



不同凝固剂形成豆腐凝胶特性研究

田 亚¹, 李 丹¹, 胡 萍¹, 王 电², 谭 华³

(1. 贵州大学 酿酒与食品工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵阳市食品工业协会, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州龙缘盛豆业有限公司, 贵州 龙里 551200)

摘要:为研究不同凝固剂生产的豆腐凝胶特性的差异,以单一凝固剂(酸浆、硫酸钙、氯化镁)及复合凝固剂(酸浆复配硫酸钙)分别制备豆腐凝胶,研究不同凝固剂对形成的豆腐凝胶 pH、凝胶强度和持水力的影响,并比较豆腐凝胶的微观结构,探究复配凝固剂对豆腐形成凝胶特性的影响。结果表明:随着不同凝固剂添加量的增加,豆腐凝胶 pH 均呈现下降趋势,但下降速率有所不同;不同凝固剂制备的豆腐凝胶凝固速率不同,凝固速率氯化镁 > 硫酸钙,而复配凝固剂凝固速率先慢后快;单一凝固剂随添加量的增大,凝胶强度和持水力先增大后减小;复配凝固剂制作的豆腐凝胶三维结构稳定,蛋白分子交联度较高,凝胶网络间孔隙分布均匀,其微观结构优于单一凝固剂制备的豆腐凝胶。

关键词:凝固剂;豆腐;凝胶特性;差异化

Study on the Characteristics of Tofu Gels Formed by Different Coagulant

TIAN Ya¹, LI Dan¹, HU Ping¹, WANG Dian², TAN Hua³

(1. College of Liquor & Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. The Guiyang Industrial and Information Commission, Guiyang 550081, China; 3. Guizhou Long Yuan Sheng Bean Industry Co. Ltd, Longli 551200, China)

Abstract: The study aims at the differentiation of tofu produced with different coagulants. The tofu gel was prepared by single coagulant (acid pulp, calcium sulfate, magnesium chloride) and compound coagulant (sour calcium sulfate) respectively, and then the impact of different coagulant on the pH, gel strength and water holding of the tofu gel were researched. Meanwhile, the microstructures of tofu gel were compared, and the effect of compound coagulants on the tofu gel properties was studied. The results showed that the pH of tofu gel showed a downward trend with the addition of different coagulants, but the rate of decline were different. The solidification rate of tofu gel produced by different coagulants were different, the solidification rate of magnesium chloride > calcium sulfate, solidification rate of the compound coagulant was slowly first and then faster. The gel strength and the water holding power showed first increase and then decrease with the adding amount of single coagulant increasing. The tofu gel prepared by compound coagulant has stable three-dimensional structure, higher degree of cross linking of protein molecule, homogeneous distribution pore between gel network of which the microstructure was better than that of tofu gel prepared by single coagulant.

Keywords: Coagulant; Tofu; Gel properties; Differentiation

大豆凝胶的形成是指在一定条件下,体系中大豆蛋白分子相互作用形成初级聚集体,初级聚集体间相互作用形成大颗粒的絮状体结构,进一步交联成三维网络结构的过程^[1]。豆腐凝胶是凝固剂作用于大豆蛋白分子后使蛋白分子大量聚集而形成的具有三维网状结构的蛋白凝胶产品^[2]。凝固剂的种类及添加量直接影响所形成豆腐的凝胶特性,最终影响产品品质。目前,豆腐生产中所使用的凝固剂包括盐类、酸类、酶类及复合凝固剂。盐类凝固剂主要有氯化镁、硫酸镁、氯化钙、硫酸钙等。酸

类有葡萄糖酸内酯、发酵酸浆等。酶类有木瓜蛋白酶、转谷氨酰胺酶等。复合凝固剂包括盐类与盐类复配,盐类与酸类复配等^[3]。近年来,众多科研者研究了大豆蛋白凝胶的形成机理,考察了大豆蛋白浓度、凝固剂浓度、凝固温度和时间对形成的凝胶质构的影响^[4]。于翠柳的研究^[5]发现通过对凝胶进行质构和扫描电镜分析,发现盐卤、葡萄糖酸内酯、转谷氨酰胺酶的浓度分别为 0.70%、0.06 mol·L⁻¹、40 U·(g·pro)⁻¹时,凝胶的硬度最大、网孔最多。孔小鲁等^[6]的研究则是从动力学的角度入手,结合豆

收稿日期:2018-05-01

基金项目:贵州省农业攻关项目(黔科合 NY[2014]3009 号)。

第一作者简介:田亚(1995-),男,硕士,主要从事食品营养与安全研究。E-mail:1051274939@qq.com。

通讯作者:胡萍(1970-),女,教授,博士,主要从事食品营养与安全研究。E-mail:phu1@gzu.edu.cn。

腐凝胶微观结构,认为石膏豆腐的凝胶结构与凝固剂含量、加热温度等因素密切相关。但上述研究仅针对单一型凝固剂豆腐凝胶结构,并未对复合型凝固剂的豆腐凝胶结构进行研究。高丽^[7]的研究认为大豆球蛋白凝胶的微观网络结构具有较高的有序性,虽然他的研究涉及到复合型凝固剂,但并未对单一型凝固剂与复合型凝固剂制备的豆腐凝胶结构进行比较。

