

# pH值偏移处理豌豆分离蛋白的胶凝性质

蒋 将<sup>1</sup>, 李开放<sup>1</sup>, 刘元法<sup>1,\*</sup>, 熊幼翎<sup>2</sup>

(1.江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2.肯塔基大学动物与食品科学系, 列克星顿 40546, 美国)

**摘 要:** 豌豆分离蛋白(PPI)经pH值偏移处理后, 高级结构的变化会导致其功能性质的变化。本研究针对pH值偏移处理前后豌豆分离蛋白胶凝特性的变化, 研究对比不同处理豌豆分离蛋白的最小胶凝质量浓度(MGC)、氨基酸组成、凝胶特性以及参与成胶的蛋白亚基。结果表明: pH值偏移处理改性后的PPI具有更低的MGC(从16g/100mL降低到14g/100mL)。与碱改性PPI对照组相比较, 添加0.1mol/L NaCl或者10mmol/L CaCl<sub>2</sub>的存在可以使凝胶强度明显提高, 分别高达4倍和9倍, 转谷氨酰胺酶(TG)和10mmol/L CaCl<sub>2</sub>的加入使凝胶强度提高11倍。为进一步揭示蛋白分子间相互作用的强弱, 对添加不同种类和浓度盐离子的溶胶体系进行频率(0.1~10Hz)扫描, 发现碱性pH值偏移处理PPI对溶胶体系 $G'$ 和 $G''$ 的提升与所形成的凝胶体系的强度有很好的对应关系。总之, 碱性pH值处理的蛋白由于分子内的作用力增强, 因此加热过程中形成更稳定的凝胶网络结构。

**关键词:** 豌豆蛋白; pH值偏移处理; 胶凝强度; 亚基组成; 流变动力学

## Gelation Properties of Pea Protein Isolate underwent pH-shifting Treatment

JIANG Jiang<sup>1</sup>, LI Kai-fang<sup>1</sup>, LIU Yuan-fa<sup>1,\*</sup>, XIONG You-ling L.<sup>2</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Department of Animal and Food Sciences, University of Kentucky, Lexington 40546, USA)

**Abstract:** The tertiary structure of pea protein can be modified by pH-shifting treatments to bring about enhanced functional properties. To exploit the application potential of pea protein isolate (PPI) as a novel protein ingredient, this research focused on the gelation properties of PPI under different processing treatments. The minimum gelling concentration (MGC) was reduced from 16 g/100 mL for native PPI to 14 g/100 mL after either acid (pH 1.5) or alkaline (pH 12) treatment. These three types of PPI were subjected to 0.1 mol/L and 0.6 mol/L NaCl or 5, 10 mmol/L and 20 mmol/L CaCl<sub>2</sub>, and the samples with 0, 0.1 mol/L NaCl and 10 mmol/L CaCl<sub>2</sub> were also treated with 0.1% microbial transglutaminase (TGase) to elucidate the effect of salts and TGase on gel strength. It was found that the pH 12 treatment markedly improved the PPI gel strength (up to 9 fold), and the presence of TGase further enhanced the gelling potential of PPI (by 11 fold) ( $P < 0.05$ ). Dynamic rheology tests showed greater shear storage ( $G'$ ) and loss ( $G''$ ) moduli for pH 12 treated PPI than for untreated SSP at all oscillatory frequencies tested (0.1—10 Hz), indicating stronger intermolecular interactions in the protein matrix of the thermal gels comprised of alkaline pH-treated PPI.

**Key words:** pea protein isolate; pH-shifting treatment; gelation strength; subunit composition; dynamic rheology

中图分类号: TS229

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)21-0010-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201321003

豌豆(*Pisum sativum* Linn.)又称麦豌豆、寒豆、麦豆、雪豆、毕豆、麻累、国豆、蚕豆等, 其种子富含淀粉(52%~55%)、蛋白质(23%~25%)、纤维素(8%~10%)、维生素及微量元素, 是人类食用历史最为悠久的作物之一<sup>[1]</sup>。我国对于豌豆的深加工并不多, 目前主要加工产品为豌豆淀粉, 而蛋白作为副产品往往仅用作饲料, 附加值不高<sup>[2]</sup>。究其原因, 一方面是豌豆深

加工规模相对不大, 还没有形成规模优势, 另一方面, 豌豆蛋白的功能性质较普遍应用的大豆蛋白有不少不足之处<sup>[3]</sup>。豌豆蛋白的亚基组成较大豆蛋白类似, 二维电泳结果及质谱信息表明豌豆中主要组成蛋白亚基为豆球蛋白(legumin)、豌豆球蛋白(vicilin)、豌豆伴球蛋白(convicilin)。其中豆球蛋白的酸性亚基和碱性亚基由二硫键连接<sup>[4]</sup>。由于豌豆蛋白含硫氨基酸较大豆的少, 故其胶凝性

