏聚性、胶着度、咀嚼度和回复性显著降低($P<0.05$),尤其是硬度、胶着度和咀嚼度。与空白对照相比,豆浆中加入 0.50%~1.00%的食盐会使豆干的硬度、胶着度和咀嚼度分别下降 16.3%~64.6%, 20.4%~71.3%, 19.2%~70.8%。食盐添加量对豆干的黏聚性和回复性的影响相对较小,相比于空白对照,添加 0.75% 或 1.00% 的食盐才会产生显著差异($P<0.05$)。豆浆中添加食盐,改变了大豆蛋白凝胶过程中的离子强度,食盐添加量越高,蛋白质凝胶网络结构越疏松^[25],因此豆干的硬度和咀嚼度等降低。

2.3.3 蠕变行为 由图 4 可知,在相同的压缩时间点,豆浆中食盐添加量越高,白豆干的应变越大,且随着压缩时间的延长,豆干的时间—应变曲线趋于平衡。三参数的 Kelvin 模型对豆干的时间—应变曲线拟合度较好(R^2 为 0.975 1~0.982 2)。尽管豆浆中添加不同量食盐所生产

的豆干的初始应变不同,但均保持着典型的蠕变行为特征,即恒定应力下,应变随时间的延长而增加,明显体现出白豆干的黏弹性行为特征及其蠕变参数的稳定性。

系统弹性模量(G_m)是评价材料蠕变至平衡点变化程度的标志,平衡弹性模量(G_b)为材料在蠕变至理论平衡点的应变时的瞬时弹性模量,系统黏度系数(μ_m)反映了材料的黏性特征^[26]。由图 5 可知,随着食盐添加量的增加,豆干的系统弹性模量、平衡弹性模量和系统黏性系数均呈显著降低趋势,与扫描电镜、凝胶强度和全质构分析结果基本一致,更疏松的凝胶网络结构通常意味着更低的弹性模量,此外,更高的水分含量意味着更低的黏弹性。

松弛时间为 μ_m 与 G_m 的比值,表征材料到达平衡点的理论时间,反映能量的损耗。一般来说,恒应力条件下,蛋白凝胶网络结构越致密或其蛋白凝胶—水的结合力越强,结构中的水分子在外力作用下的流动空间越受限,则需要损耗更多的时间和能量来使得内部体系达到相对平衡,表现为更长的松弛时间^[26]。与空白对照相比 [(216.2 ± 5.9) s],随着食盐添加量的增加,豆干的松弛时

表 3 豆浆中食盐添加量对白豆干质构特性的影响[†]

Table 3 Effects of different levels of NaCl added in soymilk on the texture characteristics of resulted white dried beancurds

食盐添加量/%	硬度/N	弹性	黏聚性	胶着度	咀嚼度	回复性
0.00	32.5±1.8 ^a	0.92±0.02	0.65±0.02 ^a	2 156.5±184.2 ^a	1 943.3±165.9 ^a	0.21±0.01 ^a
0.25	31.2±2.4 ^a	0.91±0.02	0.63±0.02 ^{ab}	2 014.5±164.9 ^a	1 829.1±171.0 ^a	0.20±0.01 ^a
0.50	27.2±4.9 ^b	0.91±0.01	0.62±0.01 ^{ab}	1 716.9±335.6 ^b	1 569.4±311.0 ^b	0.19±0.01 ^a
0.75	16.6±1.8 ^c	0.90±0.03	0.59±0.07 ^b	1 002.2±129.4 ^c	884.5±124.5 ^c	0.19±0.05 ^a
1.00	11.5±0.6 ^d	0.89±0.01	0.53±0.02 ^c	619.5±47.2 ^d	567.6±45.1 ^d	0.15±0.01 ^b

