

冷冻豆腐复合添加剂配比及品质评价

李良¹, 周艳¹, 马春芳², 刘汝萃², 刘军^{2,*}, 田甜¹, 吴长玲¹, 王中江¹, 江连洲¹

(1. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;

2. 山东禹王生态食业有限公司, 山东禹城 253000)

摘要:为改善冷冻豆腐的加工及食用品质,通过筛选大豆分离蛋白、变性淀粉及卡拉胶添加量并进行复配,研究复配添加剂对冷冻豆腐品质的影响。结果显示,以冷冻豆腐的保水性和复水性为指标,筛选出大豆分离蛋白、变性淀粉和卡拉胶的添加量分别为0.5%、0.03%和0.03% (w/v)。结合单因素试验结果,采用感官、质构及微观结构分析等方法研究复合添加剂对冷冻豆腐品质的影响,实验结果显示:当复合添加剂配比为0.5% (w/v) 大豆分离蛋白+0.03% (w/v) 变性淀粉+0.03% (w/v) 卡拉胶时,制作的冷冻豆腐凝胶性好,热稳定性好,蛋白结构均匀、致密,具有较强耐煮性。表明通过改变添加剂浓度和配比可改善冷冻豆腐品质,有利于产品的大规模化工业生产。

关键词:冷冻豆腐,复合添加剂,质构特性,微观结构

Compound Additives Proportion and Quality Evaluation of Frozen Tofu

LI Liang¹, ZHOU Yan¹, MA Chun-fang², LIU Ru-cui², LIU Jun^{2,*}, TIAN Tian¹,

WU Chang-ling¹, WANG Zhong-jiang¹, JIANG Lian-zhou¹

(1. Food College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Shandong Yuwang Ecological Food Co., Ltd., Yucheng 253000, China)

Abstract: To improve the processing and quality of frozen tofu, the effects of compound additives on the quality of frozen tofu were studied by screening the contents of soy protein isolate, modified starch and carrageenan. The results showed that the soy protein isolate, modified starch and carrageenan were 0.5%, 0.03% and 0.03% (w/v), respectively, based on the water retention and rehydration of frozen tofu as index. Combined with the results of single factor test, the effects of compound additives on the quality of frozen tofu were studied by means of sensory, texture and microstructure analysis. The experimental results showed that when the compound additives ratio was 0.5% (w/v) soy protein isolate + 0.03% (w/v) modified starch + 0.03% (w/v) carrageenan, the frozen tofu has good gel property and good heat stability, the protein structure was uniform, dense and has strong boiling resistance. It showed that the quality of frozen tofu can be improved by changing the concentration and ratio of additives, which is beneficial to the large-scale industrial production of products.

Key words: frozen tofu; compound additives; mechanical properties; microstructure

中图分类号: TS214.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)05-0093-07

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.05.017

引文格式: 李良, 周艳, 马春芳, 等. 冷冻豆腐复合添加剂配比及品质评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 93-98, 107.

豆腐是一种闻名中外的的美食,营养丰富且全面,素有“植物肉”之美称,人体对豆腐消化率可以达到92%~95%。但新鲜豆腐普遍存在含水量高,不易贮存又易破碎等问题,若制成冷冻豆腐,易于脱水和储运,还具有特殊的口感^[1]。通常冷冻豆腐是豆腐经速冻(-18℃)后的产品,营养价值丰富,含蛋白质63.4%,脂肪26.4%,碳水化合物7.2%,水分0.4%,其余2.6%。此外,冷冻豆腐含有卵磷脂,可在人体内能形成胆碱,有预防动脉硬化的功效。同时,冷冻豆腐还含有丰富的维生素E,每100g冷冻豆腐含维生素E 251mg,具有促进人体血液循环,使人保持青

春活力,促进雌性激素分泌的功效^[2]。且冷冻豆腐较之于新鲜豆腐具有更高的营养价值,是基于冷冻豆腐的水分含量低,而非营养物质增加^[3]。

目前国内冷冻豆腐加工过程中存在着耐煮性差、口感粗糙、复水性差等问题。李里特等^[4]研究发现豆腐得率和保水性与大豆粗蛋白含量呈正相关,与水溶性大豆分离蛋白呈显著正相关;豆腐的硬度、黏性、脆度与大豆蛋白含量成负相关,与大豆球蛋白含量呈正相关;宁发子等^[5]研究发现,蛋白基食品中加入卡拉胶引入了强亲水物质,保护了蛋白分子间二硫键,维持蛋白凝胶的空间结构。杨晓泉等^[6]研究

收稿日期: 2018-05-28

作者简介: 李良(1981-),男,博士,研究方向: 粮食油脂及植物蛋白, E-mail: liliangneau@163.com。

* 通讯作者: 刘军(1982-),男,硕士,工程师,研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 15663591173@163.com。

基金项目: 黑龙江省应用技术研究及开发计划重大项目(GA17B002)。

发现,大豆 11S 蛋白与卡拉胶与蛋白发生络合作用,能控制油脂聚附与凝固,加强油脂的分散性,控制油脂与蛋白质的相互作用,从而提高蛋白在受热时的稳定性,有可能改善豆制品的热稳定性。上述研究仅表明豆腐制作过程中分别加入蛋白、淀粉和多糖三种添加剂可在一定程度上改善豆腐品质,但这三种添加剂及复配添加对冷冻豆腐品质的影响仍需进一步研究。