收稿日期: 2013-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(30471225); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD28B04)

作者简介: 蒋将(1982—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为蛋白质结构与功能性质。E-mail: jiangjiang0909@gmail.com

\*通信作者: 刘元法(1974—), 男, 教授, 博士, 研究方向为油脂与植物蛋白。E-mail: foodscilyf@163.com

较差,最小成胶质量浓度达16g/100mL<sup>[5]</sup>。为了提高其凝胶强度,Sun Xiangdong等<sup>[6]</sup>采用0.3mol/L NaCl提取豌豆蛋白,得到的蛋白具有较好的胶凝性,然而较高的盐含量给工业生产带来了较大的负担。Taherian等<sup>[7]</sup>采用膜处理的方法去除高达68%的植酸,从而提高蛋白的凝胶特性。

随着人们对健康饮食的日益重视,以替代脂肪或肉类为目标的植物或微生物蛋白配料的研究开发不断受到重视。这类蛋白配料的主要目的在于改善最终产品的物理特性、营养、风味、烹饪效果以及降低生产成本。虽然豌豆分离蛋白(PPI)一直被认为是一种可媲美大豆分离蛋白(SPI)的植物蛋白配料,但关于豌豆蛋白或豌豆粉胶凝性的研究还不多<sup>[8-9]</sup>。而且,Su Yankun<sup>[8]</sup>以及Sun Xiangdong<sup>[10]</sup>等的研究已经发现PPI的凝胶强度普遍弱于SPI,这固然一定程度上可从一级结构上归因于其含硫氨基酸较少,对胶凝性不利<sup>[11]</sup>,Sun Xiangdong等<sup>[10]</sup>但通过改变其高级结构,提升其胶凝性也成为研究者的兴趣点;Ribotta等<sup>[12]</sup>采用酶水解而后交联的方法改善豌豆蛋白的凝胶性。本实验室前期研究发现经pH值偏移处理后,PPI乳化活性和乳化稳定性均有了显著的改善<sup>[13]</sup>,也引发我们对其胶凝特性研究的兴趣。

Jiang Jiang等<sup>[14]</sup>的研究发现pH值偏移处理因改变大豆分离蛋白的高级结构,使其呈现熔球态特征,蛋白分子间相互作用等增强提升了其成膜性能。同时,pH值偏移处理的SPI或其乳液与肌原纤维蛋白形成混合凝胶时,其强度均高于对应的天然SPI或其乳液与肌原纤维蛋白的混合凝胶的强度<sup>[15]</sup>。因此,pH值偏移处理在提升蛋白胶凝性方面具有重要的潜在价值。另一方面,转谷氨酰胺酶作为食品工业广泛应用的蛋白交联促进剂,它对于含硫氨基酸不丰富的PPI的胶凝形成作用也需要予以关注<sup>[16]</sup>。基于这两点考虑,本实验主要研究经pH值改性处理的PPI的胶凝特性,以期拓展其应用领域提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

豌豆产自新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州,2012年秋季收获。

盐酸、氢氧化钠 中国医药上海化学试剂公司;丙烯酰胺、*N,N'*-甲叉双丙烯酰胺(Bis)、 $\beta$ -巯基乙醇 美国Sigma公司;SDS-PAGE标准蛋白 美国Bio-Rad公司;TGase(TG-N, 100U/g) 泰兴市一鸣生物制品有限公司。

### 1.2 仪器与设备

J-26 XPI高速冷冻离心机 美国Beckman公司;ACPHA1-4冷冻干燥机 美国Labconco公司;FE20K pH计 梅特勒-托利多(上海)仪器公司;电泳仪、凝胶成像

仪 美国Bio-Rad公司;AR-G2旋转流变仪、TA.XT2i质构仪 美国TA Instruments公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 豌豆分离蛋白的制备及pH值偏移处理

采用Ramirez-Suarez等<sup>[17]</sup>的方法提取豌豆分离蛋白。采用蒋将等<sup>[15]</sup>的方法对所得豌豆蛋白进行pH值改性处理,具体步骤如图1所示。

