DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2017.12.007

# 促凝剂及小分子表面活性剂对大豆分离蛋白乳状液凝胶性质的影响

王革新[1]，徐 捷[2]，何志勇[2]，曾茂茂[2]，秦 昉[2]，陈 洁[*1,2]

（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 江南大学 食品科学与技术国家重点实验室，江苏 无锡 214122）

**摘要：**大豆分离蛋白乳状液凝胶在豆制品以及肉制品中有广泛的应用，因此如何提升乳状液凝胶的强度和持水性受到广泛关注。作者利用流变、质构和显微结构分析，详细研究了促凝剂、乳状液稳定性、小分子表面活性剂对于大豆分离蛋白乳状液凝胶强度和持水性的影响。结果表明，乳状液稳定性好的其凝胶强度与持水性也相对要好。对于促凝剂，硫酸钙与葡萄糖酸内脂混合凝胶要优于两者单独促凝的效果。当吐温 20 添加量小于体积分数 0.4%时，其能够减弱凝胶强度，体积分数高于 0.4%时，能够增强凝胶强度，但是持水性都是呈下降趋势。大豆卵磷脂对于凝胶强度没有明显的改善，但是对于持水性有明显的提高作用。

**关键词：**大豆分离蛋白；硫酸钙；葡萄糖酸内脂；大豆卵磷脂；乳状液凝胶

**中图分类号：**TS 202　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673—1689(2017)12—1269—07

# Effect of Coagulants and Small Molecular Surfactants on Gel Properties of Soy Protein Emulsion Gels

*WANG Gexin*[1]，*XU Jie*[2]，*HE Zhiyong*[2]，*ZENG Maomao*[2]，*QIN Fang*[2]，*CHEN Jie*[*1,2]

（1. School of Food Science and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. State Key Laboratory of Food Science and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

**Abstract：** The effects of the stability of soy protein emulsion，variety and amount of coagulants and small molecular surfactants on the structure and properties of soy protein emulsion gels were researched in detailed. Gel strength was determined by rheometer and texturalanalyzer. Gel structure was analyzed by Laser scanning confocal microscopy. Water holding capacity of gel were also determined. The results showed that better emulsion stability led to strongergel strength and better water-holding capacity. The strength and water-holding capacity of the gel induced by mixture of GDL and $CaSO_4$ were better than that of gel induced by individual GDL or $CaSO_4$.The addition ofTween 20 into emulsion was positive for the gel strength if the amount was higher than 0.4%(v/v). Adding Soybean lecithin into emulsion was benefit for the water-holding capacity of gel，whereasno

**收稿日期：**2015-09-10

**基金项目：**国家 863 计划项目(2013AA102200)。

***通信作者：**陈 洁(1969—)，女，江苏太仓人，工学博士，教授，博士研究生导师，主要从事食品加工与组分变化方面的研究。

E-mail：chenjie@jiangnan.edu.cn

**引用本文：**王革新，徐捷，何志勇，等. 促凝剂及小分子表面活性剂对大豆分离蛋白乳状液凝胶性质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2017，36(12)：1269-1275.

significanteffects on gel strength were observed.

**Keywords**: soybean protein isolate,glucono-δ-lactone,calcium sulfate,soybean lecithin,emulsion gel

大豆分离蛋白（Soybean Protein Isolate,SPI)由于其具有良好的乳化性、填充性以及凝胶性等性质,在食品中应用广泛。SPI 在肉制品中一般以乳状液性质添加,其凝胶能力和持水性能对肉制品品质影响巨大[1]。在豆制品等其他制品中,SPI 凝胶性也是最受重视的性质之一[2]。

SPI 的凝胶影响因素已经有相当充分的研究,SPI 可以通过热诱导、加促凝剂、酶法凝胶和利用交联剂凝胶等[3],影响因素包括蛋白质组成、温度、pH、离子强度等[4-6]。然而关于 SPI 乳状液的凝胶,相对研究较少。Chuan-He Tang 等[7]研究显示,在乳化后对 SPI 乳状液进行预热处理，导致葡萄糖酸内脂(GDL)和 $CaCl_2$ 诱导的凝胶强度增加,TGase 诱导的凝胶强度减弱。而 Xingyun Peng 等[8]研究发现,对乳状液进行预热处理会导致凝胶强度减弱。Fu Liu 等[5]研究发现,乳状液稳定性好的凝胶强度也要高于稳定性差的。上述研究显示,促凝剂、SPI 乳状液的稳定性、乳状液中小分子表明活性剂的种类和用量、大豆蛋白质本身的蛋白质结构与性质等都对 SPI 乳状液凝胶性质有影响，但影响 SPI 乳状液凝胶的因素和机制尚未透彻。

