

孙冰玉, 郑欣茹, 刘琳琳, 等. 凝固剂及加工条件对豆腐凝胶形成及品质影响研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 388–396.  
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030178

SUN Bingyu, ZHENG Xinru, LIU Linlin, et al. Research Progress on the Influence of Coagulants and Processing Conditions on the Formation and Quality of Tofu Gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 388–396. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030178

· 专题综述 ·

# 凝固剂及加工条件对豆腐凝胶形成及品质影响研究进展

孙冰玉, 郑欣茹, 刘琳琳\*, 吕铭守, 黄雨洋, 朱 颖, 曲 敏, 朱秀清, 石彦国  
(哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江省谷物食品与谷物资源综合加工重点实验室,  
黑龙江哈尔滨 150076)

**摘 要:** 豆腐的本质是一种蛋白质凝胶体, 是大豆蛋白 (主要是 7S 和 11S 球蛋白) 在热处理下发生变性使蛋白质分子结构展开, 再通过盐离子、氢离子或酶等凝固剂作用下发生聚集, 形成致密均匀且具有网状结构蛋白凝胶。豆腐凝胶的形成及豆腐品质受多种因素的影响。本文从凝固剂种类 (盐类、酸类和酶类凝固剂) 以及加工条件 (加工原料、制浆方法、豆浆体系 pH、热处理条件) 角度出发, 阐明凝固剂及加工条件对豆腐凝胶形成以及品质的影响研究进展。以为豆腐制品的工业化生产提供理论指导, 为豆腐食品的研究开发与品质调控提供科学依据。

**关键词:** 豆腐凝胶, 凝固剂, 加工条件, 形成机理, 品质调控

中图分类号: TS214.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)03-0388-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030178



本文网刊:

## Research Progress on the Influence of Coagulants and Processing Conditions on the Formation and Quality of Tofu Gel

SUN Bingyu, ZHENG Xinru, LIU Linlin\*, LÜ Mingshou, HUANG Yuyang, ZHU Ying, QU Min, ZHU Xiuqing, SHI Yanguo

(Heilongjiang Key Laboratory of Grain Food and Grain Resources Comprehensive Processing, School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

**Abstract:** Tofu is a widely consumed protein gel, which is the denaturation of soybean protein (specifically the 7S and 11S globulin), under heat treatment, and the aggregation by salt ions, hydrogen ions or enzymes, forming a dense and uniform protein gel with a network structure. The formation of tofu gel and quality of tofu are affected by many factors. In this paper, a comprehensive review of the impact factors on tofu gel formation and quality is presented. The types of coagulants including salts, acids, and enzymatic coagulants, together with processing conditions such as the processing raw material, pulping method, pH value, and heat treatment are all discussed. The research progress on the effects of coagulants and processing conditions on the formation and quality of tofu gel is reviewed, to provide a theoretical guidance for industrial tofu production and a scientific basis for research and development of tofu food and quality control.

**Key words:** tofu gel; coagulant; processing conditions; formation mechanism; quality control

豆腐是我国传统豆制品之一, 富含丰富的蛋白质, 含有人体所需的多种氨基酸, 动物性食物缺乏的

不饱和脂肪酸和卵磷脂等<sup>[1]</sup>, 有着“植物肉”的美称。因其历史悠久且营养丰富, 一直深受国民的喜爱<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期: 2023-03-17

基金项目: 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目 (UNPYSCT—2020217); 哈尔滨商业大学青年后备人才支持计划项目 (XL0110); 哈尔滨商业大学博士科研启动支持计划项目 (22BQ23); 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项支撑行动计划 (2021ZX12B04)。

作者简介: 孙冰玉 (1978-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 蛋白质分子化学及大豆深加工, E-mail: sby0451@163.com。

\* 通信作者: 刘琳琳 (1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 大豆、谷物化学及加工原理, E-mail: keaiduolinlin@126.com。

豆腐作为高蛋白制品,含有多种维生素,且在氨基酸组成和结构上与肉类相似,在我国国民日常膳食中有举足轻重的地位,在日本、韩国等国家的饮食中也是不可缺少的。由于其丰富的营养价值,近年来豆腐及其制品在西方国家也逐步得到关注<sup>[4-5]</sup>。

豆腐是大豆蛋白在凝固剂作用下通过蛋白质-蛋白质、蛋白质-水形成具有特定空间网络结构的蛋白凝胶产品<sup>[6-7]</sup>。豆腐凝胶的形成主要分为两个关键阶段,第一阶段是通过热处理使豆浆中大豆蛋白变性,第二阶段是通过加入凝固剂使大豆蛋白聚集,形成具有三维网络结构的凝胶。由此可见,豆腐凝胶的形成是一个相对复杂的过程,凝固剂种类及每一个加工步骤都会影响豆腐凝胶的形成,从而影响豆腐的营养成分、口感风味、质地和外观等<sup>[8-10]</sup>。

我国传统豆腐制品发展历史悠久,豆腐制品由于具有营养高、风味好等优点越来越受到人们的喜爱。目前豆腐制品的加工已经逐渐从手工作坊式转变为工业化生产方式。但是部分还继续沿用传统手工的加工方式,这就导致生产工艺参数不能量化,并且由于原料、加工条件和操作的差异性,导致豆腐品质不稳定等问题。本文阐述了豆腐凝胶形成影响因素,归纳总结了凝固剂和加工条件对豆腐凝胶形成及豆腐品质的影响,探讨了不同凝固剂诱导的豆腐凝胶形成机理与差异,以期更深入了解豆腐凝胶形成的主要影响因素,旨在为豆腐工业化生产中工艺参数量化和品质稳定提供理论依据和实践参考。

## 1 凝固剂种类对豆腐凝胶形成机理及品质的影响

豆腐制作时的一个关键步骤是添加凝固剂,可使大豆蛋白形成凝胶网络结构,在宏观上可反映豆腐凝胶的形成。近年来,制作豆腐的凝固剂种类繁多,使得豆腐的质构、口感和产量上存在很大差异。这是由于不同种类凝固剂的凝固机理不同所导致的。这一原因引起了众多学者的研究兴趣,许多学者根据凝固剂种类的不同来研究其诱导豆腐凝胶形成的机理。