因此,本研究以酸浆、硫酸钙、氯化镁及酸浆加硫酸钙的复合凝固剂分别制备豆腐凝胶,探究不同凝固剂对豆腐凝胶 pH、凝胶强度和凝胶持水力的影响,并观察不同凝固剂凝胶的微观结构。从另一个侧面考察豆腐生产中复配凝固剂(酸浆与硫酸钙)优于单一凝固剂(酸浆、硫酸钙及氯化镁)的原因,旨在为豆腐生产凝固剂的选择提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

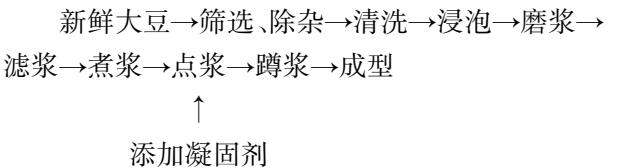
1.1.1 材料与试剂 供试材料为新鲜的优质东北大豆;新鲜黄浆水由贵州芳馨豆业有限公司提供;乳酸菌为实验室分离自贵州苗族酸汤中的两株乳酸菌 H1 (*Lactobacillus casei*, CCTCC: M2016524) 和 H3 (*Lactobacillus rhamnosus*, CCTCC: M2016525)。

硫酸钙(郑州长乐食品科技有限公司);氯化镁(青海铁源镁业有限责任公司);消泡剂(广州市中万新材料有限公司)。

1.1.2 仪器与设备 FA2004W 分析天平(上海菁海仪器有限公司);JY1002 称量天平(上海浦春计量仪器有限公司);101-2A 电热恒温鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器设备有限公司);PHSJ-3F 型 pH 计(雷磁电子仪器制造);TGL20M 离心机(长沙迈佳森仪器设备有限公司);CT-3 质构仪(美国 Brookfield(博勒飞));S-3400N 扫描电子显微镜(日本 HitaChi)。

1.2 方法

1.2.1 豆腐凝胶制作工艺流程及操作要点



筛选新鲜黄豆,除去霉变、干瘪颗粒,除杂后清洗 2~3 次;将大豆置于容器内,放入大豆干重 2~3 倍的水浸泡 6~7 h 后滤干待用;磨浆、滤浆,加水用豆浆机研磨 2~3 次后过滤出豆渣,豆浆待用;煮浆,

将研磨好的豆浆加热至 80℃ 时加入消泡剂,继续加热并不断搅动,防止豆浆糊底,直至豆浆沸腾;点浆,将加水兑好的凝固剂缓慢加入热豆浆中;蹲浆,蹲浆 10~15 min,使豆腐凝胶慢慢形成;然后取出已成型的豆腐凝胶测定凝胶 pH、凝胶持水力、凝胶强度并观察其微观结构^[8]。

1.2.2 试验设计

(1)单一凝固剂试验

分别添加 37%、39%、41%、43% 的酸浆凝固剂,4.0%、4.2%、4.4%、4.6% 的硫酸钙凝固剂,1.4%、1.6%、1.8%、2.0% 的氯化镁凝固剂,制作豆腐凝胶,对制作的豆腐凝胶进行 pH、持水力和凝胶强度的测定。(百分比均为所占大豆干重的百分比,下同)。

其中酸浆利用实验室前期从贵州苗族发酵酸汤中分离得到的产酸能力强,且具有抗氧化活性的乳酸菌 H1 和 H3 各 1 株发酵黄浆水制作而成:分别将保存于 4℃ 条件的菌种接种在 MRS 液体培养基上,37℃,培养 24 h,连续传代 3~5 次,备用。黄浆水在 95℃ 下杀菌 15 min,冷却至 42℃,备用。从活化好的 MRS 液体中分别取两株乳酸菌菌液,按发酵黄浆水体积的 6% (H1:H3 比为 1:1),注入已冷却至 45℃ 的黄浆水中,另添加 5% 糯米粉,在 40℃ 条件下发酵 21 h,即得到 pH3.38 的发酵酸浆。

(2)复配凝固剂试验

预试验得出:酸浆与硫酸钙复配,配比为 17.0% 酸浆+3.0% 硫酸钙,制作的豆腐保水性、出品率及感官评分最佳,本试验分别添加 12%、14%、16%、18% 的复配凝固剂(酸浆加硫酸钙复配,配比为 17.0% 酸浆+3.0% 硫酸钙)制作豆腐凝胶,对制作的豆腐凝胶进行 pH、持水力和凝胶强度的测定。

1.2.3 豆腐凝胶特性测定

(1)凝胶 pH 测定

精确称取 2 g 豆腐凝胶,将凝胶用玻璃棒捣碎,然后加入 30 mL 蒸馏水,搅拌混匀,用 pH 计测定凝胶 pH^[9]。

(2)凝胶持水力测定

准备数支离心管,将其编号,准确称取各空管及相应盖子的质量(m_0),将豆腐凝胶样品放入离心管中(称取 1~2 g),准确称取各管样品总质量(m_1),使用离心机以 3 000 r·min⁻¹ 转速离心 15 min 后,小心用吸水纸去除管中多余水分,再次称量离心管及剩余残物的质量(m_2),每个样品做 3 次

重复^[10]。

持水力(%) = [1 - (m₁ - m₂) / (m₁ - m₀)] × 100

(3) 凝胶强度测定

将豆腐凝胶样品处理为 15 mm (D) × 20 mm (L) 圆柱体,用质构仪采用 TPA 模式进行测定,使用 TA5 (D = 12.7 mm, L = 35 mm) 探头,夹具为 TA-RT-KIT,探头下行速度为 3.0 mm · s⁻¹,运行速度 3.0 mm · s⁻¹,穿刺距离 10.0 mm,负载 5.0 g。选取凝胶不同部位测定 3 次^[11]。