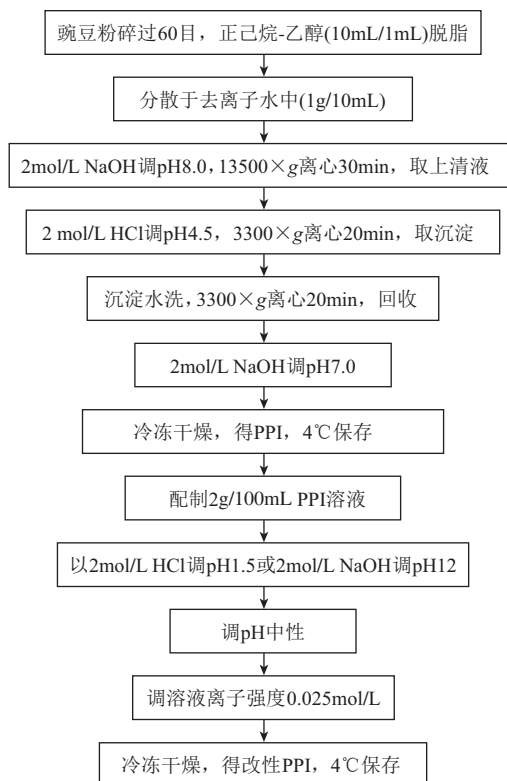


图1 豌豆分离蛋白制备及其pH值偏移处理改性

Fig.1 Preparation of pea protein isolate and its modification by pH-shifting

#### 1.3.2 氨基酸组成分析

称取一定量的蛋白于水解管中,加入6mol/L的HCl 8mL,充氮封口后于烘箱中水解24h,取出冷却转移至25mL容量瓶定容,过滤,离心,采用氨基酸分析仪测定氨基酸含量。

#### 1.3.3 不同PPI最小胶凝质量浓度(MGC)测定

最小胶凝浓度测定参考了O'Kane等<sup>[15]</sup>的方法。将按上述方法制备的PPI及pH值偏移处理改性的PPI配制成质量浓度6~20g/100mL(体积6mL)的蛋白溶液,所有样品置于10mL平底试管中,以Parafilm封口膜密封后于95℃水浴中保温10min,然后将样品冷却至室温,放置1h后存放于4℃条件下过夜。第2天将试管倒立,无液体流动的试管对应的最低质量浓度确定为最小胶凝质量浓度。同时,以玻璃棒搅拌不同体系,记录其感官特性。

#### 1.3.4 不同种类和浓度盐离子及其与TG对胶凝的复合作用

将3种豌豆分离蛋白配制成16g/100mL的溶液,分别

调节3种蛋白溶液,使其含0.1、0.6mol/L NaCl或5、10、20mmol/L CaCl<sub>2</sub>或0.1% TGase或同时含0.1mol/L NaCl+0.1% TGase、10mmol/L CaCl<sub>2</sub>+0.1% TGase。将各组蛋白溶液充分混匀,参考Sun Xiangdong等<sup>[11]</sup>的方法于40℃条件下保温30min,然后按前述方法加热形成凝胶。

对于溶胶体系流变性质研究,主要针对含有0.1、0.6mol/L NaCl或5、10、20mmol/L CaCl<sub>2</sub>的3种PPI蛋白溶液进行的,且流变性质分析在溶液配制后2h内完成。

### 1.3.5 流变学分析

凝胶体系的质构测定参考张涛等<sup>[18]</sup>的方法并做一定调整。将装有豌豆蛋白凝胶样品的100mL小烧杯放在质构仪的载物平台上,然后将 $d=5\text{mm}$ 的平端柱型探头装在其上,正对着烧杯的中间位置;由电脑控制探头下压到一定深度(15mm)来测定其凝胶强度及其他参数。测定参数:探头穿刺前速率:5mm/s;探头穿刺测试速率:1.0mm/s;最大位移:20mm;返回速率:5mm/s。凝胶强度定义为凝胶破裂时所需的最大力。质构分析至少重复5次。

对于上述溶胶体系,其流变学分析主要参考Sun Xiangdong等<sup>[11]</sup>的方法。具体地,针对豌豆蛋白溶胶的振荡剪切分析参数设置为:平板半径40mm,平板间距1.00mm,自动应力模式下对样品进行频率扫描:初始应力0.8Pa,目标应变2%。扫描频率范围0.1~10Hz,下底板的温度25.0℃,仪器校零后,添加适量样品,开始扫描并采集 $G'$ 和 $G''$ 数据。流变性质分析重复3次。