### 1.1 盐类凝固剂诱导豆腐凝胶形成机理及其品质的影响

1.1.1 盐类凝固剂诱导豆腐凝胶形成机理 目前,关于盐类凝固剂诱导豆腐凝胶形成的机理有三种说法,

分别是“离子桥”学说、盐析作用和 pH 降低效应。关于“离子桥”学说<sup>[11]</sup>,研究者们认为向豆浆中加入盐类凝固剂之后,盐类凝固剂中的二价阳离子  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  与变性蛋白质分子结合形成“钙桥”或“镁桥”连接方式。加快蛋白质凝胶形成速度,增加蛋白网络结构稳定性,从而增加豆腐凝胶的强度。但 Kroll<sup>[12]</sup> 的研究表明, pH 为 4~9 时,随着 pH 下降,大豆蛋白对钙离子的亲和力也随之下降,因此在豆浆中加入单纯钙盐,使其凝固是不太现实的。第二种说法是盐析作用,是指向豆浆中加入盐类凝固剂之后,盐中的阳离子与大豆蛋白表面带负电的氨基酸残基结合,导致静电斥力下降,从而形成凝胶<sup>[13-14]</sup>。但此说法不能解释蛋白质凝固与蛋白质沉淀的区别。第三种说法是 pH 降低效应,该说法与酸类凝固剂凝固机理相似,基于 Lu 等<sup>[15]</sup> 的发现,即豆浆中加入中性盐后,随着豆浆 pH 的下降, pH 趋近于大豆蛋白质等电点,使豆浆凝固成豆腐。这三种理论都有合理处,但也都具有局限性。目前学者们普遍认同的说法是“离子桥”学说。根据这一学说,其诱导豆腐凝胶形成机理如图 1 所示。

#### 1.1.2 盐类凝固剂对豆腐凝胶形成及品质的影响

盐类凝固剂主要包括石膏(主要是  $\text{CaSO}_4$ )和盐卤(主要是  $\text{MgCl}_2$ )。根据我国地域不同,豆腐主要可以分为北豆腐和南豆腐,它们的凝固剂都以盐类凝固剂为主。北方地区大多采用卤水/卤片( $\text{MgCl}_2$ )作为凝固剂来制作豆腐,  $\text{MgCl}_2$  豆腐硬度较硬,韧性强,因此也称老豆腐或硬豆腐。南方地区则大多采用石膏( $\text{CaSO}_4$ )作为凝固剂制作豆腐,  $\text{CaSO}_4$  豆腐质地较嫩,也称为嫩豆腐。

$\text{MgCl}_2$  豆腐硬度较硬,韧性较强,但持水性低<sup>[18]</sup>。江振桂等<sup>[19]</sup> 研究发现,与  $\text{CaSO}_4$  豆腐和酸浆豆腐相比,  $\text{MgCl}_2$  豆腐的持水性、产量和感官评分都较低。李玉娥等<sup>[20]</sup> 研究表明随着卤片浓度的增加,豆腐凝胶的凝胶强度呈先增加后减少的趋势,且豆腐凝胶的持水性降低。并且随着  $\text{MgCl}_2$  添加量的增加,豆腐中蛋白质和脂肪等营养成分增加,豆腐产量和持水性降低<sup>[21-22]</sup>。这是由于  $\text{MgCl}_2$  可使大豆蛋白迅速凝固或沉淀,从而使豆腐凝胶的凝胶网络结构紧密不均匀,且呈块状,导致其质地粗糙,硬度较硬、水分含量较低。

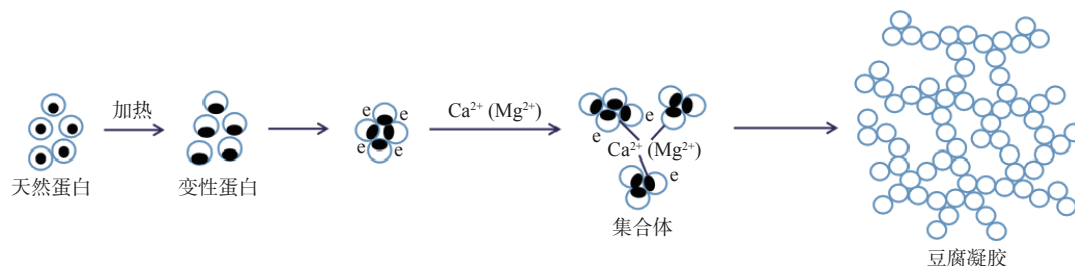


图 1  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 诱导豆腐凝胶形成机理示意图<sup>[16-17]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of tofu gel formation induced by  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ <sup>[16-17]</sup>

CaSO<sub>4</sub>豆腐的持水性好、质地细腻、产量高。Kao等<sup>[23]</sup>研究发现添加0.4% CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O制成的豆腐在微观结构中最均匀,最连续,豆腐具有最大的产量,蛋白质回收率最高,持水性最好。并且有研究表明CaSO<sub>4</sub>豆腐凝胶的微观结构更均匀。在感官评价中,CaSO<sub>4</sub>豆腐的整体接受度最佳<sup>[18]</sup>。

MgCl<sub>2</sub>豆腐和CaSO<sub>4</sub>豆腐的凝胶结构有很大的差异。在赵海波<sup>[24]</sup>的研究中发现MgCl<sub>2</sub>豆腐凝胶的结构粗糙、孔隙大,CaSO<sub>4</sub>豆腐的结构更均匀、致密。SEM的观察结果表明,用0.4% CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O制成的豆腐具有最均匀和致密的微观结构,因此可以有效地将大豆蛋白和水保留在豆腐凝胶中<sup>[24]</sup>。综上,盐类凝固剂种类不同,豆腐品质也存在差异。且在制作豆腐时,可通过调整凝固剂的使用条件来改善豆腐品质。

## 1.2 酸类凝固剂诱导豆腐凝胶形成机理及其品质的影响

1.2.1 酸类凝固剂诱导豆腐凝胶形成机理 目前关于酸类凝固剂诱导豆腐凝胶形成的机理没有明确的说法,但有学者认为酸类凝固剂可以提供氢离子,将豆浆的pH降低到大豆蛋白的等电点,促进蛋白质的等电沉淀<sup>[25]</sup>,从而产生聚集,形成凝胶。葡萄糖-δ-内酯(Glucono-δ-lactone, GDL)是目前最广泛应用于豆腐生产中的酸类凝固剂,因其制作的内酯豆腐质地丝滑、口感软嫩,深受消费者喜爱,学者们对于GDL的凝固机理研究也较多。GDL本身不能使豆浆凝固,但在豆浆温度较低的情况下加入GDL,再通过加热可使GDL分解成葡萄糖酸,释放H<sup>+</sup>,达到蛋白质等电点,促使蛋白质凝固<sup>[26-27]</sup>。