本试验研究以卤水为凝固剂添加不同食品级添加剂制作冷冻豆腐,对冷冻复水豆腐进行感官评定、质构测定及扫描电镜微检测,研究各种单一或复合添加剂对冷冻豆腐品质的影响,以期得到适合高品质冷冻豆腐生产的添加剂,为冷冻豆腐的大规模化工业生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

市售东北大豆 山东禹王生态食业有限公司;大豆分离蛋白(离散型)SPI 北京惠康源生物科技有限公司;卡拉胶 河南恩博生物科技有限公司;变性淀粉 郑州大江生物科技有限公司;氯化镁、消泡剂、碳酸氢钠 北京索莱宝生物科技有限公司。

HT-N(S)型电子天平 苏州盛世衡器有限公司;WK2102 型电磁炉 广东美的生活电器制造有限公司;CTK150R 型离心机 长沙高新技术产业开发区湘仪离心机仪器有限公司;TA-XT2i 型质构分析仪 英国 Stable Micro System 公司;J-AD16N 型冷冻干燥机 杭州佳洁机电设备有限公司;SU8010 型场发射扫描电子显微镜 英国 Quorum 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 冷冻豆腐加工工艺 大豆→挑选→浸泡(12~15 h)→热烫→磨浆(豆:水=1:7)→过滤→加消泡剂(0.01%)→煮浆(煮沸 5 min)→点脑(先加添加剂再加凝固剂)→蹲脑(10~15 min)→成型(豆腐模型中压制 30 min)→冷冻(-18 ℃,48 h)→成品

称量 100 g(精确至 0.01 g)黄豆,浸泡 10 h(0.5%的 NaHCO₃ 溶液),热烫 5 min(沸水),弱碱水磨浆(豆水比 1:7,pH6.5~7.0,温度 90 ℃),100 目纱布过滤除去浆渣,加入 0.01% 消泡剂后得生豆浆,95 ℃ 温度煮沸浓缩 5 min,80~85 ℃ 时加入添加剂和凝固剂,保温静置 15 min 形成豆花,待豆花豆腐模型中压制 30 min 成型后,冷却至室温,豆腐切成 5.0 cm × 5.0 cm × 2.0 cm 正方体-18 ℃ 条件下冷冻 48 h。

1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 大豆分离蛋白添加量的确定 保持豆浆温度 80~85 ℃,羟丙基变性淀粉 0.03% (w/v) (以 400 mL 煮沸豆浆计),卡拉胶 0.03% (w/v) (以 400 mL 煮沸豆浆计),在其他条件不变的情况下,选取大豆分离蛋白添加量为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% (w/v) (以 400 mL 煮沸豆浆计),通过保水性(%)、复水性(%)分析确定大豆分离蛋白添加量单因素的最优条件。

1.2.2.2 羟丙基变性淀粉添加量的单因素确定实验 保持豆浆温度 80~85 ℃,大豆分离蛋白

0.5% (w/v) (以 400 mL 煮沸豆浆计),卡拉胶 0.03% (w/v) (以 400 mL 煮沸豆浆计),在其他条件不变的情况下,选取羟丙基变性淀粉添加量为 0.01%、0.02%、0.03%、0.04%、0.05% (w/v) (以 400 mL 煮沸豆浆计),通过保水性(%)、复水性(%)分析确定大豆分离蛋白添加量单因素的最优条件。

1.2.2.3 卡拉胶添加量的单因素确定实验 保持豆浆温度 80~85 ℃,大豆分离蛋白 0.5% (w/v) (以 400 mL 煮沸豆浆计),羟丙基变性淀粉 0.03% (w/v) (以 400 mL 煮沸豆浆计),在其他条件不变的情况下,选取卡拉胶添加量为 0.01%、0.02%、0.03%、0.04%、0.05% (w/v) (以 400 mL 煮沸豆浆计),通过保水性(%)、复水性(%)分析确定大豆分离蛋白添加量单因素的最优条件。

1.2.3 复合凝固剂的配比试验设计 以产量(g/400 mL)、保水性(%)、复水性(%)、感官评价、质构、微观结构等为考察指标,选出三类添加剂的最佳范围并进行交互试验,通过分析,确定复配添加剂的最佳配比,各添加剂配比见表 1。

表 1 生产豆腐的添加剂配比
Table 1 Additives ratio of tofu

编号	卤水浓度 (g/100 mL)	大豆分离蛋白 (%)	变性淀粉 (%)	卡拉胶 (%)
1	1.00	-	-	-
2	1.00	0.5	-	-
3	1.00	0.5	0.03	-
4	1.00	0.5	-	0.03
5	1.00	0.5	0.03	0.03
6	1.00	-	0.03	-
7	1.00	-	0.03	0.03
8	1.00	-	-	0.03

1.2.4 指标的测定

1.2.4.1 冷冻豆腐产量的测定 豆腐的产量表示为 400 mL 熟豆浆获得的豆腐质量来表示^[9]。豆腐水分含量越高,冷冻豆腐产量越高,其凝胶强度越低。

1.2.4.2 豆腐保水性(WHC)测定 称取每个豆腐样品 3 g(精确到 0.0001 g)测保水性。样品切成 3.0 cm × 3.0 cm × 2.0 cm 称重(W_i),置于底部充填足量脱脂棉的 50 mL 离心管中,在 4 ℃、9000 r/min 离心 20 min,去掉豆腐表面的脱脂棉,丢弃上清液,用干燥的滤纸小心地除去豆腐表面残留的液体^[7]。称重(W_r),并根据下式计算保水能力^[8],每个试验重复 3 次。

$$\text{保水性}(\%) = \frac{W_i - W_r}{W_i} \times 100$$

1.2.4.3 冷冻豆腐复水性测定 将约 15 g 冷冻豆腐,切成 4 cm × 4 cm × 3 cm 的豆腐块记为 M₂ 并准确称重(精确至 0.01 g),然后将冷冻豆腐样品置于沸水中煮制 10 min,取出静置沥水 5 min 后称取重量记作 M₁ 并准确称重(精确至 0.01 g),复水性按下式计算,每个试验处理重复 3 次^[9]。

$$\text{复水性}(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_2} \times 100$$

