

# 蛋白及脂肪含量对腐竹差异成膜的影响

臧茜茜<sup>1</sup>, 吴婧<sup>2</sup>, 潘思轶<sup>2</sup>, 徐晓云<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院油料作物研究所, 湖北武汉 430062)

(2. 教育部环境食品学重点实验室, 华中农业大学, 湖北武汉 430070)

**摘要:** 腐竹是我国历史悠久的传统的大豆制品之一。本文以提升腐竹产量、改善其机械性能及提升其营养价值为目标, 使用大豆分离蛋白及大豆油为原料, 采用人工模拟豆浆体系进行成膜实验, 研究蛋白含量、脂肪含量、蛋白变性程度及蛋白组分对腐竹成膜的影响。结果表明: 脂质含量的提高能提升成膜速度、增加膜弹性、提高成膜的蛋白和脂肪含量, 但是脂质的含量过高又会对以上指标产生一定的抑制作用。随着蛋白添加量的增加, 成膜速度会随之加快、膜的硬度增大、膜的蛋白含量增高、膜的脂质含量先增后减。蛋白变性程度提高能提升成膜速度, 改善膜的机械性能和营养价值。尽管蛋白组分的改变对成膜速度影响不大, 但是 11S/7S 直接影响膜的机械性能, 11S/7S 越高, 膜的机械性能越优秀。

**关键词:** 腐竹; 人工模拟成膜; 蛋白质; 脂肪

文章编号: 1673-9078(2015)6-129-135

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.6.021

## Effect of Protein and Lipid Content on Yuba Film-formation

ZANG Xi-xi<sup>1</sup>, WU Jing<sup>2</sup>, PAN Si-yi<sup>2</sup>, XU Xiao-yun<sup>2</sup>

(1.Oil Crops Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China) (2.Key Laboratory of Correlative Environment Dietology, Ministry of Education, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Yuba is one of the oldest traditional soybean products in China. The effects of protein and lipid content, denaturation and composition of protein on the film-forming process of yuba was studied in order to boost yuba production yield, improve its mechanical properties, and increase its nutritional content. A simulated soymilk system was employed with soybean protein extracts and soybean oil as raw materials. The results showed that the improvement of soybean lipid content could accelerate the film-forming rate, increase elasticity, and enrich the protein and lipid content of yuba. However, the addition of excess lipids had a negative impact on the variables mentioned above. The addition of protein increased the film-forming rate, hardness, and protein content of yuba, while the lipid content first increased and then decreased. High levels of denatured protein increased the film-forming rate, and improved the mechanical properties and nutritional value of yuba. Although different protein compositions had minimal effect on the film-forming rate, changing the 11S/7S ratio had a direct impact on the mechanical properties of yuba; specifically, a higher 11S/7S ratio led to better mechanical properties.

**Key words:** yuba; simulated soymilk system; protein; lipid

腐竹(yuba), 又称腐皮或豆腐皮, 是我国传统的大豆制品之一, 已有一千多年的历史。腐竹营养价值极高, 蛋白质含量约为 52%, 蛋白含量高且氨基酸种类多, 是极其优质的植物蛋白来源。腐竹脂肪含量为 24%, 其中以亚油酸为主要成分的不饱和脂肪酸含量高, 经常食用有调节血脂、清理血栓的作用<sup>[1]</sup>。

腐竹作为蛋白和脂肪的结合物, 其成膜的关键物质和成膜过程都会对腐竹的产率、特性及营养价值产生极大的影响。腐竹形成的实质是大豆蛋白质受热变

性的同时在空气/水界面, 或油/水界面产生吸热聚合作用, 豆浆中脂质被包埋在蛋白骨架之间<sup>[2]</sup>, 形成薄膜, 因此, 蛋白脂肪含量对腐竹成膜有极其重要的影响。Chen Y M 通过场发射扫描电子显微镜看到蛋白颗粒和可溶性蛋白是腐竹网络结构的结点, 而脂质包含在网络结构中<sup>[3]</sup>。为了更直观的研究蛋白脂肪成分与腐竹品质的影响, Wu & Bates<sup>[4-5]</sup>在研究红花油和磷脂对于腐竹成膜过程中的作用时, 人工设置了四组两组分体系进行模拟成膜研究脂质对成膜的影响作用, 结果显示无极性的脂质形成致密的疏水层, 被结合在极性非极性的蛋白质侧链之间。

目前国内腐竹的研究多集中于工艺的优化, 并没有对影响腐竹成膜的因素进行深入的探讨。本文采用人工模拟腐竹成膜体系, 从蛋白脂肪含量、蛋白变形

收稿日期: 2014-08-25

基金项目: 国家 863 科技计划项目 (2013AA102206)