### 1.3.6 蛋白凝胶电泳分析

12%分离胶、5%浓缩胶,电泳采用1mm凝胶板,电泳样品用上样缓冲液配制蛋白质量浓度为2mg/mL,沸水加热3min,考马斯亮蓝染色,上样量10 $\mu\text{L}$ ,开始电泳时电流为20mA,待样品进入分离胶后改为40mA。

### 1.4 数据处理

实验得到的数据用Sigma Plot 11.0统计软件中的方差分析(ANOVA)程序进行分析。用LSD检验判别数据之间的差异性,显著差异用 $P<0.05$ 表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 酸碱处理对氨基酸组成的影响

含硫氨基酸,如半胱氨酸,通常作为添加剂添加到面粉中来提高面粉的韧性<sup>[19]</sup>。Huggins等<sup>[20]</sup>研究发现Cys可以通过促进S-S/SH的交换反应,提高蛋白的胶凝性。由图2可知,豌豆蛋白的含硫氨基酸含量明显低于大豆蛋白,亲水氨基酸,如:谷氨酰胺、精氨酸含量明显大于大豆蛋白。因此豌豆蛋白的氨基酸组成决定了其具有较差的胶凝性<sup>[21]</sup>。

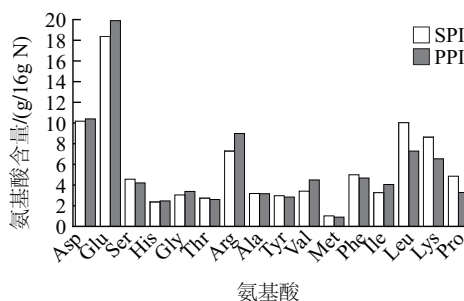


图2 大豆蛋白和豌豆蛋白的氨基酸组成比较

Fig.2 Comparison of amino acid composition in soy protein and pea protein

### 2.2 改性后豌豆分离蛋白最小凝胶强度的测定及凝胶特性

豌豆分离蛋白溶胶体系的热致胶凝受到多种因素的影响,比如蛋白质质量浓度、温度、加热速率以及体系pH值、盐的种类和浓度等<sup>[18]</sup>。其中蛋白质质量浓度在反映蛋白质内在结构变化引起功能变化方面具有较大的优势,因此,本研究首先考察不同豌豆分离蛋白的最小凝胶质量浓度。

表1 不同豌豆分离蛋白的最小胶凝质量浓度

Table 1 Minimum gelling concentration of different pea protein isolate

质量浓度/ (g/100mL)	天然冻干豌豆蛋白		酸改性冻干豌豆蛋白		碱改性冻干豌豆蛋白	
	凝胶	外观	凝胶	外观	凝胶	外观
6	—	液体	—	液体	—	液体
8	—	液体	—	黏稠	—	黏稠
10	—	黏稠	—	非常黏稠	—	黏稠
12	—	非常黏稠	—	非常黏稠	—	非常黏稠
14	—	非常黏稠	+	凝胶	+	凝胶
16	+	凝胶	+	凝胶	+	凝胶
18	+	凝胶	+	凝胶	+	凝胶
20	+	坚实凝胶	+	坚实凝胶	+	坚实凝胶

注:—,未形成凝胶;+,形成凝胶。

由表1可知,未改性的豌豆分离蛋白最小胶凝质量浓度为16g/100mL,而酸改性和碱改性的豌豆分离蛋白则可在质量浓度14g/100mL时形成凝胶。在形成凝胶前,天然豌豆分离蛋白在10g/100mL时才有明显的黏稠感,而改性豌豆分离蛋白在8g/100mL条件下已经产生明显的黏稠感。当蛋白质量浓度高达20g/100mL时,体系热处理后均可以形成坚实的凝胶体系。

### 2.3 离子强度和TG酶对凝胶强度的影响

热致胶凝时不同豌豆蛋白的MGC的差异,可能归因于经酸、碱改性的豌豆分离蛋白具有更松散的高级结构和内部基团的暴露。这导致在热处理时分子之间碰撞后发生强关联的几率大为增加,从而导致胶凝时所需的蛋白分子数量的减少<sup>[13,15]</sup>。