作者以 SPI 乳状液的凝胶性为主要研究对象,通过测定凝胶强度、持水性、弹性模量($G'$)和粘性模量($G''$)以及乳状液凝胶的微观结构等,来确定促凝剂、乳状液稳定性以及小分子表面活性剂对 SPI 乳状液凝胶性质的影响，以期为大豆蛋白在豆制品、肉制品以及其他相关体系中的应用提供一定的理论依据和实验基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

大豆分离蛋白：南通光合生物技术有限公司;金龙鱼大豆油;蔗糖、硫酸钙、大豆卵磷脂、吐温 20、二甲基硅油:均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司(中国,上海);葡萄糖酸-δ-内酯(GDL):Sigma 公司。

TA-XT plus 质构仪：美国 Beckman 公司;MARAⅢ流变仪:Haaker 公司;NS1001 L2K 高压均质机:意大利尼鲁索尔维公司;KMO-2basic 磁力搅拌器:广州仪科实验室技术有限公司;S3500 激光粒度分析仪:美国 Microtrac 公司;3K15 离心机:Sigma 公司;601 循环水浴锅:金坛市新航仪器厂;AL 系列分析天平：梅特勒-托利多仪器有限公司;JB5374-91 电子天平:梅特勒-托利多仪器有限公司;pH 计:梅特勒-托利多仪器有限公司。

### 1.2 方法

**1.2.1 SPI 乳状液制备** 将 SPI 溶于水,制成 8 g/dL 的溶液,pH 7.0,加入 4 g/dL 的蔗糖,使用循环水浴锅将大豆蛋白溶液加热至 90 ℃，保温 10 min 后加入体积分数 4%的大豆油,经过乳化、均质(二步均质 40~10 MPa),制作成 SPI 乳状液。

**1.2.2 SPI 乳状液凝胶的制备** 将样品放入相同规格的容器(4.3 cm×4.3 cm×4.2 cm)中,在 80 ℃加热 30 min,之后将凝胶置于冰水浴,迅速冷却至室温,并在 4 ℃冰箱放置过夜,用于凝胶性质的测定。

**1.2.3 不同促凝剂对 SPI 乳状液凝胶性影响** 取 40 mL SPI 乳状液,加入 0.175 g/dL $CaSO_4$ 与 0.25 g/dL GDL 或者 0.35 g/dL $CaSO_4$ 或者 0.5 g/dL GDL,按 1.2.2 制成凝胶,用于凝胶性质测定。

**1.2.4 SPI 乳状液稳定性对凝胶性质的影响** 取 1.2.1 乳化后的溶液分别进行 20、30、40、50 MPa 均质,分别测定 0 h 和 24 h 后的乳状液粒径。SPI 乳状液的粒径分布使用激光粒度分析仪进行表征,测量其体积平均粒径($d_{43}$),每组样品平行测定 3 次。

取 40 mL SPI 乳状液，加入 0.175 g/dL $CaSO_4$ 与 0.25 g/dL GDL,按 1.2.2 制成凝胶,用于凝胶性质测定。

**1.2.5 大豆卵磷脂、吐温 20 对 SPI 乳状液凝胶性质影响** 分别取体积分数 0.2%、0.4%、0.6%(v/v)的吐温 20,加入 SPI 溶液中,按 1.2.1 的方法制成 SPI 乳状液。

分别取 0.2、0.3、0.4、0.5 g/dL 的大豆软磷脂溶于 4%、10%的大豆油中，再加入 SPI 溶液中,按 1.2.1 的方法制成 SPI 乳状液。

取 40 mL SPI 乳状液，加入 0.175 g/dL $CaSO_4$ 与 0.25 g/dL GDL,按 1.2.2 制成凝胶,用于凝胶性质

测定。

**1.2.6 SPI 乳状液凝胶强度测定** 凝胶强度的测定参考王婵秋[9]的方法。将制备好的凝胶取出,室温下平衡 30 min,其凝胶强度通过质构仪进行测定。测试条件为:探头类型 P/0.5,测前和测试速度均为 1 mm/s,测后速度 10 mm/s,触发力 5 g,触发类型为自动,下压距离为 10 cm,数据采集速率 220 pps。凝胶强度用探头下压过程中的最大感应力(单位 g)来表示。每组样品平行测定 3 次。