作者简介: 臧茜茜 (1988-), 女, 硕士, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程  
通讯作者: 徐晓云 (1970-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 传统食品工业化及农产品精深加工技术研究

程度及蛋白组分的差异进行人工模拟, 结合腐竹的成膜特性、机械性能及营养价值等方面进行考量, 研究蛋白、脂肪的含量对腐竹成膜的影响。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 原料

大豆: 购于超市(2010年10月产自吉林敦化长白山立体宝库); 大豆分离蛋白(SPI): 日本不二公司; 大豆油: 益海嘉里(武汉)粮油工业有限公司。

### 1.2 主要试剂

浓硫酸、盐酸、硼酸、氢氧化钠、无水乙醚、硫酸铜、硫酸钾、考马斯亮蓝等均购于国药集团化学试剂有限公司。

### 1.3 主要仪器

恒温起皮锅: 自制, 恒温水浴锅, 常州国华电器有限公司, 内置 31 mm×31 mm 不锈钢槽, 用于盛装腐竹料液; 恒温鼓风干燥机, 上海精宏实验设备有限公司; 电子游标卡尺, 上海工具厂有限公司; 色度仪, 柯尼卡美能达有限公司; 质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; 电子天平, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; 磨浆机, 荷兰皇家飞利浦电子公司; 高速冷冻离心机, 美国 Beckman 公司。

### 1.4 试验方法

#### 1.4.1 脂质含量差异对腐竹成膜的影响

将 5 g 大豆分离蛋白分别与 1 mL、1.5 mL、2 mL、2.5 mL、3 mL 大豆油混合, 加入蒸馏水至 100 mL, 混匀, 获得 5 个相同蛋白质含量但不同油脂含量的浆液, 煮沸、均质, 然后将 5 个样品投入到 80 °C 起皮锅, 每 15 min 起皮(将浆液表面成的膜取出)一张, 自然晾干, 按照时间顺序, 对每一个样品进行编号。

#### 1.4.2 蛋白质含量差异对腐竹成膜的影响

将 2 mL 大豆油分别与 3 g、4 g、5 g、6 g、7 g 大豆分离蛋白混合, 加入蒸馏水 100 mL, 混匀后煮沸、均质。获得 5 个相同油脂含量不同蛋白质含量的样品, 将 5 个样品同时放入同一个 80 °C 起皮锅, 每 15 min 起皮一张, 自然晾干, 并分别进行编号。

#### 1.4.3 蛋白变性程度对腐竹成膜的影响

取大豆磨浆过滤, 搅拌均匀后, 将生浆等量分成 5 份, 分别对样品进行 20 °C、40 °C、60 °C、80 °C、100 °C 不同的温度加热处理。待 5 个样品达到恒温后, 将 5 个样品放入同一个 80 °C 起皮锅, 每 15 min

起皮一张, 自然晾干, 按照时间顺序进行编号。

#### 1.4.4 大豆蛋白的分离

大豆 11S 与 7S 球蛋白的分离工艺采用两步法进行<sup>[6]</sup>, 取一定量的大豆蛋白粉, 添加 15 倍的水, 使用 2 M HCl 调节 pH 值为 7.5, 9000×g 离心 20 min, 取上清液, 加入 NaHSO<sub>3</sub> (0.98 g/L), 使用 2 M HCl 调节 pH 值为 6.4, 4 °C 存放过夜后进行第二次蛋白提取, 6500×g 离心 20 min, 下层即为 11S。取上清液, 加入 NaCl 调节离子浓度 (0.25 M), 使用 2 M HCl 调节 pH 值为 5.0, 静置 1 h 后进行第三次蛋白提取, 9000×g 离心 30 min, 取上清液, 加入冰水稀释 2 倍, 使用 2 M HCl 调节 pH 值为 4.8, 6500×g 离心 20 min, 下层即为 7 S。将分离得到的 7 S 和 11 S 组分分别进行冷冻干燥得到粉末, -80 °C 储存备用。

#### 1.4.5 蛋白组分对腐竹成膜的影响

表 1 蛋白组分配比

Table 1 The different ratios of 7S and 11S globulin in the miscible

		liquids					
样品编号		1	2	3	4	5	6
7s/11s 比例		0/5	1/4	2/3	3/2	4/1	5/0
7s/11s 添加量/g		0/2	0.4/1.6	0.8/1.2	1.2/0.8	1.6/0.4	2/0

取大豆进行磨浆过滤。将生浆等量分装成 6 份。按照表 4 所示比例将 7S 和 11S 组分分别添加到生浆液中, 煮沸, 使 7S 和 11S 组分充分溶入豆浆中, 将 6 个样品同时放入 80 °C 起皮锅, 每 15 min 起皮一张, 自然晾干, 按照时间顺序进行编号。