为了增加蛋白溶液的胶凝,往往会采用改变体系中盐离子浓度或添加转谷氨酰胺酶等方法。由表2可知,不同处理所得凝胶的胶凝强度有着非常明显的差别。总体



上, 酸改性组的胶凝强度弱于天然豌豆蛋白, 而碱改性豌豆蛋白的胶凝强度较相同处理的天然豌豆蛋白的高。这与酸、碱改性后豌豆蛋白的溶解度变化规律一致<sup>[13]</sup>。表明碱处理后溶解度的增加可能对其胶凝性的提升有帮助, 反之酸处理后溶解度的下降则对胶凝性不利。前期对酸碱处理后豌豆分离蛋白的还原SDS-PAGE和非还原SDS-PAGE的研究还发现, pH1.5和pH12.0改性处理后的PPI都存在因豆球蛋白(legumin)碱性亚基(B)和酸性亚基(A)以及部分豌豆球蛋白亚基的重新聚集, 生成可溶性大分子<sup>[13]</sup>。但这种重新聚合的方式可能有一定差异, 因此不仅导致二者溶解度存在差异, 更导致了胶凝性方面的显著差距。Jiang Jiang等<sup>[22]</sup>前期对大豆分离蛋白极端pH值偏移处理的研究也发现, pH12偏移处理后的大豆蛋白在室温下可以自发成膜, 而pH1.5处理和未处理的大豆蛋白成膜温度分别为50℃和70℃。这种不同pH值偏移处理导致蛋白成膜性的差异与胶凝性的差异呈现很好的一致性<sup>[15]</sup>。

表2 不同盐离子种类和浓度及其与转谷氨酰胺酶协作时豌豆分离蛋白的胶凝强度

Table 2 Gel strength of pea protein isolate with different ionic type and concentration as well as transglutaminase

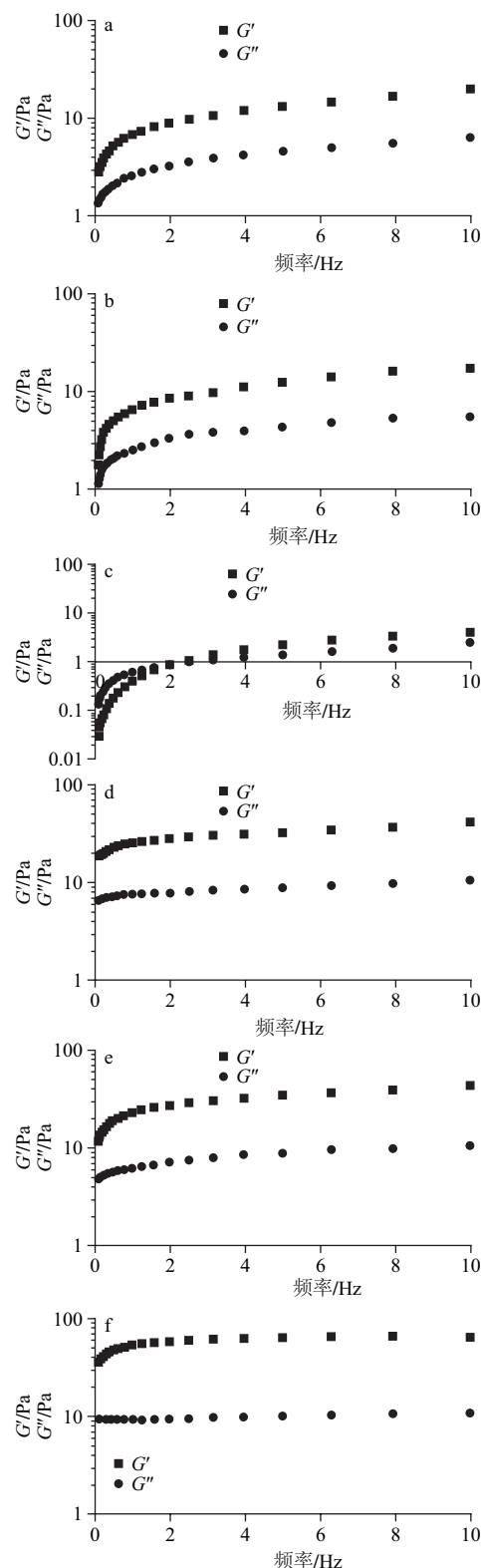
组别	天然豌豆蛋白	酸改性豌豆蛋白	碱改性豌豆蛋白
对照组	30.5±5.6 <sup>bc</sup>	14.2±2.9 <sup>a</sup>	43.7±2.1 <sup>c</sup>
0.1mol/L NaCl	93.2±10.4 <sup>d</sup>	85.2±6.1 <sup>d</sup>	195.5±14.4 <sup>b</sup>
0.6mol/L NaCl	11.0±3.6 <sup>a</sup>	41.4±7.0 <sup>c</sup>	48.9±3.7 <sup>e</sup>
5mmol/L CaCl <sub>2</sub>	197.5±10.8 <sup>b</sup>	94.6±5.1 <sup>d</sup>	290.4±11.6 <sup>j</sup>
10mmol/L CaCl <sub>2</sub>	241.5±12.1 <sup>i</sup>	108.4±4.3 <sup>de</sup>	386.2±20.8 <sup>k</sup>
20mmol/L CaCl <sub>2</sub>	95.7±17.1 <sup>d</sup>	23.4±2.3 <sup>b</sup>	53.6±15.2 <sup>e</sup>
0.1% TGase	107.4±3.8 <sup>de</sup>	21.2±4.0 <sup>b</sup>	121.8±12.5 <sup>f</sup>
0.1% TGase+0.1mol/L NaCl	214.6±13.2 <sup>b</sup>	137.9±15.2 <sup>f</sup>	367.5±26.1 <sup>k</sup>
0.1% TGase+10mmol/L CaCl <sub>2</sub>	412.4±12.3 <sup>kl</sup>	156.2±9.7 <sup>g</sup>	528.7±22.6 <sup>m</sup>