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

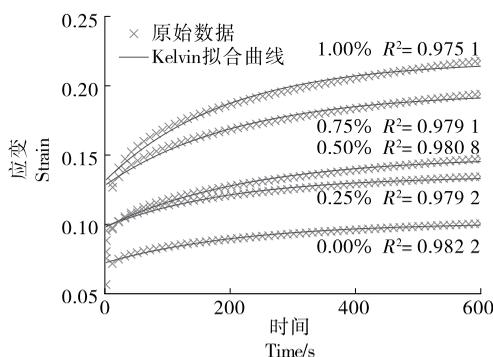


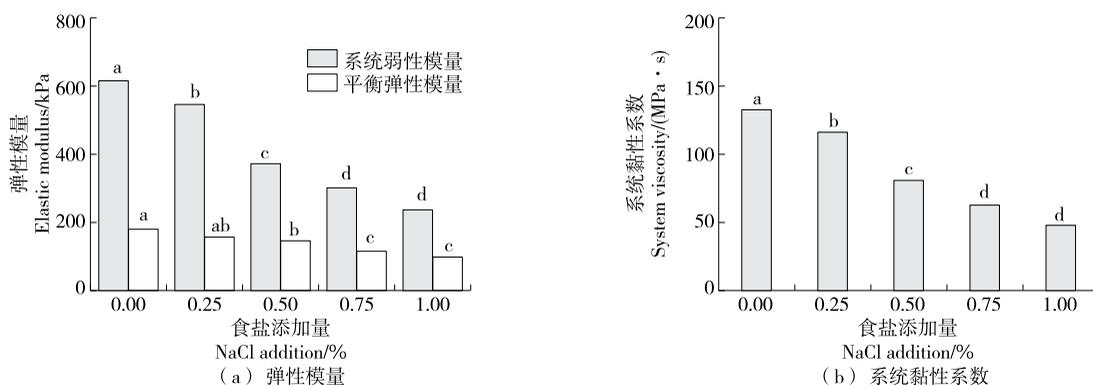
图 4 食盐不同添加量下白豆干的时间—应变蠕变行为及其 Kelvin 模型拟合结果

Figure 4 The time vs. the strain of white dried beancurds produced from soymilk varying in NaCl concentrations based on creep testing and that calculated based on the Kelvin model fitting

间呈微弱降低趋势,分别为 (213.5 ± 11.4) , (215.3 ± 14.4) , (206.1 ± 7.5) , (200.8 ± 7.0) s,说明食盐添加量越大,豆干的结构致密性或其蛋白凝胶—水的结合力可能相对较低。

2.4 相关性分析

由图 6 可知,食盐添加量与白豆干的水分含量、湿重和干重得率高度正相关,与豆干的保水性、凝胶强度、硬度、胶着度、咀嚼性、弹性模量和黏性系数等质构特性高度负相关,豆浆中食盐的添加促进了大豆蛋白质的水合能力,并使得更多的蛋白质参与到蛋白质凝胶体系的构建或截留在凝胶体系内,这可能主要是通过水合 Na^+ 与蛋白质分子上的带电基团结合^[23-24]。随着食盐添加量的增加,豆干的保水性、凝胶强度、硬度、胶着度、弹性模量等质构特性均呈下降趋势,说明较高盐浓度的豆浆使得豆干蛋白质凝胶体系中蛋白质—蛋白质分子之间和蛋白质—水分子之间的结合强度以及蛋白凝胶网络结构的致密性下降,这可能主要与高盐浓度处理的豆干凝胶网



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 食盐添加量对白豆干弹性模量(及系统黏性系数)的影响

Figure 5 Effects of different levels of NaCl added in soymilk on the elastic modulus (and system viscosity) of white dried beancurd