#### 1.4.6 腐竹成膜特性指标的测定

##### 1.4.6.1 成膜速度 (g/15 min)

每 15 min 内腐竹成膜产量, 即等同为每 15 min 起一张腐竹膜的重量。

##### 1.4.6.2 成膜厚度 (mm)

选择自然晾干的平整均匀的膜, 用游标卡尺(精度为 0.01 mm)在待测膜上随机选取 5 个点精确测量厚度, 取其平均值。

##### 1.4.6.3 色度

选取新鲜起皮的平整均匀的膜, 在室温下干燥 30 min 后, 用色差仪测定其 L\*, a\*, b\* 值, 每张膜随机测定 5 个点, 然后取其平均值表示该腐竹皮的色度。

色度的测定使用 L\*a\*b\* 色空间来表示颜色。L\* 表示亮度, 0~100 之间是由黑色到白色的渐变; 数值越高则颜色越浅。a\* 代表绿红值, 正值为红色, 负值表示绿色; 数字绝对值越大表示颜色越深。b\* 表示蓝黄值, 正值为黄色, 负值代表蓝色; 数字绝对值越大表示颜色越深。

##### 1.4.6.4 机械性能

将自然晾干的腐竹充分复水(室温浸泡 0.5 h)后,裁成大小为 3.0 cm×9.0 cm 的长条,以长边三等分折叠成三层,用 TA-XT Plus 质构仪(英国 Stable Micro System 公司)做 TPA 试验。测试方法采用压缩式,具体参数设置:模式选择:TPA;探头选择:P/0.5;测前速度:5 mm/s;测中速度:2 mm/s;测后速度:2 mm/s;压缩比:50%;两次下压间隔时间:5 s。

质构仪与计算机的联通,在计算机界面上同时给出质构仪测定得到的曲线图谱,同时用相关软件进行分析研究,获得质构仪对样品相关参数的测定结果,硬度(Hardness)、黏着性(Gumminess)、回弹性(Resilience)。

### 1.4.7 腐竹营养成分的测定

#### 1.4.7.1 蛋白质含量

腐竹蛋白含量的测定采用凯氏定氮法。

#### 1.4.7.2 脂肪含量

脂质的测定采用索氏抽提法。

### 1.4.8 实验数据统计分析

所有实验至少重复三次,数据以平均值及标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,并采用 origin 8.0 画图软件进行数据处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 脂质对腐竹成膜的影响

#### 2.1.1 成膜速度

由图 1 可知,添加 1%~2%的样品成膜速度不断上升,添加了 2.5%和 3%的样品成膜速度远大于前三者。同时随着时间的增长,3%大豆油含量的样品成膜速度的增速相对其他样品来说最小。添加 1%和 1.5%大豆油的样品中脂质含量较低,成膜速度也较低,随着时间的增长,成膜速度一直呈现增长的趋势。添加了 2.5%和 3%的样品中脂质含量较高,初始成膜速度较高,随着时间增长成膜速率会与脂质含量较低的样品持平。由此可以看出,样品的脂质含量与腐竹的初始成膜速度成正相关,但是随着样品脂质含量的升高,成膜速度达到一定程度即不再增加。

由图 2 中样品第三张膜的成膜速度,可以看出脂质对成膜有促进作用。选取不同脂质含量样品中具有代表性的第三张进行横向比较,在第三张膜成形时,随着脂质含量的增高,腐竹的成膜速度先增后减。在蛋白含量一定时,脂质含量相对较高,成膜速度较快。但如果继续增高,会制约成膜速度的进一步增长。同时,在成膜过程中,时间越长,高浓度的脂质含量对成膜的制约越明显。

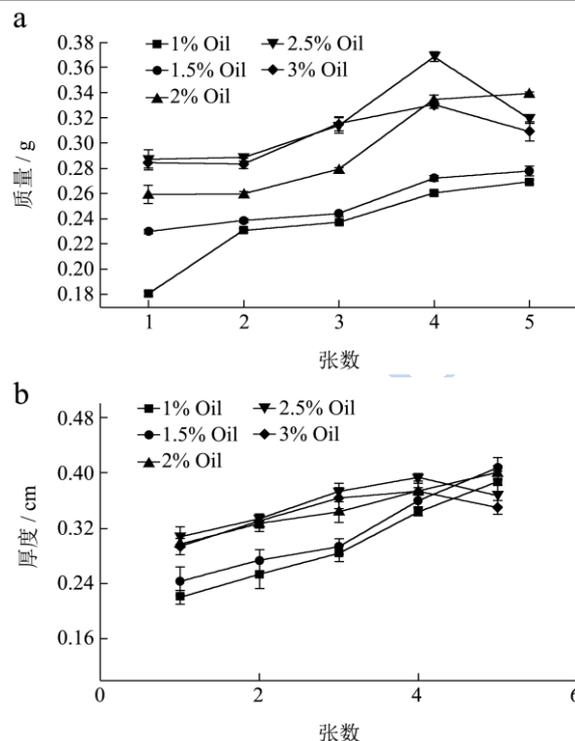


图 1 不同脂质含量对成膜速度(A)和成膜厚度(B)的影响

Fig.1 The effect of the lipid content on the formation rate(A) and thickness(B) of the film