酸类凝固剂中另一个比较具有代表性的是酸浆。酸浆是豆腐在压制过程中产生的黄浆废水经过微生物发酵制成的。酸浆作为豆腐凝固剂,在中国已有上百年的历史。酸浆豆腐具有独特的风味,口感细腻,且弹性较好,富含高蛋白,是纯天然绿色食品,因此被选为《舌尖上的中国》经典食材<sup>[28]</sup>。近几年,酸浆豆腐越来越受到消费者和研究者的关注。由于酸浆豆腐的制作大多采用传统手工作坊式,且生产者使用的酸浆是自然发酵,这就导致豆腐制作工艺参数无法定量,品质不稳定。因此如何工业化生产品质稳定的酸浆豆腐,稳定酸浆品质是当前待解决的问题<sup>[29]</sup>。所以许多学者开始关注并研究酸浆豆腐的纯种发酵,从而深入研究其机理。目前,有学者认为酸浆豆腐的凝固机理存在盐凝、酸凝和酶凝三种说法<sup>[30]</sup>,关于盐凝机理是指酸浆中的金属离子与大豆蛋白反应,降低溶液pH,从而形成凝胶。但在高若珊等<sup>[5]</sup>的研究中认为与其他凝固剂相比,酸浆豆腐制作过程中减少了其他凝固剂的添加,因此减少了金属离子的引用,这与盐凝理论是矛盾的。关于酸凝机理与其他酸类凝固剂的机理相似,也是学者们比较认同的说法。通过乳酸菌发酵黄浆水产酸,将溶液pH降到蛋白质等电

点,使蛋白发生聚集和沉淀<sup>[31-32]</sup>。宋俊梅等<sup>[33]</sup>研究发现,在排除蛋白质、灰分等因素对凝固产生的影响后,认为酸浆诱导豆腐凝胶形成的机理是酸凝,即等电点凝固。Qiao等<sup>[34]</sup>研究表明酸浆中的有机酸以L-乳酸为主,乳酸菌为酸浆中主要的微生物,因此认为酸浆凝固机理与酸类凝固剂相似。酶凝机理是认为乳酸菌在发酵黄浆水时可以产生凝固酶,可以使大豆蛋白形成凝胶,并且会产生使豆腐风味变得更好的物质,如醇、醛、酯等风味物质<sup>[35]</sup>。

### 1.2.2 酸类凝固剂对豆腐凝胶形成及品质的影响

酸类凝固剂主要包括GDL、发酵大豆乳清(Fermented Soybean Whey, FSW,也称豆清发酵液,俗称酸浆)、乳酸、醋酸、柠檬酸、苹果酸和L-酒石酸等<sup>[30]</sup>,其中,GDL和酸浆应用比较广泛。

酸类凝固剂制作的豆腐可以使其具有较好的质构特性和持水性。Cao等<sup>[36]</sup>发现当有机酸的添加量为0.14 g/100 mL时,豆腐凝胶的硬度、持水性、储能模量以及凝胶内疏水相互作用都呈现出了较好的状态,但当添加量超过0.16 g/100 mL时,其凝胶特性会变差。Wan等<sup>[37]</sup>研究发现GDL诱导大豆分离蛋白凝胶的硬度、弹性、咀嚼性和持水性随着蛋白浓度的增加依次增大。有研究表明GDL豆腐的含水量较高(76.3%),质地较软,产量较高(202 g/100 g)。酸浆豆腐中蛋白质和氨基酸含量最高,分别为18.5%和15.85%。酸浆豆腐的品质最佳,风味也更独特,这是由于酸浆豆腐中具有多种挥发性物质,从而使其具有诱人的风味,更受消费者喜爱<sup>[18]</sup>。戴意强等<sup>[38]</sup>发现乳酸豆腐和醋酸豆腐具有较高的硬度和咀嚼性,而乳酸豆腐的产量和含水量都较低。可见,大部分酸类凝固剂制作的豆腐都具有持水性好、产量高以及质构特性较高等特点。

## 1.3 酶类凝固剂诱导豆腐凝胶形成机理及其品质的影响

1.3.1 酶类凝固剂诱导豆腐凝胶形成机理 酶类凝固剂广泛存在于动植物组织和微生物中,由于其分离工艺较为复杂,生产成本昂贵,所以作为豆腐凝固剂目前在市面上应用较少。但酶类凝固剂可通过不同的催化反应来改善食品的风味、质地和功能特性等,因此具有较大的发展潜力<sup>[39]</sup>。近年来,酶类凝固剂中的转谷氨酰胺酶应用较为广泛,凝固效果较好。转谷氨酰胺酶是一种转移酶,可以催化蛋白质结合谷氨酰胺残基(酰基供体)的γ-甲酰胺基与各种伯胺(酰基受体)之间的酰基转移反应,从而在蛋白质分子中形成分子内或分子间交联<sup>[40]</sup>,促进相邻的蛋白质分子的化学键合,形成具有三级网络结构的凝胶<sup>[41-42]</sup>,如图2所示。

综上,凝固剂种类的不同会导致豆腐凝胶形成的机理也存在差异,盐类凝固剂中普遍认同的“离子桥”学说主要是由于大豆蛋白中含有很多羧基,当发生凝固时,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>与蛋白质分子结合形成“钙桥”

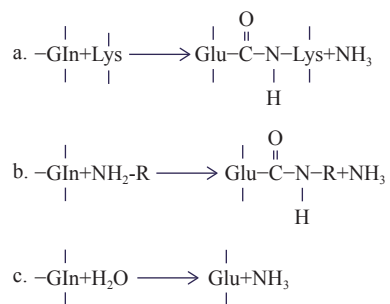


图 2 转谷氨酰胺酶催化蛋白交联的机理<sup>[43]</sup>

Fig.2 Mechanism of protein crosslinking catalyzed by transglutaminase<sup>[43]</sup>

或“镁桥”从而相互聚集、连接形成凝胶。酸类凝固剂主要通过将豆浆体系 pH 达到蛋白质等电点从而发生聚集和沉淀。酶类凝固剂主要通过酶解与蛋白质进行交联。三种凝固剂凝固机理的对比见表 1。

1.3.2 酶类凝固剂对豆腐凝胶形成及品质的影响

酶类凝固剂可分为碱性、中性和酸性三类, 主要包括木瓜蛋白酶、转谷氨酰胺酶(TGase)、胰蛋白酶和菠萝蛋白酶等<sup>[36]</sup>。酶类凝固剂制作的豆腐无酸涩味, 有浓郁的豆香味, 口感较好, 但成本比其他两种凝固剂高, 这也是限制酶类豆腐生产发展的关键点。目前酶类凝固剂中应用最广泛的是 TGase, TGase 被用作凝固剂交联各种蛋白质, 有助于蛋白质凝胶的形成<sup>[44]</sup>, 同时也对凝胶特性产生影响。臧学丽等<sup>[45]</sup> 在研究 TGase 对大豆蛋白结构和凝胶强度的影响中发现, TGase 改变了大豆分离蛋白的结构, 使其表面疏水性提高, 巯基含量降低, 形成致密均匀的凝胶网络<sup>[46]</sup>, 从而影响了凝胶强度。

有研究表明 TGase 可以使全豆豆腐的质地更光滑, 持水性和质构特性更好<sup>[47-48]</sup>。这是因为经过酶解后, 豆腐凝胶的凝胶强度、持水性和非冷冻水含量均

高于未经酶处理的豆腐凝胶, 并且形成了致密的凝胶网络结构<sup>[49-50]</sup>。可见, TGase 可以改善大豆蛋白凝胶的凝胶性质、疏水性、溶解性和质地, 也可以使豆腐凝胶具有良好的质构特性和持水性。