**1.2.7 SPI 乳状液凝胶持水性测定** 测定方法依据 Xiong 等[10],略有改动。将凝胶样品放置到 50 mL 的离心管中,4 ℃、10 000 r/min 离心 10 min。每组样品平行测定 3 次。持水性(WHC)公式如下:

$$WHC(\%)=(W_t-W_r)/W_t\times100\%$$

式中,$W_t$ 为离心前凝胶体质量 (g),$W_r$ 为离心后凝胶溢出水的质量(g)。

**1.2.8 SPI 乳状液凝胶的弹性模量(G′)与粘性模量(G")测定** 利用流变仪,对大豆分离蛋白乳状液凝胶进行温度扫描。主要参数为:平板夹具直径 35 mm,最大应变力为 0.01,单频频率为 0.1 Hz,间隙 1 mm,以 5 ℃/min 的速率从 25 ℃升至 80 ℃,80 ℃保温 30 min,再以 5 ℃/min 的速率从 80 ℃下降到 25 ℃。测量过程中 G′和 G"随温度变化而变化。

**1.2.9 SPI 乳状液凝胶的激光共聚焦测定** 测定方法依据 Chuan-He Tang 等[7],略有改动。取 5 mL 的 SPI 乳状液,加入体积分数 0.1%的罗兰明 B 和体积分数 0.1%的尼罗红,分别染蛋白质和油相,混合均匀。加入促凝剂后取 20 uL 于单凹载玻片上,按 1.2.2 方法制成凝胶,用于测定。

激光共聚焦具体参数:使用 40 倍镜,扫描模式像素:1 024×1 024,扫描速度:200 Hz,尼罗红的激发波长为 488 nm,罗兰明 B 的激发波长为 552 nm。

**1.2.10 统计分析** 所用数据均为 3 次重复试验的平均值;采用 Statistix 软件中 LSD 方法进行数据显著性差异分析,图中标有相同字母表示数据间存在不显著差异($P>0.05$),标有不同字母表示有显著性差异($P<0.05$)。

## 2 结果与分析

### 2.1 SPI 乳状液稳定性对凝胶性质的影响

从表 1 可以看出,随着均质的压力增加,乳状液粒径逐渐减小。K.R. Kuhn 等[11]研究高压均质压力与均质次数对乳清蛋白乳状液稳定性的影响,结果表明,在少于 3 次均质时,乳状液粒径随着压力的增加而减小,然而在较高压力与多次均质下,乳状液会形成高相对分子质量聚集,使得乳化能力、稳定性下降。本研究结论与其一致,而 40 MPa 均质的乳状液稳定性最好。

表 1 不同高压均质 SPI 乳状液的平均粒径

Table 1 Average particle sizes of SPI emulsionsunder different high-pressure homogenization

| 均质压力/MPa | $d_{43}$/μm | |
|---|---|---|
| | 0 h | 24 h |
| 20 | 0.312±0.002 | 0.523±0.003 |
| 30 | 0.194±0.004 | 0.250±0.005 |
| 40 | 0.114±0.001 | 0.128±0.002 |
| 50 | 0.068±0.002 | 0.131±0.001 |

从图 1-2 可知,40 MPa 均质的乳状液凝胶强度与持水性要优于其他均质条件的凝胶,这一结果与 Fu Liu 等[5]的研究结果一致,即乳状液稳定性好的其凝胶强度、持水性都要优于稳定性弱的。

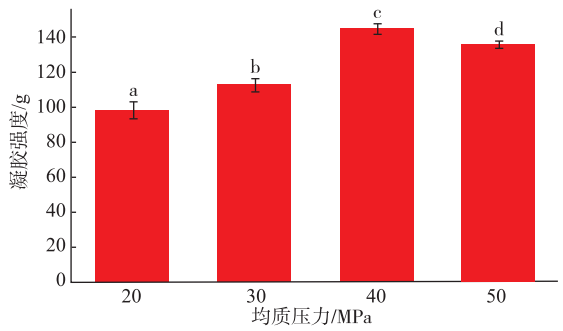



图 1 均质压力对 SPI 乳状液凝胶强度的影响

Fig. 1 Effect of high-pressure homogenization on gel hardness of SPI emulsion gels