1.2.4.4 冷冻豆腐耐煮性测定 冷冻豆腐样品切成 2.0 cm × 3.0 cm × 2.0 cm 的豆腐块并进行编号,沸水中煮制 0.5 h,考察样品的完整性及捞起性,记录样品边缘出现破损、破碎的时间和程度^[10]。

1.2.5 冷冻复水豆腐的感官评定 邀请 10 位接受过感官评定培训的同学组成评定小组,首先明确本试验的目的和意义以及感官评定的指标和注意事项。对冷冻复水过后的豆腐进行感官评定,评定分数采用 10 分制,每次评定由每个评定成员单独进行,相互不接触交流,样品评定之间用清水漱口^[11]。

1.2.6 冷冻豆腐质构测定 凝胶 TPA 的测定过程是模仿人口腔咀嚼食物的运动过程^[12]。将制作完成的豆腐在 4 ℃ 条件下保存约 12 h,使用小刀将上述豆腐切成 1.0 cm × 1.0 cm × 1.0 cm 的立方体,利用 TA-XT2i 质构分析仪对其进行分析。使用 P/36R 探针将样品压缩两次至 50% 变形触发力 5 g,预测速度 5.0 mm/s,测试速度 1.0 mm/s,测试后速度 10.0 mm/s^[13]。煮制后的冷冻豆腐同样于 4 ℃ 下保存 12 h 后测定。在测试期间,测量每个豆腐样品的质地参数,包括硬度、弹性、粘结性和胶粘性等,在每种情况下至少进行 3 次测试^[14]。

1.2.7 豆腐微观结构的测定 利用场发射扫描电子显微镜观察冷冻豆腐的微观结构,将冷冻豆腐样品切成约 0.8 cm × 0.6 cm × 0.1 cm 薄片,然后进行固定 (pH6.8 戊二醛溶液,4 ℃ 冰箱中固定 1.5 h 以上),冲洗 (pH6.8 磷酸缓冲溶液,冲洗 2 ~ 3 次,每次 10 min),脱水 (浓度依次为 50%、70%、90% 乙醇各

一次洗脱 10~15 min、100% 的乙醇洗脱 2~3 次,每次 10~15 min),置换 (100% 乙醇:叔丁醇 = 1:1 和纯叔丁醇各一次,每次 15 min),干燥 (-20 ℃ 冰箱冷冻 30 min,冷冻干燥 4 h),粘样,涂覆金溅射 (厚度为 10~15 nm),样品处理完成后,在 5 kV 条件下观察试验结果^[15]。

1.3 数据处理

每组实验重复三次,所有试验数据取三次平均,作图采用 Origin 9.0 软件,数据处理使用 SPSS 20.0 软件进行方差分析及差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 大豆分离蛋白添加量的单因素实验 如图 1 所示,当 SPI 添加量从 0.1% (w/v) 增加到 0.9% (w/v) 时,冷冻豆腐样品的保水性和复水性随 SPI 添加量的增加呈现出显著增加 ($p < 0.05$) 的趋势,结果表明冷冻豆腐的保水性与豆浆中粗蛋白和水溶性蛋白含量呈显著正相关,高浓度蛋白之间形成复杂的三维网络结构,提高豆腐凝胶性;SPI 添加量对冷冻豆腐的复水性有协同作用,在添加量为 0.5% (w/v) 时,冷冻豆腐的复水性最好为 23.42%,这是由于水溶性蛋白在凝胶变性的过程中形成的网络结构能更好的结合水分的缘故^[4]。继续增加 SPI 添加量,冷冻豆腐样品的保水性和复水性呈现下降趋势,推测上述试验结果可能是由于加入过量 SPI 后,冷冻条件下水分结晶造成 SPI 变性,进而通过氢键、疏水作用和二硫键形成大小不同的聚集体^[16]。综合考虑,选择最佳 SPI

表 2 冷冻复水豆腐的感官评定

Table 2 The sensory evaluation of frozen rehydration tofu

指标	含义	评价	分数
外观 (A)	用肉眼可感知到的样品表面的完整程度	外形很完整	7~9
		完整度良好	4~6
		较为完整,略有破损	1~3
嫩度 (B)	白齿第一口咬开样品所施加的力	嫩度适中	7~9
		较硬或较软	4~6
		过硬或过软	1~3
多汁性 (C)	样品被咀嚼时在口腔中产生的汁液数量的多少	汁液丰富	7~9
		适口性较差	4~6
		干涩	1~3
风味 (D)	具有豆腐所特有的豆香味,包括气味有浓郁的豆香味及甜味,无异味和滋味,通过嗅觉和味觉感知到	有浓郁的豆香味和甜味,无异味	7~9
		豆香味及甜味较弱,无异味	4~6
		无豆香味及甜味	1~3
色泽 (E)	具有良好的感官色泽,通过观察感知到	色泽为浅黄色、均一、无其它颜色	7~9
		色泽为乳白色、均一、无其它颜色	4~6
		色泽为白色、均一、无其它颜色	1~3
细腻度 (F)	对样品进行观察以及在口中或下咽时感受到的细腻程度	细腻,无颗粒感、纤维感;	7~9
		较为细腻,有颗粒感	4~6
		粗糙,颗粒感、纤维感明显	1~3
总体可接受性 (G)	对样品质构性质的总体接受程度	乐于接受	7~9
		接受	4~6
		勉强可以接受	1~3

$$T(\text{总分}) = 0.1 \times A + 0.1 \times B + 0.1 \times C + 0.1 \times D + 0.1 \times E + 0.1 \times F + 0.1 \times G$$