2 加工条件对豆腐凝胶形成及品质的影响

豆腐是大豆经过浸泡、磨浆、煮浆、点浆、蹲脑、压制、成型等多道工序制作而成的。这些工序的每一步都会对蛋白凝胶形成产生影响, 最终影响豆腐品质。如图 3 所示, 大豆蛋白的结构在豆腐加工过程中发生了很大变化, 天然蛋白在热处理之后发生变性, 在不同种类凝固剂作用下发生聚集, 形成不同程度的聚集体。

2.1 加工原料对豆腐凝胶形成及豆腐品质的影响

豆腐的加工原料是大豆, 大豆中含有多种蛋白质, 其中 7S( $\beta$ -伴大豆球蛋白)和 11S(大豆球蛋白)是最主要的两种蛋白组分, 占大豆总蛋白含量 70% 以上<sup>[53]</sup>, 是豆腐凝胶形成的主要蛋白。豆腐是一种高度水合的凝胶型食品, 它的形成归因于大豆蛋白的凝胶特性, 所以大豆蛋白对豆腐凝胶的形成至关重要。

蛋白质含量高的大豆更容易形成豆腐凝胶, 并且豆腐的硬度和弹性与蛋白质含量呈正相关关系<sup>[54]</sup>。有研究表明, 豆浆中的蛋白质含量较高时更容易形成豆腐凝胶, 豆腐凝胶结构较致密, 豆腐硬度会更硬<sup>[55-56]</sup>。这与 Toda 等<sup>[57]</sup> 的研究结果一致。

不同品种的大豆, 其大豆蛋白 7S 和 11S 亚基的组成和比例不同, 会导致变性温度和凝胶网络结构发生变化<sup>[58-59]</sup>。Poysa 等<sup>[60]</sup> 研究发现大豆蛋白中缺少 7S  $\alpha'$  和 11SA<sub>4</sub> 亚基时, 豆腐硬度较硬。James 等<sup>[61]</sup> 也得出相应的结论, 当大豆蛋白中缺失 11SA<sub>4</sub> 亚基时, 大豆中蛋白质含量增加, 生产出的豆腐质地较硬, 持水性较好。除了 11S 亚基, 当缺乏 7S  $\alpha'$  亚基时可

表 1 三类凝固剂凝固机理对比

Table 1 Comparison of coagulation mechanism of three types of coagulants

| 凝固剂种类 | 诱导因素                               | 凝固机理                                                               |
|-------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 盐类凝固剂 | Ca <sup>2+</sup> 、Mg <sup>2+</sup> | 大豆蛋白质中的-COOH与凝固剂中二价阳离子结合形成“钙桥”或“镁桥”, 从而形成凝胶                        |
| 酸类凝固剂 | pH                                 | 酸类凝固剂可释放H <sup>+</sup> , 使得豆浆体系pH达到大豆蛋白等电点, 即pH=pI, 蛋白质发生聚集和沉淀形成凝胶 |
| 酶类凝固剂 | 基团转移交联                             | 酶可催化蛋白质内或蛋白质间的分子内或分子间的交联形成凝胶                                       |

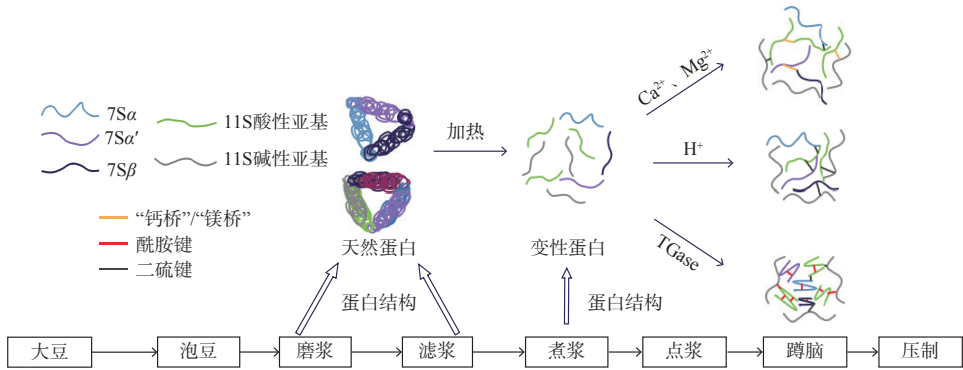


图 3 豆腐加工过程中大豆蛋白变化<sup>[51-52]</sup>

Fig.3 Changes of soybean protein during tofu processing<sup>[51-52]</sup>

显著提高凝胶的凝胶强度和持水性,且凝胶的网络结构更为均匀、致密<sup>[62]</sup>。同样,11S 与 7S 比例不同对豆腐的硬度也有显著影响<sup>[63]</sup>。11S/7S 比例较高时,豆腐的硬度较大,于寒松等<sup>[64]</sup>发现豆腐的硬度与 11S/7S 比例呈极显著正相关。可能是 11S 球蛋白中的游离巯基较多,在蛋白聚集时增强了蛋白聚集之间的交联作用<sup>[65]</sup>。

可见,大豆中蛋白质含量高会提高豆腐凝胶的强度、弹性和豆腐产量,11S 与 7S 亚基的含量和比例不同会使凝胶的网络结构有较大差异,并且提高 11S 亚基的含量也会使豆腐具有更好的品质。大豆原料特性对豆腐品质影响见表 2。

2.2 豆浆制备方法对豆腐凝胶形成及品质的影响

目前根据制浆时过滤与加热的先后次序,豆浆的制备方法主要分为生浆法(先过滤再煮浆)和熟浆法(先煮浆再过滤)。不同制浆工艺可使生产出的豆浆及其大豆制品品质存在差异。Huang 等<sup>[69]</sup>研究发现熟浆法豆腐的质地、微观结构和感官评价均优于生浆法。Zhang 等<sup>[70]</sup>研究发现熟浆法制作的豆腐产量、持水性和含水量都高于生浆法,这也与 Huang 等<sup>[71]</sup>的研究一致。这是由于熟浆在过滤时温度较高,有助于蛋白质从豆渣进入到豆浆中,从而增加了豆浆中蛋白质含量和豆腐产量。并且加热和过滤豆浆的过程中,在相对较高的温度下,豆浆中的多糖更容易被稀释,使得豆腐的持水性增强<sup>[72]</sup>。因此在豆腐制作过程中采用熟浆法是制得高品质豆腐的最佳方法。

2.3 豆浆体系 pH 对豆腐凝胶形成及品质的影响

在探索豆腐机理中发现,pH 对豆腐凝胶的形成至关重要。凝固剂种类的不同会使豆浆体系达到不同的 pH,当豆浆体系中 pH 变化时,豆浆中蛋白质分子发生聚集或解离,其结构和溶解度也会发生变化<sup>[73-77]</sup>,这种变化会影响蛋白质的聚集行为,从而也会影响蛋白的结构和凝胶特性。