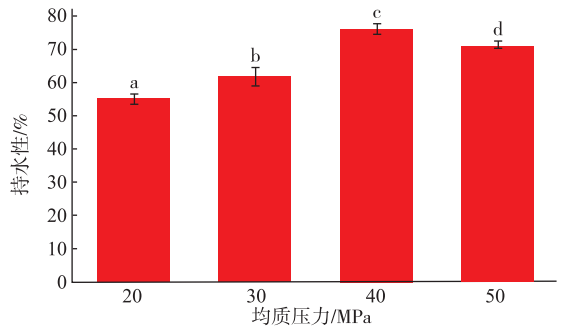



图 2 均质压力对 SPI 乳状液凝胶持水性的影响

Fig. 2 Effect of high-pressure homogenization on water-holding capacity of SPI emulsion gels

### 2.2 不同促凝剂对 SPI 乳状液凝胶性质的影响

由图 3–4 可知,混合诱导的凝胶强度要明显高于 GDL 和 $CaSO_4$ 凝胶强度。混合凝胶的持水性要高于 $CaSO_4$ 凝胶,GDL 的持水性介于两者之间,并没有显著差别。可能是由于 $CaSO_4$ 诱导凝胶的主导作用力是疏水作用和静电作用,氢键起辅助作用[12],而 GDL 诱导凝胶促使体系 pH 降低,在酸化凝胶过程形成共价二硫键,使得三维凝胶网络结构更加稳定[13]。但是也有文章报道过高浓度的 GDL 会引起过度酸化[14],同时也会对风味产生不好的影响。

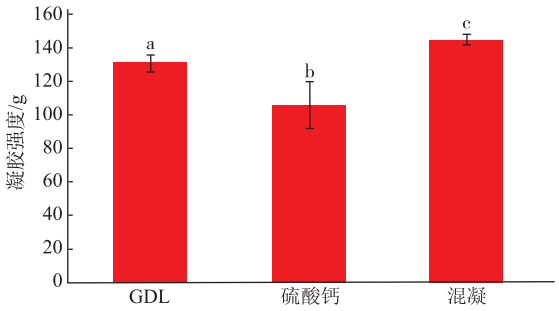



图 3 促凝剂对 SPI 乳状液凝胶强度的影响

**Fig. 3 Effect of different coagulants on gelhardness of SPI emulsion gels**

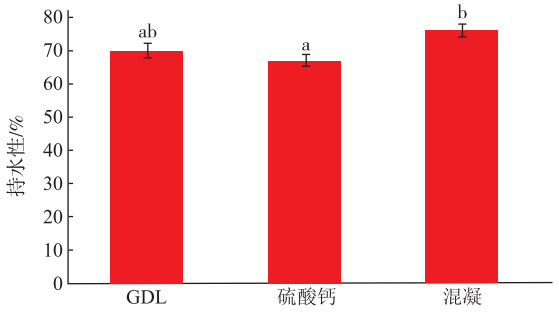



图 4 促凝剂对 SPI 乳状液凝胶持水性的影响

**Fig. 4 Effect of different coagulants on water-holding capacity of SPI emulsion gels**

图 5 为 3 种不同促凝方式的弹性模量($G'$)($G''$趋势与 $G'$一致,故未列出)。由图 5 可知,混合凝胶的 $G'$要略高于 GDL 的,与 $CaSO_4$ 促凝的有显著的差异。一般定义 $G'$值上升速率大于 0.5 Pa/℃或者 $G'$和 $G''$ 值相交叉时的温度为蛋白质的凝胶形成温度[15]。根据定义 GDL、硫酸钙、混合凝胶 3 种凝胶形成温度分别为 56、69、43 ℃,混合凝胶相对其他两者降低了凝胶温度。

3 种不同凝胶方式的激光共聚焦图见图 6(绿色为油滴)。可以看出,$CaSO_4$ 成胶体系的网络结构相对于 GDL 诱导和混合诱导的凝胶结构而言,有较大的空隙,这也有与凝胶强度、持水性相对较弱符合。