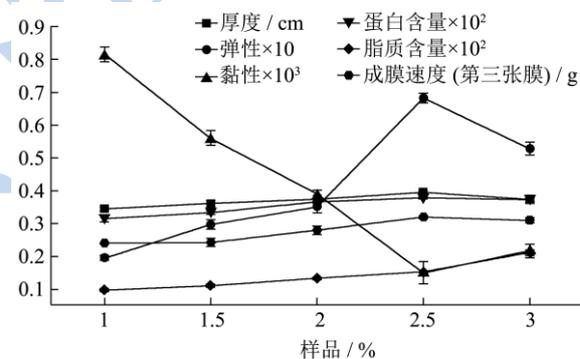


图 2 不同脂质含量对成膜速度(第三张膜)、成膜厚度、成膜黏性、成膜弹性、成膜蛋白含量和成膜脂质含量的影响

Fig.2 The effect of the lipid content on the formation rate (the third film), thickness, gumminess, resilience, protein content, and lipid content of the film

发生以上现象的原因是:在SPI/脂质的成膜过程中,形成一个蛋白脂质的网状结构<sup>[7]</sup>,在脂质逐渐增多时,在蛋白骨架中塞入脂质,能够形成良好的脂质蛋白质网状结构,键与键之间的结合较好,有利于膜结构的构架。所以在脂质增多时成膜速度有明显提升。而随着脂质加入量超过一定量之后,蛋白质分子间的键合作用被削弱,会影响蛋白骨架的形成,进而影响膜的形成,降低成膜速度。这是由于成膜过程中蛋白的参与度高于脂质。Wu等<sup>[4]</sup>研究发现腐竹膜的基本成分与冻干的豆浆成分基本一致,只是蛋白含量会偏高,

所以说腐竹的成膜过程简而化之就是蛋白的分离浓缩过程,所以随着成膜过程的推进,浆液中的蛋白份额相对越来越小,而脂质的份额会越来越大,脂质过高时会减缓成膜速度。

### 2.1.2 成膜厚度

图2显示了不同的脂质含量对膜厚度的影响,随着样品脂质含量的增加,腐竹的膜厚度呈现先增加后降低的趋势,说明过高的脂质含量也会抑制膜厚度增加。在浆液深度、蒸发面积都一定时,成膜速度的改变除了反映在膜重量上,也反映在膜厚度上。所以膜厚度差异的原因同成膜速度差异是一致的。

### 2.1.3 机械性能

由图2可以看出脂质含量也会显著影响膜的黏弹性。随着脂质含量的增多,膜的黏着性呈现先下降后增高的趋势,而回弹性呈现先增高后降低的趋势。这是由于蛋白质与脂质之间不是单一键键合,而是借助于弱共价键的相互作用而缔合。随着最初脂质含量的增多,蛋白与脂质之间网状结构形成良好,键键之间的键合能力强,膜的抗拉强度、伸长率都有提高,所以膜的黏性会相对较小、回弹性较高。但是脂质加入超过了一定量后,蛋白质分子间的键合作用被削弱,浆液中高含量脂肪会在膜表面形成脂质层,膜脂质层与蛋白质层应力不均匀,导致成膜受阻,机械性能变差。

### 2.1.4 营养成分差异

图2显示不同的脂质含量对膜营养成分的影响,由图可以看出随着浆液中脂质含量的增多,膜蛋白含量先增后减。这说明浆液中脂质含量的改变,不仅影响膜中的脂质含量,还会影响膜中蛋白质的含量。这是由于随着脂质的增多,加快成膜速度,促进膜结构的形成,浆液中的蛋白可以得到充分利用,以满足脂质填充的需求。当脂质含量超过一定值之后,浆液中蛋白含量相对较少,大量的脂质无法填充到蛋白骨架中,脂质层和蛋白层应力不均,阻碍蛋白骨架的形成,所以成膜中蛋白含量会略有下降。

随着浆液中脂质含量的增高,膜脂质含量明显上升,同时可以看到3%大豆油添加量样品中脂质含量极高。可能是由于浆液中脂质的增加促进成膜,造成起始阶段膜中脂质含量稳定上升,但是当浆液中的脂质超过一定量时,脂肪的疏水作用和蛋白的乳化作用增强,不利于蛋白分子内或分子间的相互作用。成膜结构发生改变,故而脂质含量极高。