(4) 凝胶微观结构观察

根据单一凝固剂试验及复配凝固剂试验所确定的最佳凝固剂添加量进行豆腐凝胶电镜扫描试验。参照于翠柳^[5]方法,有改动。

大豆蛋白凝胶的固定和干燥:将豆腐凝胶切成小长条,在 2.5% 戊二醛固定剂溶液中 4℃ 下浸泡 24 h;然后用 pH7.2 的磷酸盐缓冲液清洗 3 次,每次 10 min;再用体积分数为 50%、70%、90%、100% 的乙醇梯度脱水,每种浓度的乙醇各处理 10 ~ 15 min。经脱水后将豆腐凝胶在临界点干燥仪中干燥 1 h。

扫描电镜观察:干燥后的凝胶置于液氮中脆

断,处理好后贴在金属样品台上,断裂面向上,采用离子溅射方法镀金,镀金条件为 15 kV、15 mA、1.5 min,然后将样品置于扫描电子显微镜下,在不同倍率条件下观察其微观结构。

1.3 数据分析

试验数据应用 Origin Pro 75 进行数据作图。

2 结果与分析

2.1 不同凝固剂对凝胶 pH 的影响

由图 1 可知:随着不同凝固剂添加量的增加,豆腐凝胶 pH 均呈现下降趋势。酸浆加入熟豆浆后,解离出的氢离子与呈弱酸性的蛋白负离子结合,使体系 pH 逐渐下降,大豆蛋白粒子出现胶凝作用,通过氢键及疏水相互作用等聚集形成稳定的交联网络^[12];钙盐离子和镁盐离子的加入不断屏蔽了蛋白质之间的负电,导致蛋白分子之间净电荷值和力的变化,使豆腐凝胶 pH 降低并在大豆蛋白等电点附近聚集^[7]。但在凝固剂加入的起始阶段,氯化镁引起的凝胶 pH 下降速率明显高于硫酸钙。根据刘志胜等^[13]腐凝固剂凝固机理和作用特性的研究可知:豆腐凝胶的 pH 降低程度决定蛋白质的凝固速率,

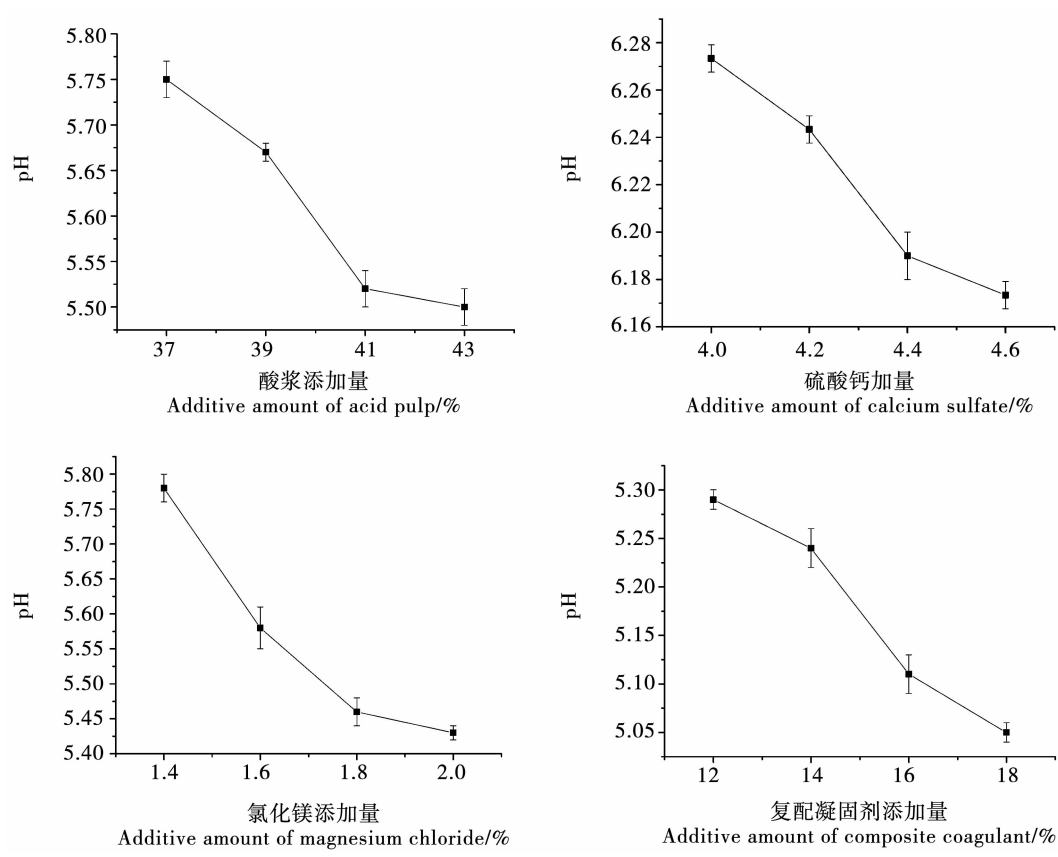


图 1 不同凝固剂添加量对豆腐凝胶 pH 的影响

Fig. 1 Effect of different coagulant additive amount on pH of tofu get

pH 下降速率越快,蛋白质凝固速率越快。因此可以推断,凝固速率表现为:氯化镁 > 硫酸钙,而复配凝固的剂凝固速率先慢后快。当复配凝固剂添加量为 12% ~ 14% 时,凝胶 pH 下降速率较慢,这可能是由于复配凝固剂中酸浆逐步解离出氢离子和酸根离子,硫酸钙也逐步解离出钙盐离子,在逐步解离的过程中,只有少量负电荷的蛋白分子能与氢离子和盐离子结合,因此蛋白胶凝作用缓慢;当添加量