2.3.1 豆浆体系 pH 对豆腐凝胶形成过程中蛋白结构的影响 豆浆体系 pH 会使豆浆中蛋白质分子的静电斥力发生变化,从而导致蛋白发生解离和聚集,使豆浆中大豆蛋白的二、三级结构、表面疏水性和二硫键等发生变化。pH 可改变蛋白质的二、三级结构,随着 pH 的增加,蛋白的最大发射波长发生红移,位于蛋白质内部的色氨酸和酪氨酸由于蛋白质结构

的展开而暴露在极性的环境中<sup>[78-79]</sup>。Oizumi 等<sup>[80]</sup>研究发现,在 pH 为 5.8~6.0 时,豆浆中的平均粒径略有增大,在 pH 为 5.6 时显著增加。pH 变化也会引起表面疏水性的变化,有研究发现在 pH7.4 时,豆浆中蛋白的表面疏水性达到最低<sup>[81]</sup>。这可能是因为 pH 为 4~7 时,诱导蛋白质分子展开,从而促进巯基和疏水氨基酸暴露<sup>[82]</sup>。因此,豆浆体系 pH 的改变会使蛋白质结构发生不同程度的变化,从而影响豆腐凝胶的凝胶特性。

2.3.2 豆浆体系 pH 对豆腐凝胶形成过程中流变特性的影响 动态流变学是评估凝胶形成及凝胶化的重要指标<sup>[83]</sup>,可反映凝胶在形成过程中从类液体状态到类固体状态的转变。在不同 pH 下,大豆蛋白热聚合后的流变学特性存在较大差异。Li 等<sup>[81]</sup>研究不同微碱性条件对豆浆的流变特性影响中发现,储能模量( $G'$ )会随着豆浆 pH 的增加而显著降低(pH6.6~7.6),可能是由于碱热处理后,参与形成凝胶网络结构的蛋白质数量减少。凝胶的弹性模量会随着蛋白质数量的增加而增加<sup>[84]</sup>。豆腐凝胶的  $G'$ 降低可能与凝胶网络结构蛋白数量的降低有关。有研究发现 pH 为 2 和 3 时可改善凝胶的  $G'$ 和损耗模量( $G''$ ),且 pH 为 3 时储能模量更高,pH 处理后的样品  $G'$ 值高于未经 pH 处理组,这可能是由于 pH 处理大豆分离蛋白(SPI)可以在一定程度上促进形成均一、致密的蛋白质凝胶状网络结构<sup>[85-88]</sup>。综上,豆浆体系 pH 的改变会导致蛋白质聚合物的结构和蛋白质数量存在差异,从而导致豆腐凝胶黏弹性发生变化。

2.4 热处理条件对豆腐凝胶形成及品质的影响

豆浆的热处理是豆腐凝胶形成的前提<sup>[89]</sup>,也是必要条件之一。大豆蛋白在热处理作用下发生热变性,导致疏水基团暴露,大豆蛋白表面疏水性和巯基含量增加,从而促进蛋白分子之间聚集作用。热处理可以显著提高大豆蛋白凝胶的凝胶强度,是天然蛋白凝胶的 2.2 倍<sup>[90]</sup>。Wen 等<sup>[91]</sup>通过研究热处理对豆浆和 GDL 诱导豆腐凝胶性能的影响中发现,豆浆在 95 ℃ 左右加热 10 min 时可显著改善 GDL 诱导豆腐凝胶的物理化学性质,还可改善 GDL 豆腐的质构特性和产量。杨岚等<sup>[92]</sup>研究发现不同温度处理 SPI 的凝胶强度基本都呈现出先上升后下降的趋势,80 和 85 ℃ 处理的凝胶强度会显著低于 90、95 和 100 ℃。

表 2 大豆原料特性对豆腐品质的影响

Table 2 Effect of soybean raw material characteristics on tofu quality

| 大豆原料特性   |                         | 豆腐品质                                                         |
|----------|-------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 蛋白质含量    | 含量较高                    | 更容易形成凝胶,豆腐硬度、弹性较好,出品率较高 <sup>[6,65]</sup>                    |
|          | 含量较低                    | 豆腐硬度、弹性和产量等较低 <sup>[65-66]</sup>                             |
| 亚基组成     | 11S A <sub>4</sub> 亚基缺失 | 大豆中蛋白质含量较高,大豆种子小,豆腐凝胶结构致密,从而提高豆腐硬度和持水性 <sup>[55,60]</sup>    |
|          | 7S α亚基缺失                | 可显著提高凝胶的凝胶强度和持水性,凝胶具有更均匀、更致密的网络结构、更高的热稳定性 <sup>[62,65]</sup> |
| 11S/7S比例 | 高比例                     | 豆腐的硬度、咀嚼性和黏附性较大, $L^*$ 值较大 <sup>[64,67]</sup>                |
|          | 低比例                     | 豆腐硬度低,凝胶微观结构疏松、孔隙较多 <sup>[65,68]</sup>                       |

可能是因为在低温下,蛋白质变性程度低,分子折叠程度有限。可见,对豆浆适宜的热处理温度和时间会提高豆腐凝胶的凝胶强度和持水性。

### 3 总结与展望

豆腐凝胶的形成是一个相对复杂的过程,凝固剂种类、加工原料、豆浆的制备方法以及体系 pH 和热处理条件等会共同影响豆腐凝胶的形成及品质,通过以上综述分析可以得到如下主要结论:a.凝固剂种类的不同使其诱导豆腐凝胶形成的诱导因素和凝固机理有所差异,从而使得制作的豆腐品质不一,口感和风味也有差别;b.加工原料中大豆蛋白含量、亚基含量及组成比例可使得豆腐硬度和弹性发生变化;c.豆浆的制备方法以及热处理的时间和温度适宜,可显著提高豆腐凝胶的凝胶强度和持水性。此外,豆浆体系 pH 的控制也可有效提高豆腐凝胶的黏弹性。可见,在保持传统豆腐的营养和风味、传承豆腐的制作工艺的同时,通过分析影响豆腐凝胶形成的主要因素和明确不同凝固剂诱导豆腐凝胶的形成机理,量化工艺参数,从而提升豆腐品质和促进豆制品工业化生产。