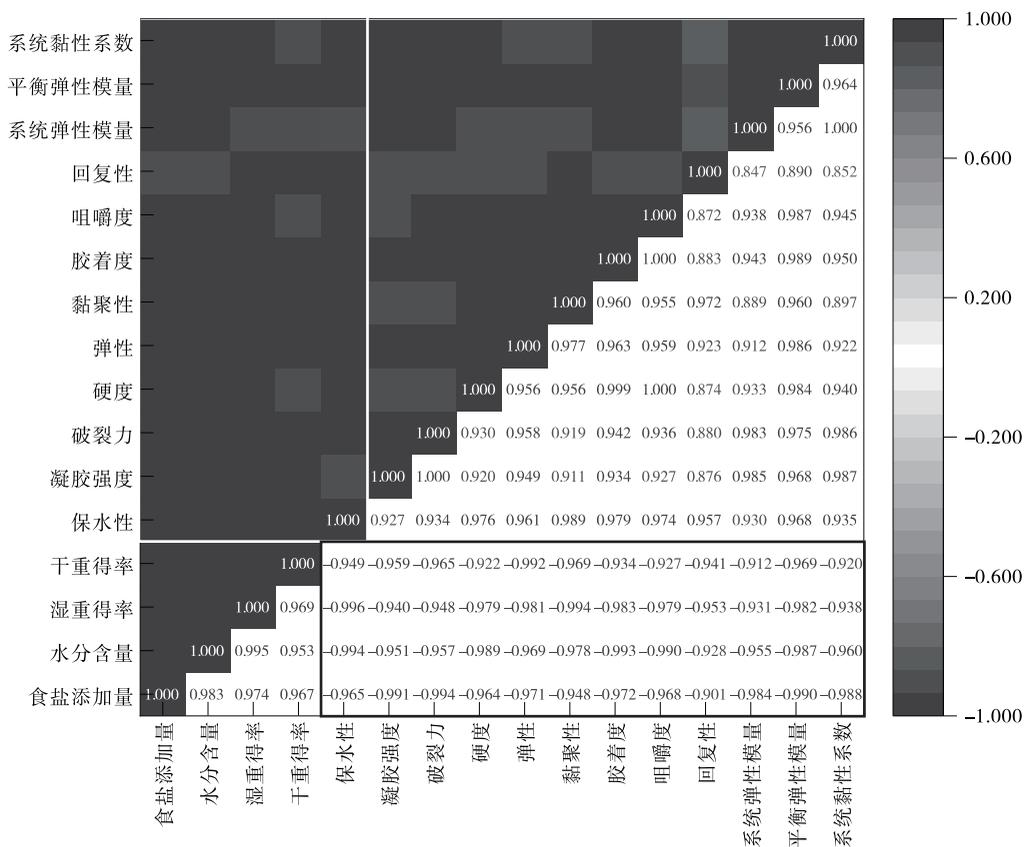


图 6 豆浆中食盐浓度及对应豆干各质构属性指标的皮尔森相关系数分析

Figure 6 The Person correlation coefficient of NaCl levels in soymilk and textural properties of dried beancurd counterparts

络结构中较高的水分含量(或者是较低的蛋白质含量)有关,一般来说,凝胶体系的水分含量越高,其黏弹性、硬度和刚度等越低^[22]。

3 结论

随着豆浆中食盐添加量从 0.00% 增加到 1.00%, 所

生产的白豆干的得率和水分含量呈显著上升趋势 ($P < 0.05$), 豆干的保水性、凝胶强度、破裂力、硬度、黏聚性、胶着度、咀嚼度、弹性模量及黏性系数呈下降趋势, 但豆浆中食盐添加量基本不影响豆干的破裂距离、弹性、回复性 (1.00% NaCl 处理样品除外) 及其大豆蛋白亚基组成。