高于 14% 时,此时解离出的氢离子和盐离子共同发挥作用,共同影响蛋白分子间净电荷值和力的变化,pH 逐渐降至大豆蛋白等电点,使蛋白分子形成稳定的三维网络结构^[14-15]。

2.2 不同凝固剂对凝胶持水力和凝胶强度的影响

由图 2 可知,单一凝固剂随添加量的增大,凝胶强度和持水力呈相同的变化趋势,即先增大后减小。

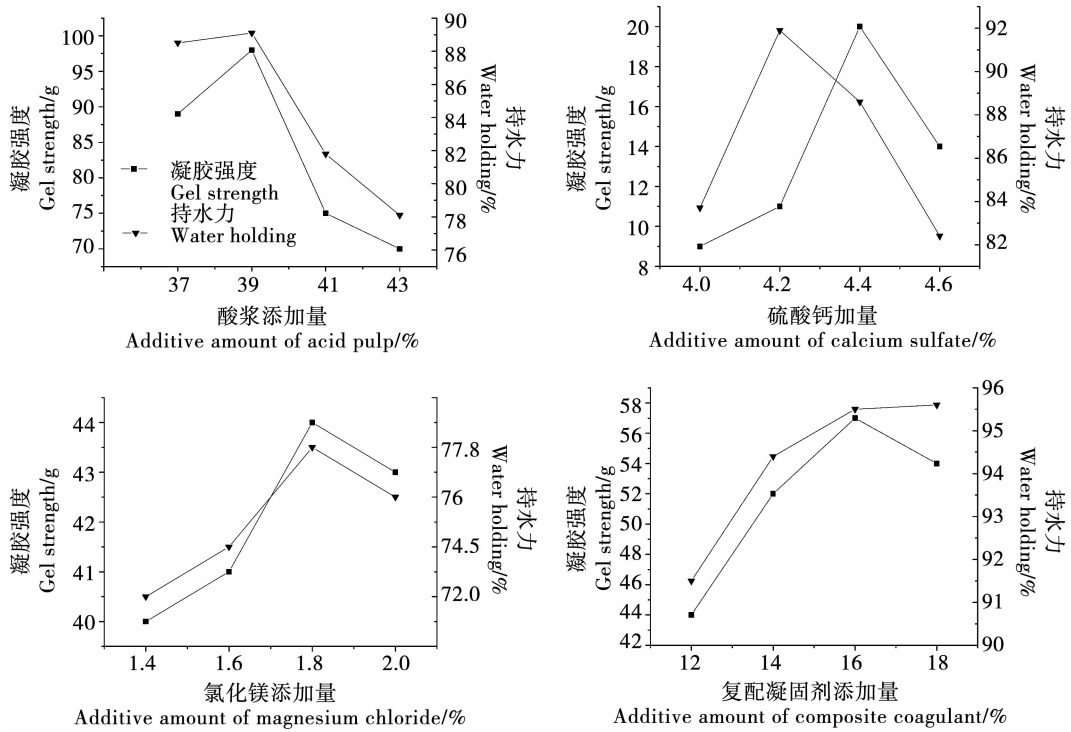


图 2 不同凝固剂添加量对豆腐凝胶持水力和凝胶强度的影响

Fig. 2 Effect of different coagulant additive amount on strength and water holding of tofu gel

当酸浆添加量在 37% ~ 39% 时,豆腐凝胶强度与持水力呈共同增大趋势;但当添加量高于 39% 时,凝胶强度与持水力均减小。因为当酸浆添加量过高时,酸浆大量解离出氢离子,使离子之间的静电斥力增大,破坏了原有的凝胶网络结构,使凝胶之间孔隙增大,大量水分被排出,凝胶强度减小,持水力也降低^[16]。因此,确定 39% 的酸浆添加量为最佳添加量。

当硫酸钙添加量为 4.4% 时豆腐凝胶强度达到最大值;当添加量为 4.2% 时凝胶持水力达到最大。因此,确定 4.2% 的硫酸钙添加量为最佳添加量。

随着氯化镁添加量的增大,体系 pH 降低,逐渐达到大豆蛋白等电点,促使蛋白沉积,凝胶网络结构逐步完善,凝胶强度增大,持水力增强^[17];当氯化镁添加量为 1.8% 时,凝胶强度和持水力达到最大