## 2.2 蛋白质含量对腐竹成膜的影响

### 2.2.1 成膜速度

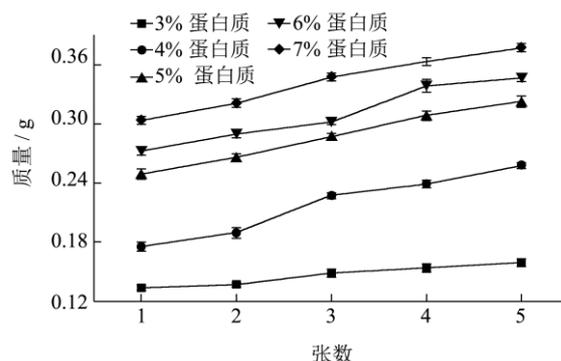


图3 不同蛋白含量对成膜速度的影响

Fig.3 The effect of the protein content on the film formation rate

由图3可知,随着浆液中蛋白含量的增长,成膜速度明显上升,而且随着时间的推移,成膜速度一直呈现持续上升状态。分别选取5个样品的第三张膜进行横向比较,从图4中可以直观的看出随着蛋白含量增加,成膜速度上升,但上升的速率逐渐减小。

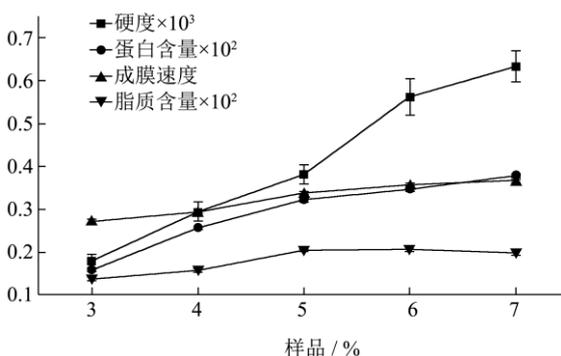


图4 不同蛋白含量对成膜速度(第三张膜)、成膜硬度、成膜蛋白含量、成膜脂质含量的影响

Fig.4 The effect of the protein content on the formation rate (the third film), hardness, protein content, and lipid content of the film

成膜速度增长说明蛋白质的含量直接影响膜的形成。大豆蛋白分子在浆液中的持续加热过程中发生蛋白变性,蛋白质原结构被破坏,肽链得到一定程度的伸展,内部基团暴露,分子间的相互作用会解离后重新形成,分子内部二硫键断裂后形成新的巯基,巯基在分子间再形成新的二硫键<sup>[7]</sup>,所以随着蛋白含量的增加,基团之间的相互碰撞几率加大,基团之间的相互交联作用加强,成膜速度也相应得到提高。随着蛋白浓度进一步的提高,大豆蛋白不能完全溶解在成膜液中,所以蛋白的利用率会下降,从而导致成膜速度的增长率不再提高<sup>[8]</sup>。在同一样品的连续起膜过程中,由于浆液中水分蒸发,蛋白质含量不断提升,所以对于同一样品随着时间的增长,会出现如图3中所示的成膜速度不断增大的趋势。

### 2.2.2 机械性能

图4中显示了不同的蛋白含量对膜机械性能的影响

响,由图可以看出随着蛋白含量的提升,膜的硬度呈现明显的上升趋势。这是由于在SPI/脂质的成膜过程中,由于加热导致蛋白质分子卷曲结构发生改变,分子内部的疏水基团、巯基暴露充分,促进新的疏水键、二硫键等的结合,形成新的网络结构,即有一定强度和拉伸力的膜<sup>[9]</sup>。随着浆液中蛋白含量的增长,参与反应的蛋白质也会增多,蛋白网络结构更易于形成且变得密集。而网络结构的好坏直接影响膜的性能,所以分子间相互作用力增强,形成的网络结构更加均匀,形成的薄膜也更为致密,有利于提升膜硬度。故而,随着浆液中蛋白含量的升高,膜硬度也在不断加强。

### 2.2.3 营养成分差异

图4显示不同的蛋白含量对膜营养成分的影响,由图可以得到:随着浆液中蛋白含量的提升,膜蛋白含量持续上升,上升幅度到后期会有减小,而脂质的含量在显著上升后会出现回落。原因是由于随着浆液中蛋白含量的增加,更多分子内部的巯基和疏水性氨基酸侧链残基等暴露在分子表面,构建蛋白骨架,所以随着浆液中蛋白含量的增多,参与成膜的蛋白含量会增长,故而膜蛋白含量会一直提升。由于腐竹的网络结构是蛋白包含脂肪类物质形成的,所以到当蛋白含量超过一定值时,虽然蛋白含量仍有提升,但没有充足的脂质填充会影响成膜,所以蛋白含量的增长幅度会变小。