豆干在蠕变行为测试过程中的应变-时间关系曲线与三参数 Kelvin 模型拟合度较好(R^2 为 0.975 1~0.982 2),呈典型的黏弹性特征。食盐添加量与白豆干的水分含量和得率高度正相关,与豆干的保水性、凝胶强度、硬度、胶着度、咀嚼性、弹性模量和黏性系数等质构特性高度负相关,说明豆浆中食盐的添加促进了大豆蛋白质的水合,并使得更多的蛋白质参与到蛋白凝胶体系的构建或截留在凝胶体系内,但是豆干蛋白凝胶网络结构中较高的水分含量使得蛋白凝胶网络结构的致密性下降以及凝胶网络结构强度的总体降低。因此,豆浆中食盐的添加会形成更加柔软的白豆干,其中添加 1.00% 食盐的豆干产品过于柔软,而中等食盐添加量(0.50%~0.75%)的白豆干在质构特性上综合性较好,且能提供消费者所习惯的风味豆干的咸度,可进一步与香辛料混合用于简化传统卤豆干的研制,但豆浆中食盐的添加使得豆干的凝胶结构强度总体降低的具体机理还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 李海涛, 赵良忠, 范柳, 等. 休闲豆干真空脉冲卤制工艺优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 173-179.
LI H T, ZHAO L Z, FAN L, et al. Optimization of vacuum pulse marinating technology for leisure dried tofu [J]. Food Industry Technology, 2018, 39(17): 173-179.
- [2] 陈凡凡, 滕飞, 韩松, 等. 酶解对豆腐干凝胶结构和理化特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(5): 23-30.
CHEN F F, TENG F, HAN S, et al. Effect of enzymatic hydrolysis of soymilk on the microstructure and physicochemical properties of dried tofu[J]. Food Science, 2020, 41(5): 23-30.
- [3] 李加双, 张良, 王晶, 等. 全豆豆腐与传统豆腐的品质差异性研究[J]. 食品科技, 2018, 43(7): 35-39.
LI J S, ZHANG L, WANG J, et al. Study on the quality differences of whole soybean curd and traditional tofu[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(7): 35-39.
- [4] ESCOBEDO A, MOJICA L. Pulse-based snacks as functional foods: Processing challenges and biological potential[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(5): 1-25.
- [5] 朱建飞, 刘欢. 大豆制品生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021: 42-48.
ZHU J F, LIU H. Production technology of soybean products[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021: 42-48.
- [6] 杨倩, 张慧, 李瑞杰. 加工条件对豆干质构的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2011, 30(5): 683-686.
YANG Q, ZHANG M, LI R J. Effect of processing conditions on the texture of the dried beancurd[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2011, 30(5): 683-686.
- [7] 毛佳怡, 秦礼康, 曾海英, 等. 传统卤豆干工艺优化及其对风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 137-142, 150.
MAO J Y, QIN L K, ZENG H Y, et al. Optimization of traditional marinated dried bean curd process and its influence on flavor substance[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(23): 137-142, 150.
- [8] 杨倩. 调味豆腐干加工及保藏的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 2-4.
YANG Q. Research on the procession and preservation of the seasoning dried soy bean curd[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012: 2-4.
- [9] HUANG Z R, SUN J, ZHAO L Z, et al. Analysis of the gel properties, microstructural characteristics, and intermolecular forces of soybean protein isolate gel induced by transglutaminase[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10: 772-783.
- [10] YU J, WANG Y, LI D, et al. Freeze-thaw stability and rheological properties of soy protein isolate emulsion gels induced by NaCl[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107113.
- [11] CHEN K, HUANG Y Q, LI X J, et al. Textural properties of firm tofu as affected by calcium coagulants [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15: 4 508-4 516.
- [12] TITCHENAL C A, DOBBS J. A system to assess the quality of food sources of calcium [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2007, 20(8): 717-724.
- [13] PUPPO M C, AÓN M C. Structural properties of heat-induced soy protein gels as affected by ionic strength and pH[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(9): 3 583-3 589.
- [14] NIU Y G, QI X, LI N, et al. Gelling and bile acid binding properties of gelatin-alginate gels with interpenetrating polymer networks by double cross-linking[J]. Food Chemistry, 2019, 270: 223-228.
- [15] LI M, CHEN F S, YANG B, et al. Preparation of organic tofu using organic compatible magnesium chloride incorporated with polysaccharide coagulants[J]. Food Chemistry, 2015, 167: 168-174.
- [16] 赵雷, 朱杰, 苏恩谊, 等. 南豆腐加工过程中品质及蛋白质结构的变化[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 62-69.
ZHAO L, ZHU J, SU E Y, et al. Effect of processing conditions on quality and protein secondary structure in southern tofu[J]. Food Science, 2019, 40(1): 62-69.
- [17] 李君, 康昕, 蒲雪丽, 等. 不同冷却温度添加氯化镁和谷氨酰胺转氨酶对大豆全粉凝胶流变性质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(8): 17-21.
LI J, KANG X, PU X L, et al. Effects of adding magnesium chloride and glutamine transaminase after cooling to different temperatures on the rheological properties of heat-induced gels from whole soybean flour[J]. Food Science, 2021, 42(8): 17-21.
- [18] 陈慧, 黄建联, 周文果, 等. 鳙鱼鱼糜与常见鱼糜凝胶品质对比[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 19-23, 137.
CHEN H, HUANG J L, ZHOU W G, et al. Comparative analysis of gel quality of Chinese herring surimi and common surimi[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 19-23, 137.

(下转第 60 页)