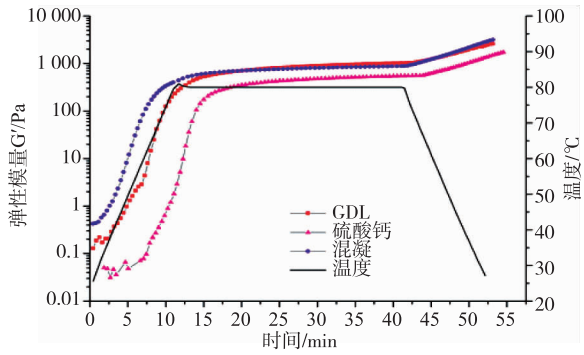


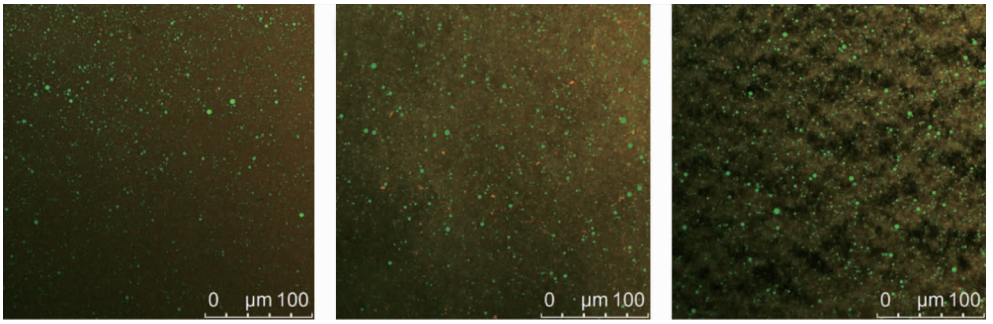

图 5 促凝剂对 SPI 乳状液凝胶弹性模量 G′的影响

**Fig. 5 Effect of different coagulants on storage modulus ($G'$) of SPI emulsion gels**

### 2.3 小分子表面活性剂对 SPI 乳状液凝胶性质的影响

#### 2.3.1 吐温 20 对 SPI 乳状液凝胶性质的影响

Ring 等人[16]认为乳状液的凝胶取决于凝胶基质和填充粒子的性质,并且将填充粒子分为活性和非活性粒子两大类。Dickinson 等人[17]研究发现,活性填充粒子(乳清蛋白乳状液)能增强凝胶的网络结构,而非活性填充粒子(吐温 20)会弱化凝胶网络结构。如




(a) GDL凝胶 (b) 混合凝胶 (c) 硫酸钙凝胶

图 6 不同促凝剂诱导的 SPI 乳状液凝胶的激光共聚焦图

**Fig. 6 CLSM images of SPI emulsion gels induced by different coagulants**

图7 所示,SPI 乳状液的凝胶强度随着吐温 20 浓度的增加而增大,但是与空白组(不添加吐温 20)相比,在添加量小于 0.4%时,吐温 20 的添加使得凝胶强度减弱,这与 Dickinson 等人研究结果一致,但在添加量大于 0.4%后,吐温对 SPI 乳状液凝胶强度有增强的作用,这与 Dickinson 等人结果相反,可能原因是 Dickinson 研究时,吐温 20 添加量始终保持在 R=15(R 为表面活性剂与蛋白质的摩尔比)。

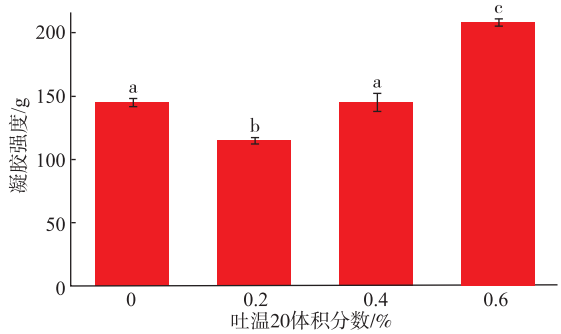



**图 7 吐温 20 对 SPI 乳状液凝胶强度的影响**

**Fig. 7 Effect of Tween 20 on gel hardness of SPI emulsion gels**

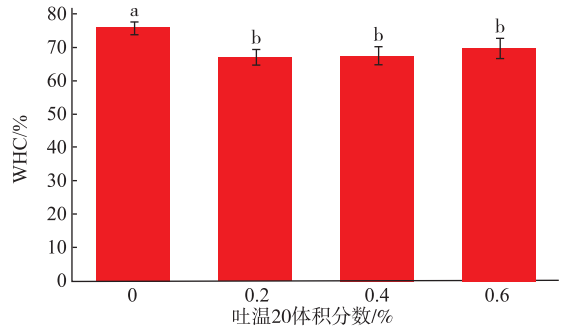



**图 8 吐温 20 对 SPI 乳状液凝胶持水率的影响**

**Fig. 8 Effect of Tween 20 on water-holding capacity of SPI emulsion gels**

图 8 为不同吐温 20 添加量对 SPI 乳状液凝胶持水性的影响,由图可知,添加吐温 20 导致持水性下降,且与体积分数无关。Sven Kerstens 等[18]研究吐温 20 对 β 乳球蛋白热凝胶时,发现吐温 20 的添加导致凝胶结构变得更粗糙。