注: 字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

不同种类和浓度的离子对胶凝性的影响有着很大的差别。由表2可知, 二价阳离子在增加蛋白胶凝性方面具有非常突出的优势, 相比其他添加盐离子或0.1% TGase的豌豆蛋白溶液, 10mmol/L CaCl<sub>2</sub>对体系胶凝强度的提升最为明显。不管是Na<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>, 其浓度过高时均会导致体系局部过度胶凝, 反而使得其质构皱缩, 胶凝强度下降。

利用TGase处理是增加蛋白胶凝性的最常用的方法之一。由表2可知, 通过TGase和不同浓度的盐离子复合制备蛋白凝胶, 可以明显提高蛋白凝胶的强度和持水性<sup>[23-24]</sup>。特别是天然豌豆蛋白经0.1% TGase+10mmol/L CaCl<sub>2</sub>复合处理、碱处理豌豆蛋白经0.1% TGase+0.1mol/L NaCl或0.1% TGase+10mmol/L CaCl<sub>2</sub>这两种复合处理后所得到的热致凝胶具有令人满意的强度。在转谷氨酰胺酶(TGase)协同作用下形成的凝胶, 与碱改性PPI对照组相比较, 添加0.1mol/L NaCl或者10mmol/L CaCl<sub>2</sub>的存在可以使凝胶强度明显提高, 分别高达4倍和9倍, TG酶和10mmol/L CaCl<sub>2</sub>的加入使凝胶强度提高11倍。

## 2.4 溶胶体系的流变学特性



a. 对照; b. 0.1mol/L NaCl; c. 0.6mol/L NaCl; d. 5mmol/L CaCl<sub>2</sub>; e. 10mmol/L CaCl<sub>2</sub>; f. 20mmol/L CaCl<sub>2</sub>。

图3 不同盐离子种类和浓度对BPPI溶胶体系流变性的影响

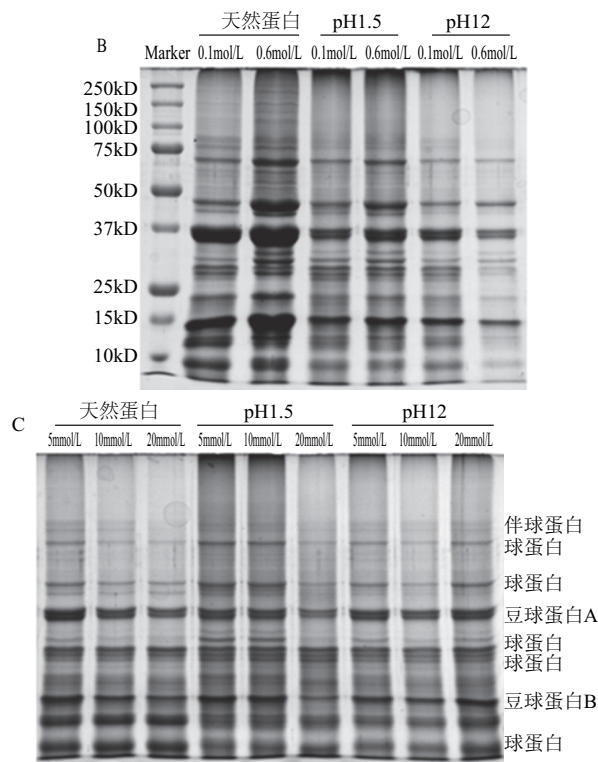
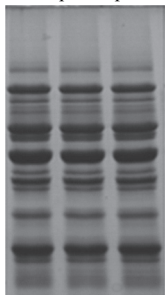
Fig.3 Effect of different ion type and strength on rheology property of BPPI solution