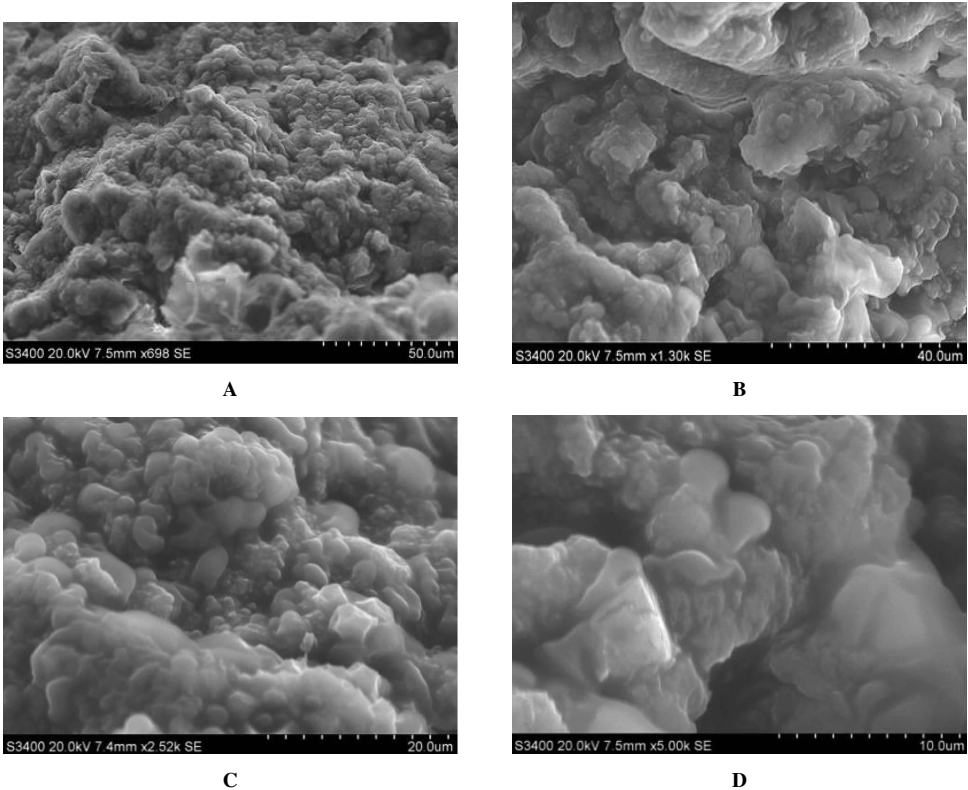
值。而过量的镁盐离子会大量屏蔽蛋白分子间的负电,使静电斥力减小,蛋白分子间的疏水相互作用和氢键占据优势,促使大豆蛋白快速聚集,凝胶扎堆结合,凝胶之间孔隙较大,无法截留水分,因此凝胶强度与持水力都减小^[18]。因此,确定 1.8% 的硫酸钙添加量为最佳添加量。

在复配凝固剂添加量由 12% 增至 16% 过程中,凝胶强度和持水力同时增大;当添加量高于 16% 时,凝胶强度有所降低,持水力基本保持不变。因此,确定 16% 的复配凝固剂添加量为最佳添加量。

2.3 不同凝固剂豆腐凝胶扫描电镜观察

2.3.1 酸浆凝固剂

图 3 是 39% 酸浆制备的豆腐凝胶在不同电镜倍率下的扫描图,以单一酸浆作凝固剂制作的豆腐,凝胶表面粗糙,内部网状结构粗壮且不均匀,聚集体尺寸较大。



A ~ D 分别为放大 600,1000,2500 和 5000 倍。下同。
A-D mean magnified 600,1000,2500 and 5000 times respectively. The same as below.