#### 参考文献

- [1] WANG F, MENG J, SUN L, et al. Study on the tofu quality evaluation method and the establishment of a model for suitable soybean varieties for Chinese traditional tofu processing[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020, 117: 108441.
- [2] ALI F, TIAN K, WANG Z X. Modern techniques efficacy on tofu processing: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 116: 766-785.
- [3] ZHU Y, WANG Z M, ZHANG L. Optimization of lactic acid fermentation conditions for fermented tofu whey beverage with high-isoflavone aglycones[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2019, 111: 211-217.
- [4] GUO Y L, HU H, WANG Q, et al. A novel process for peanut tofu gel: Its texture, microstructure and protein behavioral changes affected by processing conditions[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2018, 96: 140-146.
- [5] 高若珊, 孙亚东, 张光, 等. 酸浆豆腐研究进展[J]. *大豆科技*, 2020(1): 32-37. [GAO R S, SUN Y D, ZHANG G, et al. Research progress of producing tofu with sour pulp[J]. *Soybean Science & Technology*, 2020(1): 32-37.]
- [6] 王宸之, 陈宇, 万重, 等. 豆腐凝胶成型机理研究进展[J]. *东北农业大学学报*, 2017, 48(10): 88-96. [WANG C Z, CHEN Y, WAN C, et al. Research progress on gelation mechanism of soybean curd processing[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(10): 88-96.]
- [7] YANG X Y, SU Y, LI L. Study of soybean gel induced by *Lactobacillus plantarum*: Protein structure and intermolecular interaction[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2019, 119(2): 108794.
- [8] RUI X, FU Y T, ZHANG Q Q, et al. A comparison study of bioaccessibility of soy protein gel induced by magnesium chloride, glucono- $\delta$ -lactone and microbial transglutaminase[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 71: 234-242.
- [9] ZHAO H B, CHEN J, HEMAR Y, et al. Improvement of the rheological and textural properties of calcium sulfate-induced soy protein isolate gels by the incorporation of different polysaccharides[J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125983.
- [10] LI Y, WAN Y L, MAMU Y, et al. Aggregation and gelation of soymilk protein after alkaline heat treatment: Effect of coagulants and their addition sequences[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 138: 108178.
- [11] SAIO K, KOYAMA E, WATANABE T. Protein-calcium-phytic acid relationships in soybean, 1: Effect of calcium and phosphorus on the solubility characteristics of soybean meal protein[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1967, 31: 1195-1200.
- [12] KROLL R D. Effect of pH on the binding of calcium ions by soybean proteins[J]. *Cereal Chemistry*, 1984, 61.
- [13] 乔支红, 李里特. 豆腐凝胶形成影响因素的研究进展[J]. *食品科学*, 2007(6): 363-366. [QIAO Z H, LI L T. Overview on affecting conditions on tofu gel formation[J]. *Food Science*, 2007(6): 363-366.]
- [14] 陈复生, 李里特, 辰巴英三. 分子力对大豆蛋白透明凝胶作用机理研究[J]. *食品科学*, 2001(10): 27-30. [CHEN F S, LI L T, EIZO T. Study on mechanisms of molecular forces to soybean protein transparent gels[J]. *Food Science*, 2001(10): 27-30.]
- [15] LU J Y, CARTER E, CHUANG R A. Use of calcium salts for soybean curd preparation[J]. *Journal of Food Science*, 1980, 45(1): 32-34.
- [16] KOHYAMA K, NISHINARI K. The effect of glucono- $\delta$ -lactone on the gelation time of soybean 11S protein: Concentration dependence[J]. *Food Hydrocolloids*, 1992, 6(3): 263-274.
- [17] 李娟娟. 酸浆豆腐加工工艺的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020. [LI J J. Study on processing technology of physalis tofu[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2020.]
- [18] SHI Y G, YANG Y, PIEKOSZEWSKI W, et al. Influence of four different coagulants on the physicochemical properties, textural characteristics and flavour of tofu[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(3): 1218-1229.
- [19] 江振桂, 王秋普, 张一震, 等. 不同凝固剂对豆腐品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(7): 229-234. [JIANG Z G, WANG Q P, ZHANG Y Z, et al. Effects of different coagulants on the quality of tofu[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(7): 229-234.]
- [20] 李玉娥, 王愈, 陈振家. 复合凝固剂条件对豆腐凝胶品质的影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(8): 277-284. [LI Y E, WANG Y, CHEN Z J. Effect of composite coagulant on quality of tofu gel[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(8): 277-284.]
- [21] ZHU Q M, WU F F, SAITO M, et al. Effect of magnesium salt concentration in water-in-oil emulsions on the physical properties and microstructure of tofu[J]. *Food Chemistry*, 2016, 201: 197-204.
- [22] 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(5): 4508-4516.
- [23] KAO F J, SU N W, LEE M H. Effect of calcium sulfate concentration in soymilk on the microstructure of firm tofu and the protein constitutions in tofu whey[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(21): 6211-6216.
- [24] 赵海波. 硫酸钙诱导热变性大豆蛋白凝胶的影响因素及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [ZHAO H B. Factors affecting the formation of thermodenatured soybean protein gel induced by calcium sulfate and its application[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
- [25] LIU H H, KUO M. Effect of microwave heating on the viscoelastic property and microstructure of soy protein isolate gel[J]. *Journal of Texture Studies*, 2011, 42: 1-9.