添加量为 0.5%。

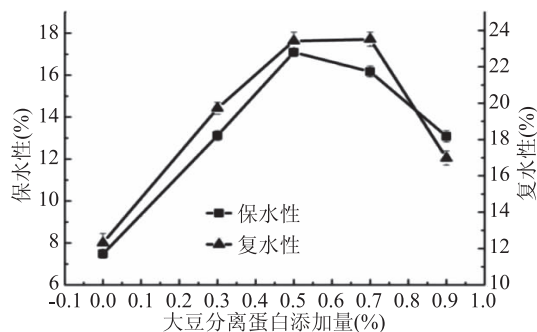


图1 大豆分离蛋白添加量

对冷冻豆腐保水性和复水性的影响

Fig.1 Water retention and rehydration of tofu with different addition of SPI

2.1.2 变性淀粉添加量的单因素实验 图2所示为变性淀粉添加量对冷冻豆腐保水性和复水性的影响,当变性淀粉添加量从0.01%增加到0.05%时,冷冻豆腐样品的保水性和复水性随SPI添加量的增加均呈现出先增加后下降的趋势,在变性淀粉添加量为0.03%时,冷冻豆腐样品的保水性和复水性获得最大值分别为18.43%和22.75%。结果表明适量添加变性淀粉引入了亲水基,增强无定形区的吸水能力,可有效地防止凝胶脱水,增加蛋白凝胶的保水能力和膨胀度,进而增加冷冻豆腐的凝胶强度^[4]。该结果与庞中伟等^[17]人的表述相一致。

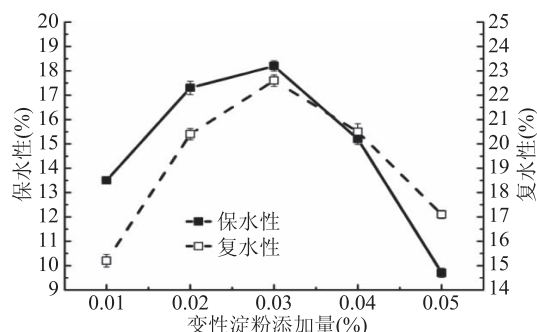


图2 变性淀粉添加量对冷冻豆腐保水性和复水性的影响

Fig.2 Water retention and rehydration of

frozen tofu with different addition of modified starch

2.1.3 卡拉胶添加量的单因素实验 如图3所示,当卡拉胶添加量从0.01%增加到0.05%时,卡拉胶添加量对冷冻豆腐的保水性和复水性有协同作用。随着卡拉胶添加量增加,冷冻豆腐的保水性和复水性呈现出显著增加($p < 0.05$)的趋势,继续增加SPI添加量,冷冻豆腐样品的保水性变化不显著($p > 0.05$)。当卡拉胶添加量为0.03%时,冷冻豆腐的保水性和复水性取得最大值分别为26.82%和27.02%。这可能是由于添加可溶性多糖卡拉胶引入了强亲水物质,同时卡拉胶保护二硫键,防止其断裂,抑制蛋白发生解聚^[18],在加热过程中引起分子内闭环作用,形成双螺旋结构,从而产生保水作用^[4]。

2.2 冷冻豆腐的产量、保水性、复水性及耐煮性测定

表3显示了以卤水为凝固剂并添加复配添加剂制备的冷冻豆腐的品质特性,以冷冻豆腐的产量(以

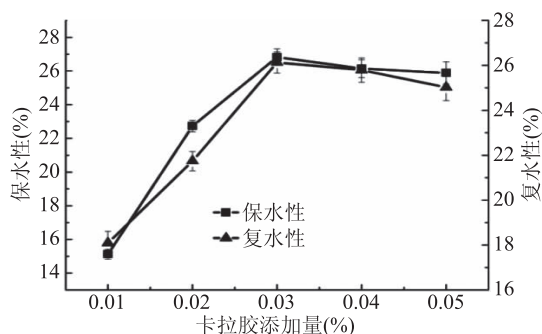


图3 卡拉胶添加量对冷冻豆腐保水性和复水性的影响

Fig.3 Water retention and rehydration of

frozen tofu with different addition of carrageenan

400 mL 熟豆浆计)、保水性、复水性和耐煮性为指标。如表所示,与试验组2号相比,由于添加了SPI-变性淀粉和SPI-卡拉胶复配添加剂,试验组3、4号的冷冻复水豆腐产量、保水性、复水性和耐煮性均表现为显著增加($p > 0.05$),该现象可能是由于SPI与变性淀粉之间的填充作用,首先SPI的加入使豆浆中水溶性蛋白含量增加,高浓度蛋白之间形成复杂的三维网络结构,同时,变性淀粉和卡拉胶引入了强亲水性物质并填充在蛋白三维网络中,保护蛋白二硫键,稳定凝胶的立体结构,提高豆腐的凝胶强度和保水能力。