图 3 酸浆豆腐电镜图

Fig. 3 Acid pulp tofu under electron microscopy

2.3.2 硫酸钙凝固剂 图 4 是 4.4% 硫酸钙制备的豆腐凝胶在不同电镜倍率下的扫描图,以单一硫酸钙作凝固剂制作的豆腐,凝胶聚集体尺寸较酸浆凝固剂

的小,凝胶内部结构也相对规律,但凝胶网络结构之间网孔大小不一且分布不均,这也解释了使用 4.4% 硫酸钙制备豆腐时持水力开始下降的原因。

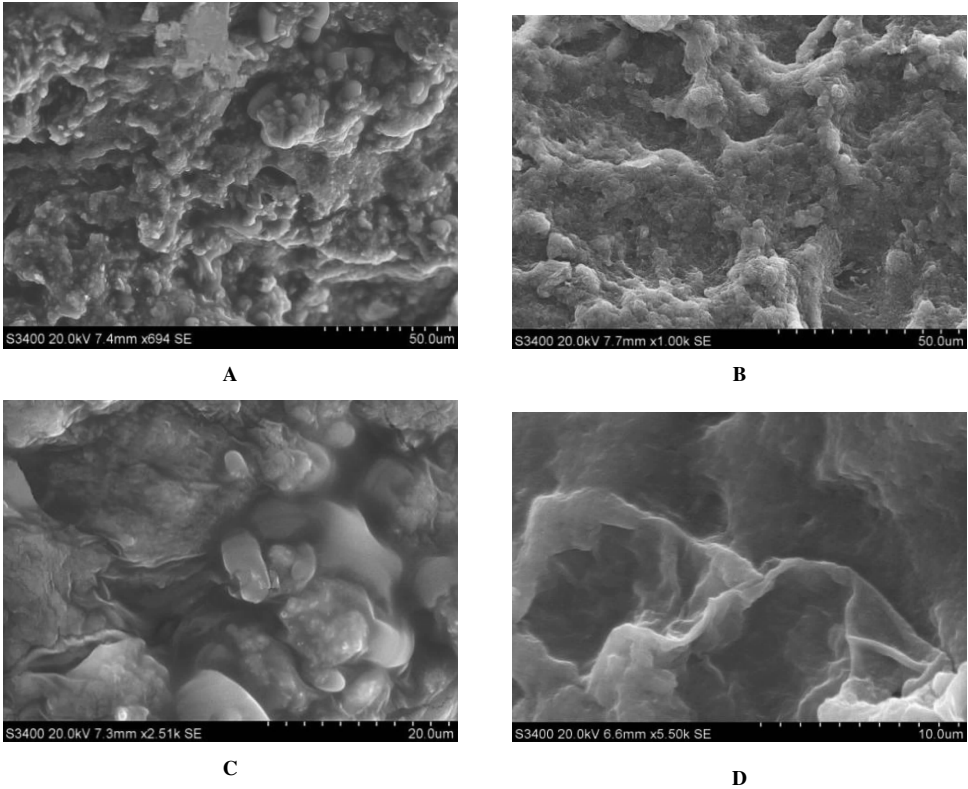


图 4 硫酸钙豆腐电镜图
Fig. 4 Calcium sulphate tofu under electron microscopy

2.3.3 氯化镁凝固剂 图5是1.8%氯化镁制备的豆腐凝胶在不同电镜倍率下的扫描图,单一氯化镁作凝固剂制备的豆腐凝胶,蛋白分子间的交联度

较高,凝胶网络结构完整且规律,凝胶结构较细腻,但凝胶网络之间孔隙较多,大小不一。

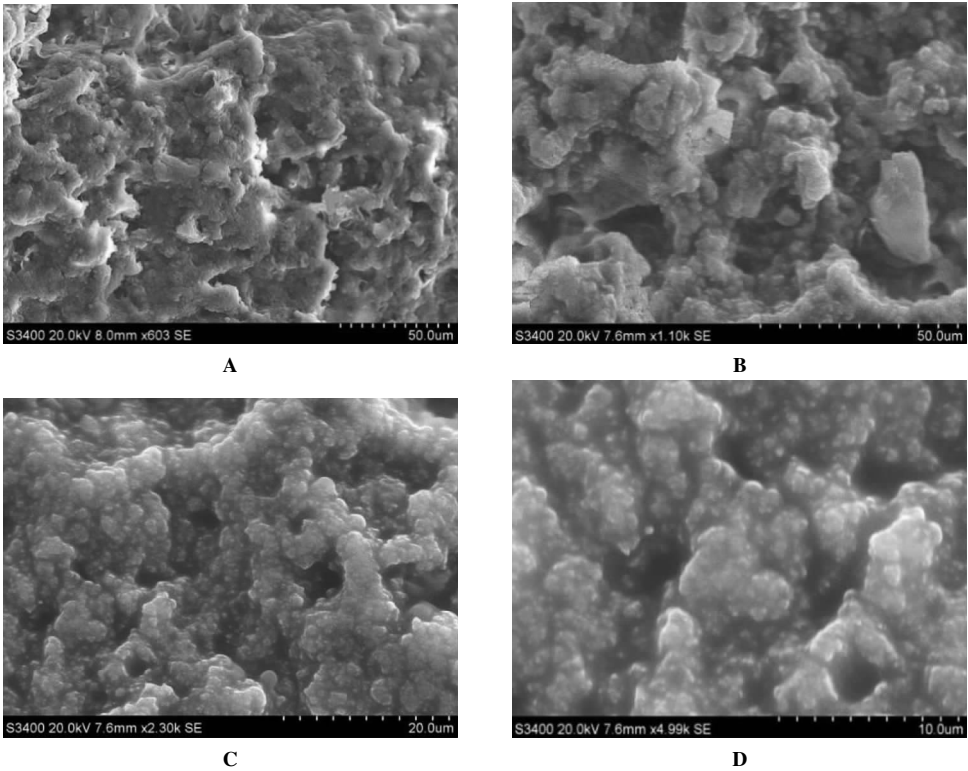


图5 氯化镁豆腐电镜图

Fig. 5 Magnesium chloride tofu under electron microscopy

2.3.4 复合凝固剂 图6是16%复配凝固剂制备的豆腐凝胶在不同电镜倍率下的扫描图,复配凝固剂制备的豆腐凝胶,蛋白质分子之间交联程度高,

形成的蛋白凝胶结构细腻且规律,凝胶网络均匀致密,无较大空隙。

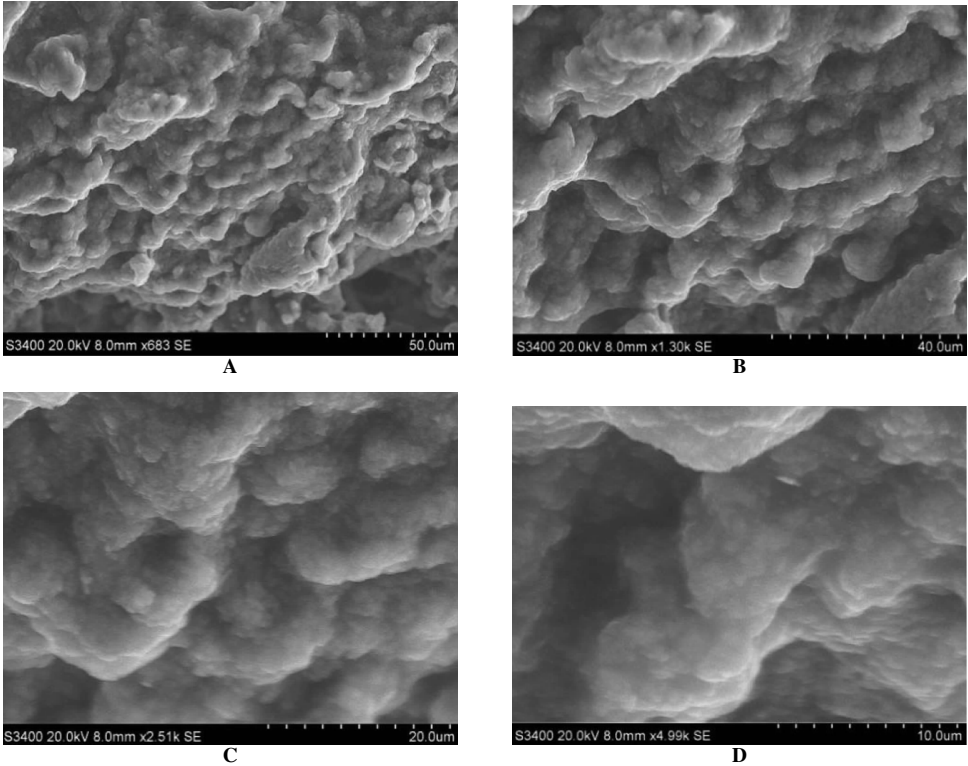


图6 复配凝固剂豆腐电镜图

Fig6 The recombination coagulator tofu under electron microscopy

综合分析单一凝固剂和复配凝固剂制备的豆腐凝胶的扫描电镜图显示:复配凝固剂制备的豆腐凝胶,凝胶结构稳定且规律,蛋白分子结合度高,凝胶网络之间孔隙较少,结构优于单一凝固剂制备的凝胶。

3 讨论

本研究中由酸浆制成的豆腐所形成的豆腐凝胶表面粗糙,内部网状结构粗壮且不均匀,聚集体尺寸较大。这使得豆腐的强度和硬度低,缺乏弹性和韧性,解释了酸浆易碎散的特性,同时也印证了酸性豆腐的形成机理。