- [26] ZHENG L, REGENSTEIN J M, TENG F, et al. Tofu products: A review of their raw materials, processing conditions, and packaging[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19: 1–8.
- [27] GUAN X F, ZHONG X Q, LU Y H, et al. Changes of soybean protein during tofu processing[J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1594.
- [28] 叶青, 许云贺, 张莉力. 豆腐酸浆中干酪乳杆菌的分离、鉴定及作为豆腐凝固剂的应用[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 94–98, 104. [YE Q, XU H Y, ZHANG L L. Isolation and identification of *Lactobacillus casei* in tofu acid pulp and its application as tofu coagulant[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(18): 94–98, 104.]
- [29] 刘琳琳, 王嘉琪, 曾剑华, 等. 云南建水豆腐酸浆中乳酸菌的分离与鉴定[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(11): 239–245. [LIU L L, WANG J Q, ZENG J H, et al. Isolation and identification of lactic acid bacteria from tofu fermented soybean whey in Jianshui, Yunnan[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(11): 239–245.]
- [30] 刘宁, 高艺笑, 孙钰姬, 等. 豆腐凝固剂的研究进展[J]. *中国调味品*, 2021, 46(3): 189–194. [LIU N, GAO Y X, SUN Y J, et al. Research progress of tofu coagulants[J]. *China Condiment*, 2021, 46(3): 189–194.]
- [31] 周小虎. 二次浆渣共熟—豆清蛋白发酵液点浆豆干自动化生产工艺研究及工厂设计[D]. 邵阳: 邵阳学院, 2015. [ZHOU X H. Technological study and plant design for automatic production of soymilk-dreg repeated curing-fermentation liquid of legumelin coagulation semi-dehydrated tofu[D]. Shaoyang: Shaoyang University, 2015.]
- [32] XU Y H, YE Q, ZHANG H J, et al. Naturally fermented acid slurry of soy whey: High-throughput sequencing-based characterization of microbial flora and mechanism of tofu coagulation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 1088.
- [33] 宋俊梅, 曲静然, 李燕, 等. 脆豆腐老浆液点浆机理的研究[J]. *食品技术*, 2002, 12(5): 14–15. [SONG J M, QU J R, LI Y, et al. Study on the mechanism of crisp tofu coagulation by Laojiang[J]. *Food Science and Technology*, 2002, 12(5): 14–15.]
- [34] QIAO Z H, CHEN X D, CHENG Y Q, et al. Microbiological and chemical changes during the production of acidic whey, a traditional Chinese tofu-coagulant[J]. *International Journal of Food Properties*, 2010, 13(1): 90–104.
- [35] 孙丰婷. 豆腐凝固剂的研究进展[J]. *农业与技术*, 2017, 37(4): 236–237. [SUN F T. Research progress of tofu coagulants[J]. *Agriculture and Technology*, 2017, 37(4): 236–237.]
- [36] CAO F H, LI X J, LUO S Z, et al. Effects of organic acid coagulants on the physical properties of and chemical interactions in tofu[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 85: 58–65.
- [37] WAN Y L, LI Y, GUO S T. Characteristics of soy protein isolate gel induced by glucono-d-lactone: Effects of the protein concentration during preheating[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106525.
- [38] 戴意强, 周剑忠, 刘小莉, 等. 不同凝固剂对豆腐品质特性及风味成分的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(15): 17–26. [DAI Y Q, ZHOU J Z, LIU X L, et al. Effects of different coagulants on quality characteristics and flavor components of tofu[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(15): 17–26.]
- [39] 李传运. 酶处理对大豆蛋白凝胶性的影响研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019. [LI C Y. Study on the mechanism and application of enzymatically modified soy protein[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.]
- [40] GHARIBZAHEDI S M T, ROOHINEJAD S, GEORGE S, et al. Innovative food processing technologies on the transglutaminase functionality in protein-based food products: Trends, opportunities and drawbacks[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75: 194–205.
- [41] NIVALA O, NORDLUND E, KRUUS K, et al. The effect of heat and transglutaminase treatment on emulsifying and gelling properties of faba bean protein isolate[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 139: 110517.
- [42] XU J J, GUO S Y, LI X J, et al. Gel properties of transglutaminase-induced soy protein isolate-polyphenol complex: Influence of epigallocatechin-3-gallate[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(9): 3870–3879.
- [43] 赖晗. 大豆品种和两种凝固剂对豆腐品质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2019. [LAI H. Effects of soybean varieties and two coagulants on the quality of tofu[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.]
- [44] BI C H, WANG P L, SUN D Y, et al. Effect of high-pressure homogenization on gelling and rheological properties of soybean protein isolate emulsion gel[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 277: 109923.
- [45] 臧学丽, 陈光. 转谷氨酰胺酶交联大豆分离蛋白的结构变化与凝胶强度的相关性[J]. *吉林农业大学学报*, 2021, 43(6): 685–689. [ZANG X L, CHEN G. Correlation between structural changes and gel strength of transglutaminase cross-linked soybean protein isolate[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2021, 43(6): 685–689.]
- [46] MA Z L, LI L, WU C L, et al. Effects of combined enzymatic and ultrasonic treatments on the structure and gel properties of soybean protein isolate[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 158(3): 113123.
- [47] LI C, WU X, MU D, et al. Effect of partial hydrolysis with papain on the characteristics of transglutaminase-crosslinked tofu gel[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(12): 3092–3098.
- [48] WANG C Z, LI J Y, ZHOU S Y, et al. Application of transglutaminase for quality improvement of whole soybean curd[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(1): 233–244.
- [49] GAO H L, XU J J, TAN M N, et al. Effect of high-intensity ultrasound soymilk pretreatment on the physicochemical properties of microbial transglutaminase-catalyzed tofu gel[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(6): 2410–2420.
- [50] QIN X S, LUO S Z, CAI J, et al. Transglutaminase-induced gelation properties of soy protein isolate and wheat gluten mixtures with high intensity ultrasonic pretreatment[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 31: 590–597.
- [51] MARUYAMA Y, MARUYAMA N, MIKAMI B, et al. Structure of the core region of the soybean  $\beta$ -conglycinin  $\alpha'$  subunit[J]. *Acta Crystallographica Section D*, 2004, 60: 1–6.
- [52] TANDANG-SILVAS M R, FUKUDA T, FUKUDA C, et al. Conservation and divergence on plant seed 11S globulins based on crystal structures[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics*, 2010, 1804: 1432–1442.
- [53] VUK O, KSENIJA TA, MILO V, et al. Subunit composition of seed storage proteins in high-protein soybean genotypes[J]. *Pesqui. Agropecuária Bras*, 2010, 45: 721–729.
- [54] BHARDWAJ H L, BHAGSARI A S, JOSHI J M, et al. Yield and quality of soymilk and tofu made from soybean genotypes grown at four locations[J]. *Crop Science*, 1999, 39(2): 401–405.
- [55] JAMES A T, YANG A J. Interactions of protein content and