- Food Hygiene, 2014, 26(3): 205-209.
- [8] 郁杰, 王一平, 葛竹兴, 等. 乳乃康有效成分阿莫西林在牛奶中残留量的动态变化[J]. 中国兽医学, 2011, 41(4): 418-421.
YU J, WANG Y P, GE Z X, et al. Dynamic changes of the residual quantity of amoxicillin of Runnaikang drug in the cow milk[J]. China Veterinary Science, 2011, 41(4): 418-421.
- [9] 侯东军, 吴银良, 刘素英. 牛奶中阿莫西林残留的检测及其消除规律的研究[J]. 中国兽药杂志, 2005, 39(12): 16-18.
HOU D J, WU Y L, LIU S Y. Research on the detection and elimination of amoxicillin residues in milk[J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2005, 39(12): 16-18.
- [10] 李筱翠. 用于食品安全分析的乳粉标准物质的研制[D]. 北京: 北京化工大学, 2015: 46-49.
LI X C. The development of milk powder reference material for food safety analysis[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015: 46-49.
- [11] 国家技术监督局. 一级标准物质技术规范: JJF 1006—1994[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 1994.
State Bureau of Technical Supervision. Technical specifications for primary reference materials: JJF 1006—1994[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 1994.
- [12] 国家技术监督局. 标准物质定值的通用原则及统计学原理: JJF 1343—2012[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2012.
State Bureau of Technical Supervision. General principles and statistical principles of standard material determination: JJF 1343—2012 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 2012.
- [13] 刘燕, 殷柯柯, 李博, 等. 豇豆中啶虫脒基体标准物质的研制[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 65-71.
LIU Y, YIN K K, LI B, et al. Preparation of matrix reference material for acetamiprid in cowpeas[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 65-71.
- [14] 呼念念, 黎焯昕, 陈冬东, 等. 兽药残留分析质量控制基体标准物质研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8 242-8 250.
HU N N, LI Y X, CHEN D D, et al. Research progress of matrix reference material for quality control of veterinary drug residue analysis[J]. J Food Saf Qua, 2021, 12(20): 8 242-8 250.
- [15] 梅力, 高晓龙, 王英超, 等. 新城疫病毒 LaSota 株检测用国家核酸标准物质的研制[J]. 动物医学进展, 2021, 42(7): 28-33.
MEI L, GAO X L, WANG Y C, et al. Preparation of national nucleic acid reference material for detection of Newcastle disease virus LaSota strain[J]. Progress in Veterinary Medicine, 2021, 42(7): 28-33.
- [16] 李全发, 于寒松, 王敏, 等. 染料木素纯度标准物质定值及不确定度评估[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 95-101.
LI Q F, YU H S, WANG M, et al. Determination of purity certified reference material of genistein and the evaluation of its uncertainty [J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 95-101.
- [17] 张敏. 猪尿冻干粉中盐酸克伦特罗标准物质的研制[D]. 天津: 天津大学, 2012: 35-37.
ZHANG M. The development of standard substance clenbuterol in lyophilized pig urine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 35-37.
- [18] 呼念念. 鸡肉中硝基喹啉类兽药残留检测质量控制基体标准物质的研制与应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021: 39-40.
HU N N. Development of matrix reference material for quality control in determination of nitrofurans veterinary drug residues in chicken[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021: 39-40.
- [19] 刘芳. 全蛋液中恩诺沙星药物残留基体标准物质的研制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018: 26-29.
LIU F. Development of the certified reference material of enrofloxacin residue in whole liquid egg [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018: 26-29.
- (上接第 25 页)
- [19] SZCZESNIAK A S, BRANDT M A, FRIEDMAN H H. Development of standard rating scales for mechanical parameters of texture and correlation between the objective and the sensory methods of texture evaluation[J]. Journal of Food Science, 1963, 28(4): 397-403.
- [20] 吴妮, 赵武奇, 卢丹, 等. 热辅助超声波处理对豆腐干杀菌工艺优化及效果[J]. 食品与机械, 2019, 35(6): 201-204.
WU N, ZHAO W Q, LU D, et al. Study on sterilization effect and process optimization of dried bean curd by thermosonication treatment[J]. Food & Machinery, 2019, 35(6): 201-204.
- [21] 卢慧. 粘弹性食品材料的物性仿生检测方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 33-36.
LU H. Study on bionic detection method of physical properties of viscoelastic food materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 33-36.
- [22] 马彦华, 宣传忠, 武佩, 等. 玉米秸秆振动压缩过程的应力松弛试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 88-94.
MA Y H, XUAN C Z, WU P, et al. Experiment on stress relaxation of corn stover during compression with assisted vibration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(19): 88-94.
- [23] ANDREADIS M, MOSCHAKIS T. Effect of ethanol on gelation and microstructure of whey protein gels in the presence of NaCl [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 107985.
- [24] HUANG Z R, SUN J, ZHAO L Z, et al. Analysis of the gel properties, microstructural characteristics, and intermolecular forces of soybean protein isolate gel induced by transglutaminase [J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10: 772-783.
- [25] BRITO-OLIVEIRA T C, CAVINI A, FERREIRA L S, et al. Microstructural and rheological characterization of NaCl-induced gels of soy protein isolate and the effects of incorporating different galactomannans[J]. Food Structure, 2020, 26(3): 100158.
- [26] LIU Y M, LI R J, ZHAO S M, et al. Effects of water, Na⁺ and Ca²⁺ on stress-relaxation properties of surimi gel[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(s1): 529-533.