由硫酸钙制成的豆腐所形成的豆腐凝胶聚集体尺寸较酸浆凝固剂更小,凝胶内部结构也相对规律,但凝胶网络结构之间网孔大小不一且分布不均,这与孔小鲁等^[6]的研究结果相近。随着硫酸钙添加量的增加,豆腐凝胶强度及凝胶持水力均呈现先增大后减小的趋势,但变化的峰值不同,前者在硫酸钙 4.4% 时开始减少,后者在硫酸钙 4.2% 时开始减少,Cai 等^[19]认为不断增大的钙盐离子浓度会逐渐屏蔽蛋白质之间的负电,使静电斥力减弱,蛋白分子间的斥力和引力相互平衡,促使蛋白质聚集成形成有序的网络,此时凝胶强度最大,凝胶持水力较强,而刘德阳^[1]的研究表明过量的钙盐离子又会增大离子间的静电斥力,破坏原本完整有序的凝胶结构网络,使凝胶强度降低,持水力明显减弱,结合两者的研究,有可能 4.4% 和 4.2% 是生产石膏豆腐硫酸钙的关键值。

由氯化钙制成的豆腐所形成的豆腐凝胶蛋白分子间的交联度较高,凝胶网络结构完整且规律,凝胶结构较细腻,但凝胶网络之间孔隙较多,大小不一,在凝固剂加入的起始阶段,氯化镁引起的凝胶 pH 下降速率明显高于硫酸钙,推断添加氯化镁凝固剂形成的豆腐凝胶凝固速率快于添加硫酸钙凝固剂的豆腐凝胶凝固速率。

由复合凝固剂(酸浆复合硫酸钙)制成的豆腐所形成的豆腐凝胶蛋白质分子之间交联程度高,形成的蛋白凝胶结构细腻且规律,凝胶网络均匀致密,无较大空隙,结构优于单一型凝固剂。郑立红^[20]的研究认为酸浆与硫酸钙解离出的氢离子和盐离子共同屏蔽了蛋白之间的负电,使静电斥力减弱,蛋白之间达到力的平衡,逐渐聚集形成有序的三维网状凝胶,使得复合凝固剂制成的豆腐具有较好的凝胶特性,而 Ke 等^[21]的研究表明过量的氢离子和盐离子也会使蛋白之间的静电斥力过大,造成蛋白间力的平衡被破坏,凝胶网状结构变形,凝胶

强度降低,所以 16% 的添加量是形成较好豆腐凝胶结构的关键值,而凝胶持水力保持不变不再减小的原因可能是复配凝固剂中硫酸钙的添加有增强豆腐保水性功能的缘故。

4 结论

不同凝固剂引起的豆腐凝胶 pH 不同,豆腐凝胶 pH 降低程度决定蛋白质的凝固速率,pH 下降速率越快,凝固速率越快;凝固速率表现为氯化镁 > 硫酸钙,而酸浆复配硫酸钙凝固速率先慢后快;在试验选取的凝固剂添加量范围内,随凝固剂添加量的增加,凝胶强度和持水力呈先增大后减小的相同变化趋势;复配凝固剂制作的豆腐凝胶相比单一凝固剂凝胶结构稳定性好、蛋白交联度高、凝胶孔隙大小分布均匀。本研究对比分析了单一凝固剂和复配凝固剂制作豆腐凝胶结构的区别,解释了复配凝固剂优于单一凝固剂的原因,不仅能够为豆腐生产凝固剂的选择提供理论依据,同时为豆腐生产时产生的黄浆水提供了新的解决途径,具有实际应用价值。