图4中显示膜脂质的含量随着浆液中蛋白的增加而明显增加,因为蛋白含量是成膜的前提,所以蛋白含量直接影响膜中包含的脂质的含量,当蛋白骨架构建越多,其中包含脂质的空间越大,进而浆液中脂质的利用率会增大,所以膜脂质含量会明显增高。但随着蛋白含量的继续增加,脂质难以跟上蛋白骨架构建的速度,所以脂质在膜中的含量增长幅度会减小,同时蛋白含量的进一步增加会使蛋白骨架的构建越来越致密,脂肪的存在空间变小,所以在膜总重量增加的情况下,膜脂质的相对含量仍然出现减小趋势。

## 2.3 蛋白变性程度对腐竹成膜的影响

### 2.3.1 成膜速度

由于20℃变性的样品在前两张的起皮时间内起皮均不完全,无法形成完整薄膜。由图5中可以看出40℃和60℃变性的样品成膜速度明显加快,到第四张和第五张皮增呈现正常增长。80℃变性的样品比100℃变性的样品的成膜速度略小,因为前者中的变性蛋白含量低于后者。100℃变性的样品的后期成膜速度增长幅度较小,因为预处理变性完全,后期长时间高温水浴导致变性过度。由上述结论我们可以得知

80℃和100℃的处理条件较适宜于膜的形成,蛋白变性不完全几乎无法成膜,但长时间的超高温处理也会影响膜结构的形成。

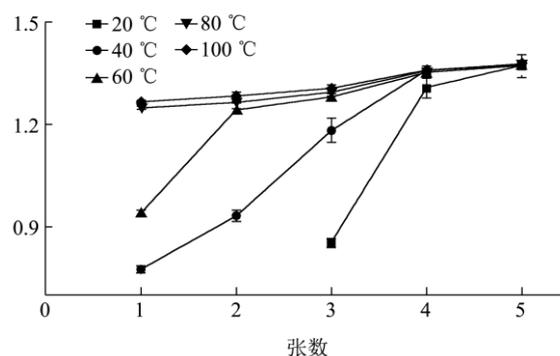


图5 不同蛋白变性程度对成膜速度的影响

Fig.5 Influence of protein denaturation on the film-forming rate

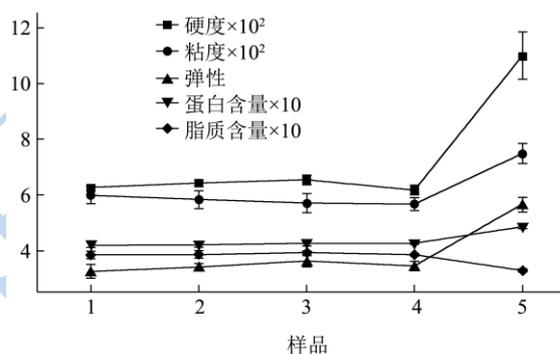


图6 不同蛋白变性程度对成膜硬度、黏性、弹性、蛋白含量以及脂质含量的影响

Fig.6 Influence of protein denaturation on the hardness, gumminess, resilience, protein content, and lipid content of the film

不同蛋白变性程度影响成膜速度是由于热处理对成膜有两方面作用:(1)促进溶剂蒸发,上部接触空气的蛋白质先失水变性易于与脂肪结合,分散在蛋白质溶液中的大量脂肪也随着蛋白质的失水干燥被夹在其中,蛋白质形成具有一定强度的膜<sup>[10]</sup>。同时,丢失水分还能使蛋白含量增高。(2)蛋白质变性,高温处理破坏蛋白分子间的相互作用,蛋白质分子间形成新的疏水键、二硫键等,从而形成较紧密的网络结构。因此,蛋白质适度变性是形成膜的先决条件<sup>[7]</sup>。温度过低大豆蛋白分子变性展开的程度受到限制,构建蛋白膜网络结构的-SH基团不能完全暴露在分子表面,多肽链间的二硫键交联得不到有效的形成。过高的温度同样会影响膜结构的形成,高温导致溶剂迅速蒸发,蛋白分子还没有进行分子间有序交联排列之前而过早的固定下来,直接影响到膜的性能。而且热处理温度过高、时间过长,蛋白质分子会过度变性,分子链大量断裂,不利于网络结构的形成。