### 2.3.2 大豆卵磷脂对 SPI 乳状液凝胶性质的影响

如图 9 所示,在不添加大豆软磷脂时,SPI 乳状液凝胶强度随着油体积分数的增加而增加。Xin Gu 等[19]研究不同种类油对 SPI 乳状液凝胶的影响,无论是固态油还是液态油,凝胶强度都随着油体积分数的增加而增加。

在大豆油体积分数较低(4%)的情况下,大豆卵磷脂对于 SPI 乳状液凝胶强度没有明显作用,且与体积分数也无关。但是在大豆油体积分数相对高(10%)的情况下,大豆卵磷脂会降低 SPI 乳状液的凝胶强度,也与体积分数无关。根据 Dickinson 等[17]研究表明,可能是因为在油体积分数比较低时,并没有起活性填充作用,但是在油体积分数较高时,大豆油增强凝胶网络结构,而大豆软磷脂的添加会促使部分油与大豆软磷脂结合,减弱填充作用,因此在油体积分数为 10%时,添加大豆软磷脂导致凝胶强度降低。

大豆卵磷脂对 SPI 乳状液凝胶的持水性有增强的作用。但是在低油(4%)时,大豆卵磷脂的添加量高于 0.4 g/dL 才会有作用,在高油(10%)时,0.2 g/dL 的大豆卵磷脂就有增强持水性的作用,见图 10。可能是由于大豆卵磷脂使得大豆分离蛋白与大豆油形成的凝胶网络结构更加紧致,增强了对水分的保持作用。

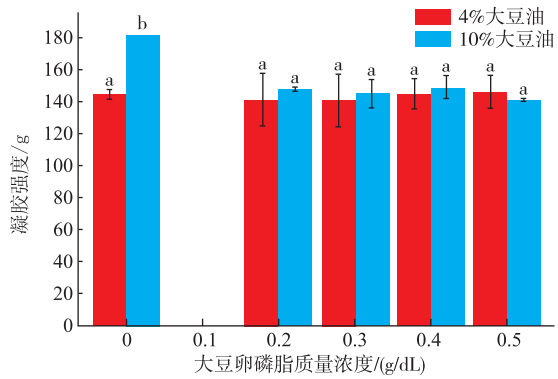



**图 9 大豆卵磷脂对 SPI 乳状液凝胶强度的影响**

**Fig. 9 Effect of soybean lecithin on gel hardness of SPI emulsion gels**

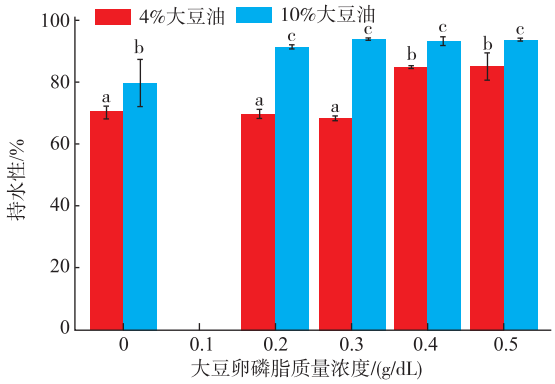
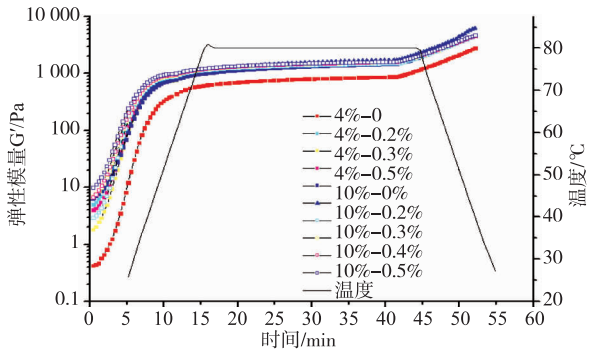