参考文献

- [1] 刘德阳. 盐离子对大豆分离蛋白凝胶特性和微结构影响研究[D]. 无锡:江南大学,2015:5-18. (Liu D Y. Effect of salt ion on gel properties and microstructure of soy protein isolate[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015:5-18.)
- [2] 刘志胜. 豆腐凝胶的研究[D]. 北京:中国农业大学,2000:1-12. (Liu Z S. Study on tofu gel[D]. Beijing:China Agricultural University, 2000:1-12.)
- [3] 于寒松,张岚,王玉华,等. 传统食用豆制品加工现状及发展趋势[J]. 粮油加工(电子版),2015(3):40-45. (Yu H S, Zhang H, Wang Y H, et al. Processing status and development trend of traditional edible bean products[J]. Grain and Oil Processing(Electronic Edition), 2015(3):40-45.)
- [4] 李里特,刘志胜,辰巳英三. 加工条件对豆腐凝胶物性品质的影响[J]. 食品科学,2000,21(5):26-29. (Li L T, Liu Z S, Chen Si Y S. Effect of processing conditions on the properties of tofu gel properties[J]. Food Science,2000,21(5):26-29.)
- [5] 于翠柳. 大豆蛋白凝胶显微结构的研究[D]. 天津:天津科技大学,2012:19-20. (Yu C L, Study on the microstructure of soybean protein gel [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2012:19-20.)
- [6] 孙小鲁,顾振宇,杨玥熹. 石膏豆腐凝胶特性的研究[J]. 现代食品科技,2017(3):133-138. (Sun X L, Gu Z Y, Yang Y X. Study on gel properties of gypsum tofu[J]. Modern Food Science & Technology, 2017(3):133-138.)
- [7] 高丽. 大豆蛋白的凝胶特性及其应用[D]. 武汉:华中农业大学,2007:32-39. (Gao L. Gel properties of soybean protein and its application [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007:32-39.)

[8] 白玉敏. 全豆营养豆腐工艺的研究[D]. 成都: 西华大学, 2013. (Bai Y M. Research on the whole bean nutritious tofu process[D]. Chengdu:Xihua University, 2013.)

[9] 张芳. 大豆油对大豆蛋白凝胶特性及其微结构的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2013;17-19. (Zhang F. Effects of soybean oil on soybean protein gel properties and microstructure [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013;17-19.)

[10] 张琦. 大豆干酪加工技术研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012;56-69 . (Zhang Q. Research on processing technology of soybean cheese [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012;56-69.)

[11] 刘灵飞, 徐婧婷, 施小迪, 等. 无浸泡制浆法对豆乳及豆腐品质特性的影响研究[J]. 大豆科技, 2015(5): 37-42. (Liu L F,Xu J T,Shi X D, et al. Effect of non-soaking pulp on quality characteristics of soymilk and tofu[J]. Soybean Science and Technology, 2015(5): 37-42.)

[12] 刘志胜,李里特,辰巳英三. 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. (Liu Z S,Li L T,Chen Si Y S. Research on the coagulation characteristics and mechanism of coagulant of tofu salt[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2000, 15(3): 39-42.)

[13] Ikehata H, Wakaizumi M, Murata K. Antioxidant and antihemolytic activity of a new isoflavone, ‘factor 2’ isolated from tempeh [J]. Agricultural & Biological Chemistry, 1968, 32(6): 740-746.

[14] Hu H, Wu J H, Li-Chan E C Y, et al. Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(2): 647-655.

[15] Schuldt S,Raak N,Jarost D,et al. Acid-Induced formation of soy protein gels in the presence of NaCl[J]. LWT- Food Science and Technology,2014,57(2): 634-639.

[16] 王玉娇,陈晓红,李伟,等. 青梅汁酸凝豆腐质构优化及显微结构分析[J]. 食品科学, 2014, 35(6): 40-43. (Wang Y J, Chen H W,Li W,et al. Texture optimization and microstructure analysis of green melon curd coated tofu [J]. Food Science, 2014, 35(6): 40-43.)

[17] 钟芳,王璋,许时婴. 大豆蛋白速凝特性研究--I 热处理条件对大豆蛋白速凝特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2001, 16(4): 47-50. (Zhong F, Wang Z, Xu S Y. Study on the quick-setting characteristics of soybean protein--I. Effect of heat treatment conditions on the quick-setting characteristics of soybean protein[J]. Journal of Chinese Grain and Oil, 2001, 16(4): 47-50.)

[18] 田少君,何有缘,谈天. 不同因素对 CaCl₂ 透析诱导大豆分离蛋白冷凝胶特性的影响[J]. 中国油脂, 2007, 32(3): 22-25. (Tian S J, He Y Y, Tan T. Effects of different factors on the characteristics of cold gelation of soybean protein isolate induced by CaCl₂ dialysis[J]. China Oil Engineering, 2007, 32(3): 22-25.)

[19] Cai T D,Chang K C. Processing effect on soybean storage proteins and their relationship with tofu quality [J]. Journal Agriculture Food Chemistry,1999,47(2):720 -727.

[20] 郑立红. 新型豆腐复合凝固剂的研究[J]. 中国食品添加剂, 2000(4): 23-26. (Zheng L H. Study on a new type of tofu composite coagulant[J]. China Food Additives, 2000(4): 23-26.)

[21] Ke S L, Hsieh F H. Protein-protein interactions in high moisture-extruded meat analogs and heat-induced soy protein gels[J]. Journal of the American Oil Chemists’ Society, 2007, 84(8): 741-748.