在发生热致胶凝前,溶胶体系的流变性质往往对形成的凝胶有很大的影响。图3以碱处理的PPI为例,测定了添加不同浓度的NaCl和CaCl<sub>2</sub>的溶胶体系的流变性,结果表明16g/100mL的BPPI(碱处理豌豆蛋白)溶胶体系在室温下显示出更强的弹性( $G' > G''$ ),添加低浓度NaCl和CaCl<sub>2</sub>对此特征没有明显影响,但加入CaCl<sub>2</sub>的体系, $G'$ 和 $G''$ 均大幅增加,体系黏稠且有较好的弹性。这主要归因于高价阳离子在带有负电的蛋白分子间所发挥的桥梁作用。高浓度NaCl的加入,由于盐析作用导致相当量蛋白的析出,因而体系的 $G'$ 和 $G''$ 量均显著下降,而且在低频率振荡时体系黏性略强于弹性。对比Sun Xiangdong等<sup>[10]</sup>盐提豌豆蛋白的胶凝性研究, $G'$ 随频率增加而显著增加,同时损耗角( $G''/G'$ )则处于0.2~0.3之间,碱改性豌豆蛋白在几种盐溶液中形成的体系也应归为弱凝胶体系。不同溶胶体系的黏弹性与热致凝胶的强度也有较好的对应关系,说明在pH值偏移处理豌豆蛋白所制备的溶胶体系中,流变性质可以作为胶凝特性的有效参考。

### 2.5 改性处理后离子强度对蛋白亚基的影响

含有不同处理PPI的凝胶经过离心后的上清液中含有一定的溶出成分,通过电泳可检测这些未参与形成凝胶的亚基的组成情况。由图4可知,形成凝胶前,未经处理的PPI显示出豌豆蛋白的主要亚基,pH值偏移处理的蛋白AB复合体明显减少,同时电泳胶的顶部形成更多大分子聚集体,这说明pH值偏移处理可以打断连接AB亚基原有的二硫键,并形成新的二硫键,该结果与偏移处理后大豆蛋白具有相同现象<sup>[25]</sup>。成胶后,凝胶的上清液中AB亚基均消失。对于含有0.1mol/L和0.6mol/L NaCl的蛋白胶,0.1mol/L NaCl存在条件下更多的亚基参与蛋白成胶,对应的凝胶强度(表2)也明显高于含有0.6mol/L NaCl的凝胶,pH值偏移处理后的蛋白,尤其是碱性pH值处理的,更多的参与成胶。对于含有不同CaCl<sub>2</sub>浓度的蛋白胶,随着CaCl<sub>2</sub>浓度的增加,凝胶强度呈现先增加后降低的趋势。pH12偏移处理后的蛋白更多的参与凝胶网络结构的形成,主要表现在电泳胶顶部聚集体的消失。

A 天然蛋白 pH1.5 pH12



A. 成胶前; B. 添加NaCl成胶后; C. 添加CaCl<sub>2</sub>成胶后;  
pH1.5. pH1.5偏移处理样品; pH12. pH12偏移处理样品。

图4 不同盐离子种类和浓度下形成凝胶前后的蛋白电泳

Fig.4 Electrophoresis pattern of squeezed solution from PPI gel with different level of ionic type and strength

### 3 结论

豌豆分离蛋白经酸、碱两种极端pH值偏移处理后,最小胶凝质量浓度都得到了一定程度的降低,反映出球蛋白结构二次折叠时的肿胀。然而在胶凝强度方面,二者有着十分显著的差别。碱改性的PPI表现出明显的优势,在存在低浓度NaCl(0.1mol/L)或适宜浓度的CaCl<sub>2</sub>(10mmol/L)的情况下,胶凝强度得到极为明显的提升,这在溶胶体系中则明显反映为 $G'$ 和 $G''$ 的同时显著增加。此外,溶胶体系经NaCl或CaCl<sub>2</sub>和TGase复合作用作用后,胶凝强度较对照体系提升7倍和11倍,大大提升了其应用价值。

### 参考文献:

- [1] 沙金华. 豌豆分离蛋白的制备、性质及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [2] LIANG Hanni, TANG Chuanhe. pH-dependent emulsifying properties of pea (*Pisum sativum* (L.)) proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(2): 309-319.
- [3] 梁晗妮, 唐传核. 豌豆蛋白的功能特性研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(12): 1640-1644.
- [4] SIRTORI E, ISAK I, RESTA D, et al. Mechanical and thermal pro-