与试验组6号相比,试验组7号添加变性淀粉-卡拉胶复配添加剂,冷冻豆腐的产量、保水性、复水性和耐煮性均显著($p < 0.05$)增加。分析结果是由于卡拉胶可有效抑制冻融过程对蛋白网络结构的破坏,卡拉胶也可减缓水分的迁移,降低冰晶的生长速度,减弱由于冰晶生长造成的面筋蛋白网络结构的破坏,从而保护蛋白的超微结构,同时变性淀粉起到稳定蛋白三维结构的作用^[19];与试验组8号相比,试验组4号添加了SPI-卡拉胶复配添加剂,冷冻豆腐的产量、保水性、复水性和耐煮性均显著($p < 0.05$)增加。这是由于在高浓度蛋白之间形成复杂的三维网络结构的基础上,卡拉胶可保护二硫键防止断裂,抑制蛋白发生解聚,同时,卡拉胶亲水胶体在高温下锁住更多水分,保持整个凝胶结构,与蛋白形成交联提高结构稳定性。

与其他试验组相比,同时添加SPI-变性淀粉-卡拉胶的试验组的冷冻豆腐产量、保水性、复水性和耐煮性均显著($p < 0.05$)增加。这是由于豆浆中水溶性蛋白含量增加,高浓度蛋白之间形成复杂的三维网络结构,变性淀粉在引入亲水基的同时强化凝胶空间网络结构^[20],增强了凝胶对水分的包容束缚能力增强,同时卡拉胶亲水胶体在高温下锁住更多水分,保持整个凝胶结构,与蛋白形成交联提高结构稳定性^[21-22]。综合各因素分析5号冷冻豆腐样品品质最佳。

2.3 冷冻复水豆腐的感官评定

根据冷冻复水豆腐感官评分求取平均数,绘制图4。如图4所示,与其他试验组相比,试验组5号的综合分值最高,感官评定人员对其认可度最高,冷冻复水豆腐样品的嫩度、多汁性、细腻度和总分显著

表3 冷冻豆腐的产量、保水性、复水性及耐煮性

Table 3 The yield, water retention, rehydration and boiling resistance of frozen tofu

样品编号	产量(g/400 mL)	保水性(%)	复水性(%)	耐煮性(min)
1	70.78 ± 0.08 ^f	14.18 ± 0.13 ^b	17.2 ± 0.23 ^g	6 ± 0.11 ^g
2	76.99 ± 0.10 ^e	22.19 ± 0.29 ^e	25.13 ± 0.31 ^e	12 ± 0.13 ^f
3	80.83 ± 0.15 ^d	23.89 ± 0.58 ^a	29.57 ± 0.27 ^a	13 ± 0.09 ^e
4	100.27 ± 0.03 ^b	22.71 ± 0.11 ^b	28.69 ± 0.35 ^b	17 ± 0.12 ^c
5	105.98 ± 0.11 ^a	21.93 ± 0.37 ^d	18.91 ± 0.19 ^f	22 ± 0.22 ^a
6	81.27 ± 0.17 ^d	18.67 ± 0.17 ^f	19.97 ± 0.21 ^e	14 ± 0.14 ^d
7	98.59 ± 0.23 ^c	20.59 ± 0.13 ^e	19.98 ± 0.28 ^e	18 ± 0.23 ^b
8	81.23 ± 0.43 ^d	16.52 ± 0.15 ^g	21.02 ± 0.43 ^d	13 ± 0.21 ^c

注:同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$),表4同。

增加($p < 0.05$),但对冷冻复水豆腐样品的风味和色泽影响不显著($p > 0.05$)。这是由于添加 SPI-变性淀粉-卡拉胶复配添加剂后,豆浆中水溶性蛋白含量增加,高浓度蛋白之间形成复杂的三维网络结构,卡拉胶具有保护蛋白质分子间二硫键的作用,维持空间网络结构,同时,变性淀粉填充在蛋白质空间网络中,增强凝胶对水分的包容束缚能力增强^[23]。

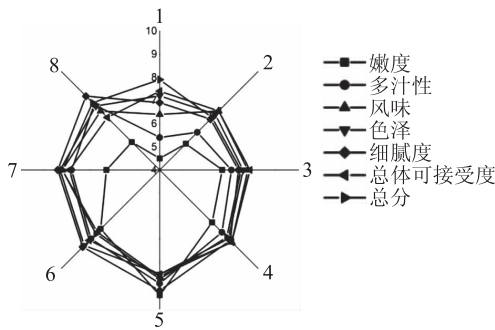


图4 冷冻复水豆腐感官评分

Fig4 The scores of sensory evaluation of frozen tofu

2.4 冷冻复水豆腐质构测定

豆腐的 TPA 测定是确定豆腐品质和消费者可接受性的非常有用的方法。如表 4 所示,复配添加剂条件下冷冻复水豆腐的质构指标变化。结果显示,与其他试验组相比,试验组 5 号的冷冻复水豆腐硬度减小,加入 SPI-变性淀粉-卡拉胶复配添加剂后,冷冻豆腐样品较为松软,表面细腻光滑均匀,适口性增加;试验组 5 号的弹性、粘结性及咀嚼度增大,加入 SPI-变性淀粉-卡拉胶复配添加剂后,在豆浆中高