**图 10 大豆卵磷脂对 SPI 乳状液凝胶持水性的影响**

**Fig. 10 Effect of soybean lecithin on water-holding capacity of SPI emulsion gels**



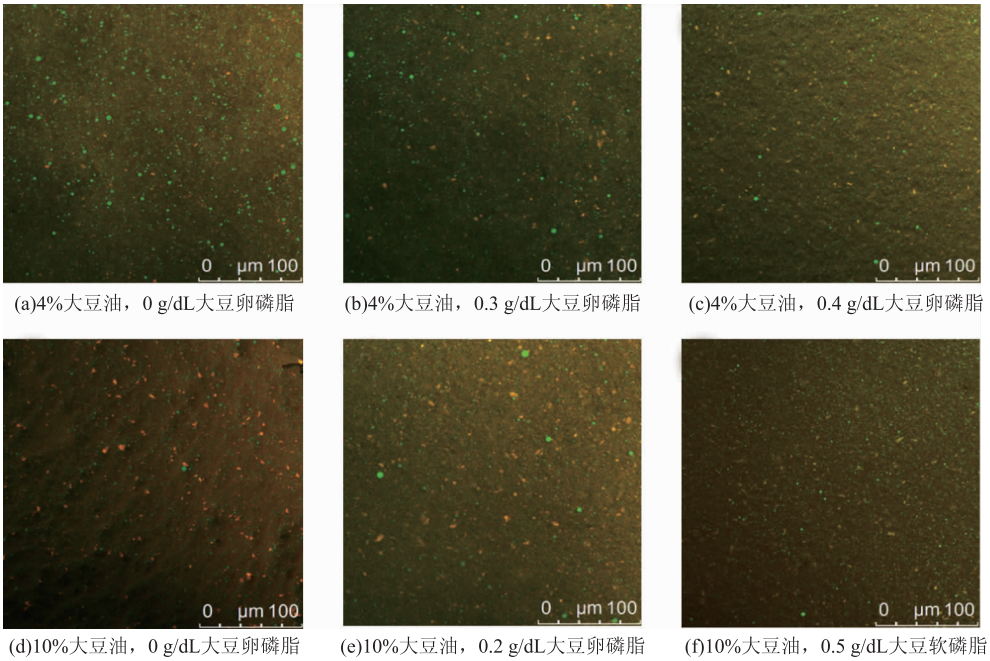

4%–0%表示大豆分离蛋白乳状液中，油的体积分数为 4%，大豆卵磷脂的质量浓度为 0 g/dL。

**图 11　大豆卵磷脂对 SPI 乳状液凝胶的弹性模量($G'$)的影响**

**Fig. 11　Effect of soybean lecithin on storage modulus($G'$) changes of SPI emulsion gels**

图 11 为不同油–大豆卵磷脂含量对大豆分离蛋白弹性模量($G'$)的影响。在不添加大豆软磷脂的时，$G'$随着油体积分数的增加而增加。在低油(4%)时，大豆卵磷脂的添加能提高 $G'$，但是与添加的质量浓度无关。在高油(10%)时，大豆软磷脂的添加使得 $G'$有所降低，同样与添加质量浓度无关，这与凝胶强度的结果相符。根据凝胶形成温度定义，含有大豆卵磷脂的大豆分离蛋白乳状液成胶温度都在 30 ℃左右，相对于不含大豆卵磷脂而言，降低了成胶温度。

由此可知，大豆分离蛋白凝胶强度与大豆油–大豆卵磷脂比例无关，无论是 4%还是 10%大豆油，只要体系中含有大豆卵磷脂，其凝胶强度基本无差异。从激光共聚焦图(图 10)可得到证实，图 b、c、e、f 结构相似(4%油与 0.2、0.5 g/dL 大豆卵磷脂，10%油与 0.3、0.4 g/dL 大豆卵磷脂与其他图相似，故文中未列出)。K.H. Kim 等[20]研究油滴粒径对水包油乳状液凝胶脆性的影响，结果表明凝胶脆性随着油滴粒径的增加而减小。而图 a 能看到较大的油滴存在，而图 d 油滴最小，这与凝胶强度结果相符。




(a)4%大豆油，0 g/dL大豆卵磷脂　(b)4%大豆油，0.3 g/dL大豆卵磷脂　(c)4%大豆油，0.4 g/dL大豆卵磷脂

(d)10%大豆油，0 g/dL大豆卵磷脂　(e)10%大豆油，0.2 g/dL大豆卵磷脂　(f)10%大豆油，0.5 g/dL大豆软磷脂

**图 12　不同大豆卵磷脂质量浓度的 SPI 乳状液凝胶的激光共聚焦图**

**Fig. 12　CLSM images of SPI emulsion gel**

## 3 结　语

SPI 乳状液稳定性对凝胶强度有促进作用，稳定性好的乳状液其凝胶强度、持水性都要高于稳定性弱的。GDL 和 $CaSO_4$ 混合促凝的 SPI 乳状液的凝胶性质要优于 $CaSO_4$ 促凝的，与 GDL 促凝没有显著的差别，但是混合凝胶所需的成胶温度为三者最低。在没有添加小分子表面活性剂时，SPI 乳状液的凝胶强度、持水性都随着油相比例的增加而增加。吐温 20 在低添加量(体积分数小于 0.4%)时，凝胶

强度减弱,在高添加量(体积分数大于0.4%)时,增强其凝胶强度,但是无论添加量多少,都使得持水性下降。大豆卵磷脂在低油体积分数(4%)时,对凝胶强度没有显著影响,在高油体积分数(10%)时,使得凝胶强度降低。但是无论低油还是高油,大豆卵磷脂对于凝胶持水性有促进作用。

## 参考文献:

[1] WANG Dan,LI Zhuowei,LIU Junmei,et al. Advances in preparation methods of soybean protein gel and its influencing factors [J]. **Farm Machinery**,2013,29:68-73.