- cessing effects on protein integrity and peptide fingerprint of pea protein isolate[J]. Food Chemistry, 2012, 134(1): 113-121.
- [5] O'KANE F E, VEREIJKEN J M, GRUPPEN H, et al. Gelation behaviour of protein isolates extracted from 5 cultivars of *Pisum sativum* L. [J]. Journal of Food Science, 2005, 70(2): 132-137.
- [6] SUN Xiangdong, ARNTFIELD S D. Gelation properties of salt-extracted pea protein isolate induced by heat treatment: effect of heating and cooling rate[J]. Food Chemistry, 2011, 124(3): 1011-1016.
- [7] TAHERIAN A R, MONDOR M, LABRANCHE J, et al. Comparative study of functional properties of commercial and membrane processed yellow pea protein isolates[J]. Food Research International, 2011, 44(8): 2505-2514.
- [8] SU Y K, BOWERS J A, ZAYAS J F. Physical characteristics and microstructure of reduced-fat frankfurters as affected by salt and emulsified fats stabilized with nonmeat proteins[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(1): 123-128.
- [9] PIETRASIK Z, JANZ J A M. Utilization of pea flour, starch-rich and fiber-rich fractions in low fat bologna[J]. Food Research International, 2010, 43(2): 602-608.
- [10] SUN Xiangdong, ARNFIELD D. Gelation properties of salt extracted pea protein induced by heat treatment[J]. Food Research International, 2010, 43(3): 509-515.
- [11] SUN Xiangdong, ARNFIELD S D. Gelation properties of myofibrillar/pea protein mixtures induced by transglutaminase crosslinking[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(2): 394-400.
- [12] RIBOTTA P D, ANDRÉS C, CRISTINA M R. Enzymatic modifications of pea protein and its application in protein-cassava and corn starch gels[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(1): 185-190.
- [13] 朱波, 蒋将, 李进伟, 等. 三种不同脂肪酸组成的油脂乳化液的理化性质研究[J]. 食品工业科技, 2003, 34(14): 103-107.
- [14] JIANG Jiang, XIONG Youling L., NEWMAN M C, et al. Structure-modifying alkaline and acidic pH-shifting processes promote film formation of soy proteins[J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1944-1950.
- [15] 蒋将. pH偏移处理诱导熔球态大豆蛋白的结构变化及功能性质的改善[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [16] 安静, 于国萍, 初云斌, 等. 转谷氨酰胺酶催化对不同大豆蛋白凝胶性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(6): 32-37.
- [17] RAMIREZ-SUAREZ J C, XIONG Youling L.. Effect of transglutaminase-induced cross-linking on gelation of myofibrillar/soy protein mixtures[J]. Meat Science, 2003, 65(2): 899-907.
- [18] 张涛, 江波, 王璋. 鹰嘴豆分离蛋白的胶凝性[J]. 食品科学, 2006, 27(8): 108-113.
- [19] ZHU Dan, LABUZA T P. Effect of cysteine on lowering protein aggregation and subsequent hardening of whey protein isolate (WPI) protein bars in WPI/buffer model systems[J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(13): 7970-7979.
- [20] HUGGINS C, TAPLEY D F, JENSEN E V. Sulphydryl-disulphide relationships in the induction of gels in proteins by urea[J]. Nature, 1951, 167: 592-593.
- [21] WONG D, THAVA V, LECH O. Synergistic enhancement in the co-gelation of salt-soluble pea proteins and whey proteins[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3913-3919.
- [22] JIANG Jiang, XIONG Youling L.. Extreme pH treatments enhance the structure-reinforcement role of soy protein isolate and its emulsions in pork myofibrillar protein gels in the presence of microbial transglutaminase[J]. Meat Science, 2012, 93(3): 494-476.
- [23] LI Chunqiang, XIONG Youling L., CHEN Jie. Protein oxidation at different salt concentrations affects the cross-linking and gelation of pork myofibrillar protein catalyzed by microbial transglutaminase[J]. J Food Sci, 2013, 78(6): C823-C831.
- [24] CHIN K B, GO M Y, XIONG Youling L.. Konjac flour improved textural and water retention properties of transglutaminase-mediated, heat-induced porcine myofibrillar protein gel: effect of salt level and transglutaminase incubation[J]. Meat Science, 2009, 81(3): 565-572.
- [25] JIANG Jiang, XIONG Youling L., CHEN Jie. pH shifting alters solubility characteristics and thermal stability of soy protein isolate and its globulin fractions in different pH, salt concentration, and temperature conditions[J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(13): 8035-8042.