浓度蛋白形成三维空间网络结构的基础上,变性淀粉填充其中增加蛋白凝胶的保水能力,并通过卡拉胶稳定保护蛋白分子间二硫键被破坏,卡拉胶与蛋白产生络合作用,控制油脂聚附与凝固,加强油脂的分散性,控制油脂与蛋白质的相互作用,从而提高蛋白在受热时的稳定性,使冷冻复水豆腐样品具有较好的适口性。但复配添加剂对冷冻复水豆腐的恢复力和胶粘性变化的影响不显著($p > 0.05$)。综合质构和感官评定分析,添加 SPI-变性淀粉-卡拉胶复配添加剂的试验组 5 号后,冷冻复水豆腐的硬度、弹性、粘结性及适口性较为理想。

2.5 冷冻豆腐的微观结构

图 5 分别显示了在配料中添加复配添加剂制作的冷冻豆腐复水后扫描电子显微镜图像,未加入添加剂的豆腐凝胶表面结构疏松、孔径较大,结构呈现层层叠加的网络结构部分,豆腐凝胶性较弱,口感粗糙与感官评定和质构的结果相一致;与图 5a 相比图 5b、5f、5h 的凝胶结构较为紧密,空隙直径小但分布不均匀,部分略有团簇状现象,网络呈片层状分布,豆腐的凝胶强度略有增加,加入大豆分离蛋白后蛋白浓度提高形成复杂的三维网络结构,淀粉颗粒填充在蛋白凝胶三维网络结构中,结构更加致密;对比图 5b、5f、5h 而言,图 5c、5d、5g 凝胶表面结构呈较为致密的海绵状,孔洞较小且分布较为均匀。卡拉胶和大豆蛋白组分的连续网络形成了双连续的凝胶体系,对凝胶强度起到了一定的增强作用,羟丙基变性淀粉和蛋白产生交联结构作用力增强,卡拉胶和蛋白之间形成大量氢键使结构更加稳定^[24];观察上述

表4 复配添加剂冷冻复水豆腐质构指标

Table 4 Texture index of compound additives frozen rehydration tofu

样品	硬度	弹性	粘结性	咀嚼度	恢复力	胶粘性
冷冻复水豆腐 1	110.435 ± 0.28 ^e	0.921 ± 0.45 ^c	0.706 ± 0.15 ^c	70.783 ± 0.53 ^e	0.354 ± 0.03 ^c	127.799 ± 0.29 ^c
冷冻复水豆腐 2	88.536 ± 0.41 ^f	0.978 ± 0.28 ^b	0.799 ± 0.19 ^a	69.210 ± 0.21 ^e	0.458 ± 0.09 ^a	146.681 ± 0.08 ^a
冷冻复水豆腐 3	174.998 ± 0.34 ^a	0.892 ± 0.13 ^d	0.670 ± 0.09 ^c	104.608 ± 0.23 ^b	0.305 ± 0.19 ^f	130.949 ± 0.24 ^b
冷冻复水豆腐 4	137.336 ± 0.45 ^e	0.858 ± 0.10 ^d	0.681 ± 0.14 ^c	80.257 ± 0.39 ^d	0.307 ± 0.32 ^f	122.767 ± 0.11 ^d
冷冻复水豆腐 5	122.161 ± 0.27 ^d	1.588 ± 0.23 ^a	0.753 ± 0.11 ^b	146.002 ± 0.18 ^a	0.434 ± 0.12 ^b	129.991 ± 0.18 ^b
冷冻复水豆腐 6	119.368 ± 0.48 ^d	0.950 ± 0.17 ^b	0.691 ± 0.11 ^c	78.394 ± 0.09 ^d	0.345 ± 0.14 ^c	122.472 ± 0.09 ^d
冷冻复水豆腐 7	57.200 ± 0.31 ^g	0.777 ± 0.29 ^e	0.488 ± 0.20 ^d	21.674 ± 0.011 ^f	0.363 ± 0.31 ^d	117.273 ± 0.18 ^c
冷冻复水豆腐 8	157.872 ± 0.47 ^b	0.879 ± 0.15 ^d	0.734 ± 0.19 ^b	101.83 ± 0.081 ^c	0.384 ± 0.23 ^c	123.539 ± 0.37 ^d