### 2.3.2 机械性能

图6中显示的是对不同蛋白变性程度的样品中具有代表性的第四张膜进行机械性能的测定结果。由图中可以得知, 20~80 °C变性的样品在硬度、黏性和弹性上差异不大, 100 °C变性的样品有极高的硬度和弹性。实验结果说明蛋白的变性程度与成膜的机械性能有极大的影响。造成上述机械性能差异的原因是: 取第四张膜时, 20~80 °C变性的样品浆液均已达到稳定的80 °C, 所以四个样品在机械性能上基本没有差异。20~80 °C变性的样品的前处理温度均不高于80 °C, 而100 °C变性的样品经过煮沸处理。大豆蛋白中存在7S和11S组分在变性温度有较大差异, 7S的变性温度为77 °C, 11S的变性温度为92 °C。当热处理温度从升高至80 °C时, 20~80 °C变性的样品参与成膜的主要蛋白质为7S组分, 热稳定性较高的11S球蛋白仍未发生变性, 对交联网状结构的形成贡献不大。然而, 100 °C变性的样品中7S和11S都参与成膜, 同时11S的基团含有大量的巯基和二硫键, 有比7S强的交联能力, 所以, 样品5的机械性能明显高于前4个样品。

### 2.3.3 营养成分

图6显示不同蛋白变性程度对膜营养成分的影响, 由图可以看到: 20~80 °C变性的样品第五张膜的浆液基本处于相同状态, 由于前期起膜时随着变性程度的增加蛋白利用量依次增多, 所以浆液中蛋白含量按照变性程度的增加而依次减少, 但相差不大, 对成膜没有决定性的影响。但是100 °C变性的样品的11S全部变性, 可以参与到组成蛋白骨架中来, 所以其蛋白含量明显高于前四个样品。且由于蛋白含量高, 形成膜致密性好, 所以包含的脂质相对较少, 脂质也明显低于前四个样品。

浆液中参与成膜的蛋白含量增高, 蛋白骨架的构建增多, 本应增加脂质的包含空间, 脂质的含量应该增高, 但是脂质含量却相对较低, 因为参与成膜的蛋白组分为11S, 其参与凝胶的强度较大, 形成膜的致密度高, 所以脂质的包含空间反而下降, 因此脂质含量减少。这也说明11S组分在成膜过程中, 暴露的基团多巯基和二硫键较多, 有更好的凝胶能力。

## 2.4 蛋白组分对腐竹成膜的影响

### 2.4.1 成膜速度

由图7可以看出样品间的成膜速度差异不大, 6个样品的蛋白含量相同, 蛋白组分的差异对成膜速度影响不大, 所以成膜速度均没有明显差异。说明影响成膜速度的主要因素是蛋白含量。

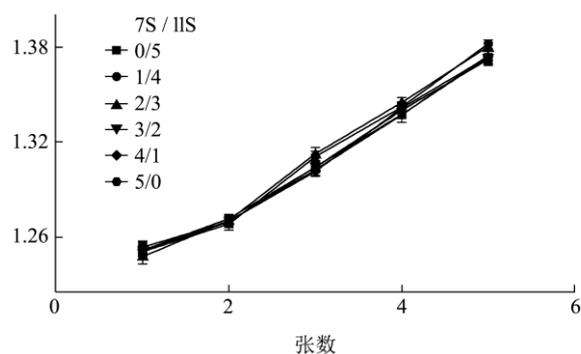


图7 不同蛋白组分对成膜速度的影响

Fig.7 Influence of the protein composition on the film-forming rate

### 2.4.2 机械性能差异

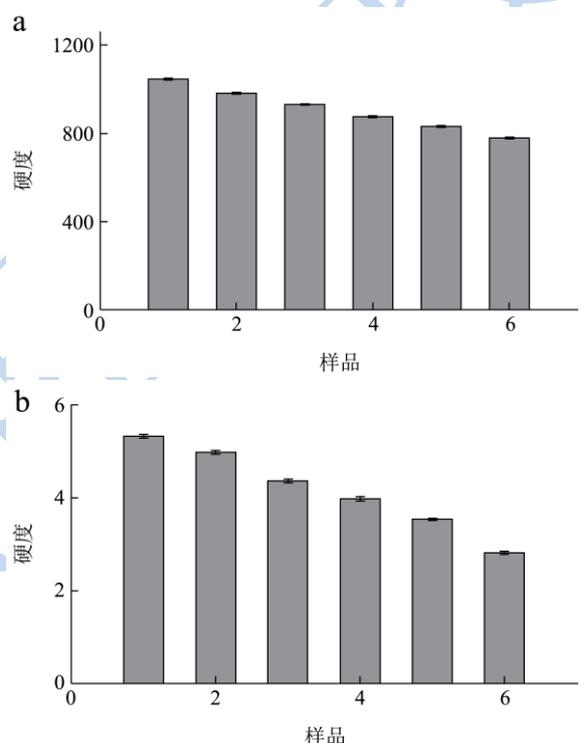


图8 不同蛋白组分对成膜硬度(a)和成膜弹性(b)的影响

Fig.8 Influence of protein composition on the hardness and resilience of the film