[2] LIVNEY Y D,CORREDIG M,DALGLEISH D G. Influence of thermal processing on the properties of dairy colloids[J]. **Current Opinion in Colloid &Interface Science**,2003,8(4):359-364.

[3] YANG M,LIU F,TANG C H. Properties and microstructure of transglutaminase-set soy protein-stabilized emulsion gels[J]. **Food Research International**,2013,52(1):409-418.

[4] LINE V L S,REMONDETTO G E,SUBIRADE M. Cold gelation of β-lactoglobulin oil-in-water emulsions[J]. **Food Hydrocolloids**,2005,19(2):269-278.

[5] LIU F,TANG C H. Cold,gel-like whey protein emulsions by microfluidisation emulsification:rheological properties and microstructures[J]. **Food Chemistry**,2011,127(4):1641-1647.

[6] KERSTENS S,MURRAY B S,DICKINSON E. Microstructure of β-lactoglobulin-stabilized emulsions containing non-ionic surfactant and excess free protein:influence of heating[J]. **Journal of Colloid and Interface Science**,2006,296(1):332-341.

[7] TANG C H,LUO L J,LIU F,et al. Transglutaminase-set soy globulin-stabilized emulsion gels:Influence of soy β-conglycinin/glycinin ratio on properties,microstructure and gelling mechanism[J]. **Food Research International**,2013,51(2):804-812.

[8] PENG X,GUOS. Texture characteristics of soymilk gels formed by lactic fermentation:a comparison of soymilk prepared by blanching soybeans under different temperatures[J]. **Food Hydrocolloids**,2015,43:58-65.

[9] WANG Chanqiu,CHI Yujie. Influence of different chemical factors on gelatin property of soybean protein isolate[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**,2010(7):39-42.(in Chinese)

[10] XIONG Y L,BLANCHARD S P,MEANS W J. Properties of broiler myofibril gels containing emulsified lipids[J]. **Poultry Science**,1992,71(9):1548-1555.

[11] KUHN K R,CUNHA R L. Flaxseed oil-whey protein isolate emulsions:Effect of high pressure homogenization[J]. **Journal of Food Engineering**,2012,111(2):449-457.

[12] 孟旭. 方便豆腐粉微结构及其蛋白质溶解、凝胶机理的研究[D]. 无锡:江南大学,2006.

[13] ALTING A C,HAMER R J,DE Kruif C G,et al. Formation of disulfide bonds in acid-induced gels of preheated whey protein isolate[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2000,48(10):5001-5007.

[14] HORNE D S. Aggregation and gelation-factors influencing acid-induced gelation of skim milk[J]. **Special Publications of the Royal Society of Chemistry**,2001,258:345-351.

[15] RENKEMA J M S,KNABBEN J H M,VAN Vliet T. Gel formation by β-conglycinin and glycinin and their mixtures[J]. **Food Hydrocolloids**,2001,15(4):407-414.

[16] RING S,STAINSBY G. Filler reinforcement of gels[J]. **Progress in Food and Nutrition Science**,1982,6:323-329.

[17] DICKINSON E,CHEN J. Heat-set whey protein emulsion gels:Role of active and inactive filler particles[J]. **Journal of Dispersion Science and Technology**,1999,20(1-2):197-213.

[18] KERSTENS S,MURRAY B S,DICKINSON E. Confocal microscopy of heat-induced aggregation and gelation of β-lactoglobulin in presence of non-ionic surfactant[J]. **Food Hydrocolloids**,2005,19(3):625-633.

[19] GU X,CAMPBELL L J,EUSTON S R. Effects of different oils on the properties of soy protein isolate emulsions and gels[J]. **Food Research International**,2009,42(8):925-932.

[20] KIM K H,GOHTANI S,YAMANO Y. Effect of oil droplets on brittleness of o/w emulsion gel[J]. **Journal of Dispersion Science and Technology**,1997,18(2):199-210.