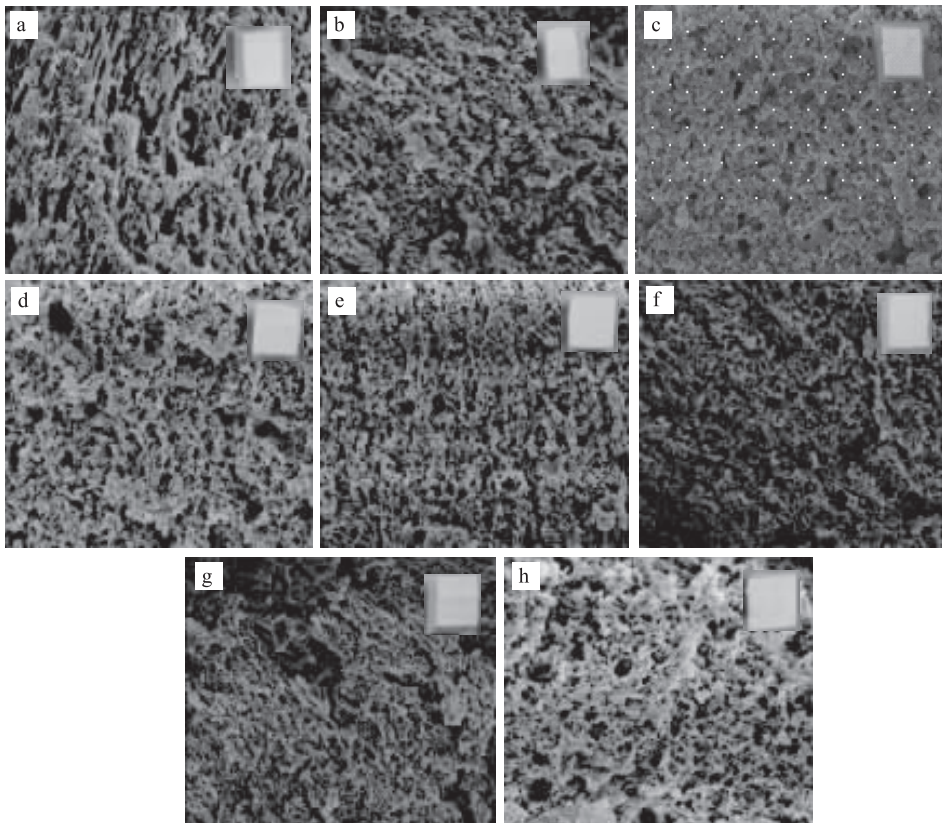


图5 复配添加剂冷冻复水豆腐扫描电子显微镜图像

Fig.5 Compounded additive frozen reconstituted tofu scanning electron microscope image

注:a:对照,b:0.5% wt/wt SPI,c:0.5% wt/wt SPI+0.03% wt/wt 变性淀粉,d:0.5% wt/wt SPI+0.03% wt/wt 卡拉胶,
e:.5% wt/wt SPI+0.03% wt/wt 变性淀粉+0.03% wt/wt 卡拉胶,f:.03% wt/wt 变性淀粉,
g:0.03% wt/wt 变性淀粉+0.03% wt/wt 卡拉胶,h:0.03% wt/wt 卡拉胶。

SEM 图示,图 5e 豆腐凝胶组织的致密程度最高,空隙直径最小且分布均匀,推测:可能是由于大豆分离蛋白、羟丙基变性淀粉和卡拉胶三种添加剂之间产生交互作用,使豆腐凝胶结构更加紧密、均匀^[24-25]。

3 结论

本文基于冷冻豆腐的保水性和复水性指标,通过单因素试验确定大豆分离蛋白、变性淀粉及卡拉胶添加量,同时,阐述了复配添加剂对冷冻豆腐品质、感官评分、质构及微结构的影响。结果显示,当复合添加剂配比为 0.5% 大豆分离蛋白 + 0.03% 变性淀粉 + 0.03% 卡拉胶时,冷冻豆腐具有较好的保水性和复水性,感官评分高,硬度减小,弹性、粘结性及咀嚼度增大,结构较为均匀、紧密。在冷冻豆腐加工过程中,改善冷冻豆腐品质,有利于产品的规模化工业生产。

参考文献

- [1] 马燕,田少君,毛小平,等.冷冻工艺对豆腐品质的影响研究[J].粮食与油脂,2014,27(11):48-51.
- [2] 庞中伟,张泽俊.冷冻豆腐和冷冻干燥豆腐加工[J].食品科学,2004(25):128-130.
- [3] 马燕,田少君.冻方式对冷冻豆腐营养含量的影响研究[J].食品工业,2015,36(10):27-30.
- [4] 李辉尚,李里特,陈明海,等.大豆蛋白质含量对北豆腐得

率和品质的影响[J].粮油食品科技,2005(3):16-18.

- [5] 宁发子,何新益,殷七荣,等.卡拉胶的特性与应用[J].食品工业,2002(3):30-32.
- [6] 朱建华,杨晓泉.卡拉胶/大豆 11S 蛋白共混体系相容性及凝胶性质研究[J].中国粮油学报,2017,27(7):26-31.
- [7] Longtao Zhang, Xuhui Huang, Song Miao b, et al. Influence of ultrasound on the rehydration of dried sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2016, (178) 203-211. DOI:/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.024.
- [8] Ying-Ru Shen, Meng-I.Kuo. Effects of different carrageenan types on the rheological and waterholding properties of tofu [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 78: 122-128. DOI:/10.1016/j.lwt.2016.12.038.
- [9] 张影,刘志明,刘卫,等.酸浆豆腐的工艺研究[J].农产品加工,2014(2):21-23.
- [10] Ce Li, Xin Rui, Yuhui Zhang, et al. Production of tofu by lactic acid bacteria isolated from naturally fermented soy whey and evaluation of its quality [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017(82):227-234. DOI:/10.1016/j.lwt.2017.04.054.
- [11] Feng-Hong Cao, Xing-Jiang Li, Shui-Zhong Luo, et al. Effects of organic acid coagulants on the physical properties and chemical interactions in tofu [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 2017(85):58-65.
- [12] 刘珊,赵谋明,胡坤,等.κ-卡拉胶对大豆分离蛋白乳液 (下转第 107 页)