图8显示了不同蛋白组分对膜机械性能的影响。可以看到随着11S/7S的减小, 膜的硬度(A)和弹性(B)呈现减小的趋势。相同条件下11S所形成的凝胶强度要比7S大。11S是使大豆蛋白胶凝的主要组分, 7S是影响胶凝的重要组分<sup>[10]</sup>。所以11S/7S含量越高, 对应的膜抗拉强度就越大。同时大豆蛋白膜的机械性能大小受蛋白分子间二硫键、氢键和疏水作用影响。二硫键对蛋白膜空间网络的形成起主要作用, 因为11S球蛋白含巯基含量高于7S球蛋白, 所以分子间的结合能力及凝胶网络强度, 11S都优于7S。蛋白加热后, 亚基中多肽链展开, 拉伸成链状, 11S形成

的凝胶网络比 7S 的致密、均匀、交联度高,这使得腐竹的机械性能变强<sup>[10]</sup>。大豆 11S 球蛋白比 7S 球蛋白形成更多的氢键和疏水键,从而疏水作用强。有研究证实 11S 球蛋白在 100 °C 下如果增加蛋白浓度和延长加热时间,11S 球蛋白的凝胶变硬<sup>[11-12]</sup>。

### 3 结论

本文通过人工模拟成膜的方式,以成膜速度和成膜厚度、膜机械性能及膜的营养价值为考量标准,探究浆液脂肪含量、蛋白含量、蛋白变性程度、蛋白组分对腐竹成膜的影响。结果显示浆液中脂肪含量的适量增高会提升膜的成膜速度和成膜厚度,提升膜的回弹性,同时膜蛋白含量和脂肪含量均有所上升,这是由于脂质含量提高有利于脂质蛋白质网状结构的形成<sup>[7]</sup>;但是如果脂质含量过高,会削弱蛋白质分子间的键合作用,则导致成膜速度下降,机械性能回落及膜蛋白含量下降。浆液中蛋白含量的提升会加速基团的交联作用,从而加速腐竹成膜,提升膜硬度,同时膜蛋白脂肪含量会上升,但蛋白含量过高则会压缩脂肪填充蛋白骨架的空间使的膜脂肪含量降低<sup>[8]</sup>。蛋白的变性程度也直接影响成膜,蛋白质变性不充分或者过度变性都会影响成膜速度和膜的机械特性。蛋白组分的改变对成膜速度影响不大,但是 11S/7S 对机械性能有明显影响,11S/7S 越高,膜的机械性能越好。综上所述,蛋白质和脂肪作为腐竹的主要成分,二者的含量、比例及蛋白质的变形程度及组分均对腐竹成膜产生至关重要的影响。

### 参考文献

- [1] Borgstrom G. Principles of food science [M]. London, Collier-Macmillan Ltd, 1969, 2: 426
- [2] Shen Q, Zhang X J, Han Z, et al. Productivity properties of protein-lipid film (yuba) prepared from different soybean cultivars in China [J]. Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly, 2009, 43(1): 25-31
- [3] Chen Y M, Ono T. The mechanisms for yuba formation and its stable lipid [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(10): 6485-6489
- [4] Wu L C, Bates R P. Soy protein-lipid films. 1. studies on the film formation phenomenon [J]. Journal of Food Science, 1972a, 37(1): 36-39
- [5] Wu L C, Bates R P. Soy protein-lipid films. 2. optimization of film formation [J]. Journal of Food Science, 1972b, 37(1): 40-44
- [6] Nagano T, Hirotsuka M, Mori H, et al. Dynamic viscoelastic study on the gelation of 7S globulin from soybeans [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40: 941-944
- [7] Chen Y M, Yamaguchi S, Ono T. Mechanism of the chemical composition changes of yuba prepared by a laboratory processing method [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(9): 3831-3836
- [8] Kunte L A, Gennadios A, Cuppett S L, et al. Cast films soy protein isolates and fractions [J]. Cereal Chemistry, 1997, 7(42): 115-118
- [9] Shellhammer T H, Rumsey T R, Krochta J M. The viscoelastic properties of lipid film-forming materials [J]. Journal of Food Engineering, 1997, 33(3/4): 305-320
- [10] Delia A S, Jorge R W, Maria C A. Effects of Thermal Treatment of Soy Protein Isolate on the Characteristics and Structure-Function Relationship of Soluble and Insoluble fractions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43: 2471
- [11] Nakamura T, Utsumi S, Mori T. Interactions during heat-induced gelation in a mixed system of soybean 7S and 11S globulins [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1986, 50: 2429-2435
- [12] Shimada K, Matsushita S. Gel formation of soybean 7S and 11S proteins [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1980, 44: 637-641