- globulin subunit composition of soybean proteins in relation to tofu gel properties[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 284–289.
- [56] CHEN Y Q, SHIMIZU N, KIMURA T. The viscoelastic properties of soybean curd (tofu) as affected by soymilk concentration and type of coagulant[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2005, 40(4): 385–390.
- [57] TODA K, ONO T, KITAMURA K, et al. Seed protein content and consistency of tofu prepared with different magnesium chloride concentrations in six Japanese soybean varieties[J]. *Breeding Science*, 2003, 53(3): 217–223.
- [58] LI M L, DONG H M, WU D T, et al. Nutritional evaluation of whole soybean curd made from different soybean materials based on amino acid profiles[J]. *Food Quality and Safety*, 2020, 4(1): 41–50.
- [59] ASRAT U, HORO J T, GEBRE B A. Physicochemical and sensory properties of tofu prepared from eight popular soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] varieties in Ethiopia[J]. *Scientific African*, 2019, 6: e00179.
- [60] POYSA V, WOODROW. Stability of soybean seed composition and its effect on soymilk and tofu yield and quality[J]. *Food Research International*, 2002, 35(4): 337–345.
- [61] JAMES A T, YANG A J. Influence of globulin subunit composition of soybean proteins on silken tofu quality. 2. Absence of 11S A4 improves the effect of protein content on tofu hardness[J]. *Crop and Pasture Science*, 2014, 65(3): 268–273.
- [62] FU H L, LI J X, YANG X Q, et al. The heated-induced gelation of soy protein isolate at subunit level: Exploring the impacts of  $\alpha$  and  $\alpha'$  subunits on SPI gelation based on natural hybrid breeding varieties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 134: 108008.
- [63] PAZDEMIK D L, PLEHN S J, HALGERSON J L, et al. Effect of temperature and genotype on the crude glycinin fraction (11S) of soybean and its analysis by near-infrared reflectance spectroscopy (Near-IRS)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(8): 2278–2281.
- [64] 于寒松, 黄明伟, 赵永程, 等. 大豆成分与豆浆和豆腐特性的研究[J]. *食品工业*, 2015, 36(4): 4. [YU H S, HUANG M W, ZHAO Y C, et al. Research of the relation with soybean components and the character of soy milk and tofu[J]. *The Food Industry*, 2015, 36(4): 4.]
- [65] 石彦国, 刘琳琳. 大豆蛋白与豆腐品质相关性研究进展[J]. *食品科学学报*, 2018, 36(6): 1–8. [SHI Y G, LIU L L. Research progress on correlation between soybean protein and tofu quality[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 36(6): 1–8.]
- [66] 宋莲军, 周宇锋, 乔明武, 等. 大豆组分对豆腐感官及质构的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2013, 47(1): 98–103. [SONG L J, ZHOU Y F, QIAO M W, et al. Effect of soybean components on sensory evaluation of tofu and quality and structure characters[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2013, 47(1): 98–103.]
- [67] TAY S L, PERERA C O. Physicochemical properties of 7S and 11S protein mixtures coagulated by glucono- $\delta$ -lactone[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 69(4): 139–143.
- [68] DAMAJANA D A, AFIFAH N, INDRIATI A. The effect of extraction method and types of coagulants on the results and physicochemical properties of tofu[J]. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 2020, 40: 677–682.
- [69] HUANG Z R, LIU H Y, ZHAO L Z, et al. Evaluating the effect of different processing methods on fermented soybean whey-based tofu quality, nutrition, and flavour[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 158: 113139.
- [70] ZHANG Q, WANG C Z, LI B K, et al. Research progress in tofu processing: From raw materials to processing conditions[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(9): 1448–1467.
- [71] HUANG Z R, HE W Y, ZHAO L Z, et al. Processing technology optimization for tofu curd by fermented yellow whey using response surface methodology[J]. *Food Sciences and Nutrition*, 2021, 9(7): 3701–3711.
- [72] TODA K, TAKAHASHI K, ONO T, et al. Variation in the phytic acid content of soybeans and its effect on consistency of tofu made from soybean varieties with high protein content[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(2): 212–219.
- [73] MUGNAI M L, THIRUMALAI D. Molecular transfer model for pH effects on intrinsically disordered proteins: Theory and applications[J]. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 2021, 17(3): 1944–1954.
- [74] EBERT S, KAPLAN S, BRETTSCHEIDER K, et al. Aggregation behavior of solubilized meat-potato protein mixtures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106388.
- [75] GUCKEISEN T, HOSSEINPOUR S, PEUKERT W. Effect of pH and urea on the proteins secondary structure at the water/air interface and in solution[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 590: 38–49.
- [76] LEE H W, LU Y Y, ZHANG Y Y, et al. Physicochemical and functional properties of red lentil protein isolates from three origins at different pH[J]. *Food Chemistry*, 2021, 358: 129749.
- [77] HOU Y C, YANG F, CAO J X, et al. Effects of hydrodynamic cavitation at different pH values on the physicochemical properties and aggregation behavior of soybean glycinin[J]. *LWT*, 2022, 163: 113615.
- [78] LIU G N, HU M, DU X Q, et al. Correlating structure and emulsification of soybean protein isolate: Synergism between low-pH-shifting treatment and ultrasonication improves emulsifying properties[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 646: 128963.
- [79] 徐红华, 丁瑞, 郭珊珊, 等. 低pH值条件下不同大豆蛋白组分聚合性能研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 380–386. [XU H H, DING R, GUO S S, et al. Comparative experiments of polymerization properties for different soybean protein components at low pH value[J]. *Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 380–386.]
- [80] OIZUMI K, IDOGAWA S, IWAMOTO Y, et al. Influence of pH on the colloidal stability of soymilk[J]. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaish*, 2016, 63(4): 142–149.
- [81] LI Y, WAN Y L, MAMU Y, et al. Protein aggregation and  $\text{Ca}^{2+}$ -induced gelation of soymilk after heat treatment under slightly alkaline conditions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107274.
- [82] TANG T T, LIU J, TANG S S, et al. Effects of soy peptides and pH on foaming and physicochemical properties of egg white powder[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2022, 153: 112503.
- [83] YOON W, GUNASEKARAN S, PARK J. Characterization of thermorheological behavior of Alaska pollock and Pacific whiting surimi[J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(7): 338–343.
- [84] CHAO W, HUA Y, CHEN Y, et al. Effect of temperature, ionic strength and 11S ratio on the rheological properties of heat-induced soy protein gels in relation to network proteins content and aggregates size[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 66: 389–395.
- [85] 蔡劲恺, 崔雅茹, 邱婷婷, 等. pH-超声复合处理对大豆分离蛋白凝胶性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(24): 209–218.

- [ CAI S K, CUI Y R, QIU T T, et al. Effect of pH-ultrasonic treatment on gelation of soy protein isolate[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(24): 209–218. ]
- [ 86 ] HERZ E M, SCHAFER S, TERJUNG N, et al. Influence of transglutaminase on glucono- $\delta$ -lactone-induced soy protein gels[J]. *ACS Food Science & Technology*, 2021, 1(8): 1412–1417.
- [ 87 ] MUREKATETE N, HUA Y, CHAMBA M V M, et al. Gelation behavior and rheological properties of salt-or acid-induced soy proteins soft tofu-type gels[J]. *Journal of Texture Studies*, 2014, 45(1): 62–73.
- [ 88 ] ZHAO Y Y, CAO F H, LI X J, et al. Effects of different salts on the gelation behaviour and mechanical properties of citric acid - induced tofu[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(2): 785–794.
- [ 89 ] YANG X Y, REN Y M, LIU H F, et al. Differences in the physicochemical, digestion and microstructural characteristics of soy protein gel acidified with lactic acid bacteria, glucono- $\delta$ -lactone and organic acid[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 185: 462–470.
- [ 90 ] 孟少华, 马相杰, 赵建生, 等. 热诱导大豆分离蛋白聚集对谷氨酰胺转氨酶交联乳液凝胶性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(3): 139–145. [ MENG S H, MA X J, ZHAO J S, et al. Effect of heat-induced soybean protein isolate aggregation on the properties of transglutaminase crosslinked emulsion gel[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(3): 139–145. ]
- [ 91 ] WEN C T, LIU G Y, REN J Y, et al. Current progress in the extraction, functional properties, interaction with polyphenols, and application of legume protein[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(4): 992–1002.
- [ 92 ] 杨岚, 成玉梁, 郭亚辉, 等. 热处理强度对大豆分离蛋白凝胶形成能力的影响[J]. *大豆科学*, 2018, 37(1): 141–148. [ YANG L, CHENG Y L, GUO Y H, et al. Effect of heat treatment conditions on gel formation ability of soybean protein isolate[J]. *Soybean Science*, 2018, 37(1): 141–148. ]