- [6] Annal, Federica T, Marino N. UV - A light treatment for controlling enzymatic browning of fresh-cut fruits [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2016, 34: 141-147
- [7] 薛楚然. 影响荔枝及荔枝酒酶促褐变的因素及控制研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [8] 鞠志国. 莱阳茺梨细胞中多酚氧化酶的分布及其性质 [J]. *植物生理学通讯*, 1989(3): 33-35.
- [9] Parker T L, Wang X H, Pazmiño J, et al. Antioxidant capacity and phenolic content of grapes, sun-dried raisins, and golden raisins and their effect on ex vivo serum antioxidant capacity [J]. *J Agricultural Food Chemistry*, 2007, 55(21): 8472-7.
- [10] 鞠志国, 朱广廉, 曹宗冀. 莱阳茺梨果实褐变与多酚氧化酶及酚类物质区域化分布的关系 [J]. *植物生理学报*, 1988, 14(4): 356-361.
- [11] 许传俊, 谭茹芳, 陈冬茵, 等. 蝴蝶兰叶外植体发生褐变超微结构和酚类物质分布观察 [J]. *北方园艺*, 2010(21): 90-92.
- [12] 李桂峰. 苹果果肉褐变中细胞超微结构和氧化酶活性的变化 [C]. *Proceedings of 2010 First International Conference on Cellular, Molecular Biology, Biophysics and Bioengineering*, 2010.
- [13] 刘峰娟, 冯作山, 孟阳, 等. 脱水速度对‘无核白’葡萄果皮褐变和细胞超微结构的影响 [J]. *食品科学*, 2016, 37(6): 220-225.
- [14] 刘峰娟, 孟阳, 白羽嘉, 等. 快速脱水抑制葡萄干制过程中膜脂过氧化及褐变 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(17): 285-294.
- [15] 林河通, 陈绍军, 席玛芳, 等. 龙眼果皮微细结构的扫描电镜观察及其与果实耐贮性的关系 [J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3): 95-99.
- [16] 林河通, 席玛芳, 陈绍军. 龙眼果实采后失水果皮褐变与活性氧及酚类代谢的关系 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2005, 31(3): 287-297.
- [17] Coles J A, Pipe R K. Phenoloxidase activity in the haemolymph and haemocytes of the marine mussel *Mytilus edulis* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 1994, 4(5): 337-352.
- [18] 孙静秋. 南美白对虾五种同工酶的研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2008.
- [19] W C Mueller, A D Greenwood. The Ultrastructure of phenolic-storing cells fixed with caffeine [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1978, 29(110): 757-764.
- [20] Stefanowska M, Kuraś M, Kacperska A. Low temperature-induced modifications in cell ultrastructure and localization of phenolics in winter oilseed rape (*Brassica napus L. var. oleifera L.*) leaves [J]. *Annals of Botany*, 2002, 90(5): 637-645.
- [21] Sukhonthara S, Kaewka K, Theerakulkait C. Inhibitory effect of rice bran extracts and its phenolic compounds on polyphenol oxidase activity and browning in potato and apple puree [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 922-927.
- [22] 刘芳. 苹果膜结合态多酚氧化酶分离纯化及性质研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [23] 张利娟, 师俊玲. 无核白葡萄热风干燥过程中总酚与抗氧化活性的变化 [J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 55-59.
- (上接第 98 页)
- 凝胶特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2003(11): 10-13.
- [13] 刘志胜, 李里特, 辰巴英三. 豆腐盐类凝固剂的凝固特性与作用机理的研究 [J]. *中国粮油学报*, 2000, 15(3): 39-42.
- [14] Meng S, Chang S, Gillen A M, et al. Protein and quality analyses of accessions from the USDA soybean germplasm collection for tofu production [J]. *Food Chemistry*, 2016, 213: 31. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2010.10.001.
- [15] Chiung-Yuan Lee, Meng-I Kuo. Effect of γ -polyglutamate on the rheological properties and microstructure of tofu [J]. 2010, (25): 1034-1040. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2010.10.001.
- [16] 陈振家, 施小迪, 杜昱蒙, 等. 不同热处理大豆分离蛋白凝胶冻藏特性 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 283-289.
- [17] 庞中伟, 张泽俊. 冷冻豆腐和冷冻干燥豆腐加工 [J]. *食品科学*, 2004, 25(s1): 128-130.
- [18] 汪星星, 余小林, 胡卓炎, 等. 冻融冻藏中卡拉胶对面筋蛋白分子量及超微结构的影响 [J]. *食品工业科技*, 2016, 37(12): 89-93.
- [19] Zhao L, Li L, Liu G Q, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the molecular weight and size distribution of gluten [J]. *Food Research International*, 2013, 53(1): 409-416.
- [20] 卞君杰. TG 酶对蛋白乳化特性的影响及在肌原纤维蛋白复合凝胶中的作用 [D]. 扬州大学, 2016, 36-51.
- [21] Ying-Ru Shen, Meng-I Kuo. Effects of different carrageenan types on the rheological and water-holding properties of tofu [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 78: 122-128. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.12.038.
- [22] Xiaofeng Xia, Mandour Abdalhai, Matabaro Emmanuel, et al. Texture, rheological properties and microstructure of soy protein gels coagulated by CaSO_4 and the effect of soybean soluble polysaccharide on the gel performance [J]. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2015, 6(1): 117-121.
- [23] Linlaud N, Rerrer E, Puppo M C, et al. Hydrocolloid interaction with water, protein and starch in wheat dough [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59: 713-719.
- [24] Chuan-He Tang. Effect of thermal pretreatment of raw soymilk on the gel strength and microstructure of tofu induced by microbial transglutaminase [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2006, 40: 1403-1409. DOI: 10.1016/j.lwt.2006.09.006.
- [25] Yangzi Xu, Yukun Tao, Satya Shivkumar. Effect of freeze-thaw treatment on the structure and texture of soft and firm tofu [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 190(2016): 116-122.