

# 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶特性的影响

孙晓洋<sup>1</sup>, 耿军凤<sup>2</sup>, 潘春梅<sup>1</sup>, 张丽芬<sup>2</sup>, 陈复生<sup>2</sup>, 蒋守业<sup>3</sup>

(1. 河南牧业经济学院 食品与生物工程学院, 郑州 450046; 2. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001; 3. 国粮武汉科学研究设计院有限公司, 武汉 430079)

**摘要:**为考察高酯果胶对花生蛋白凝胶特性的影响机制,以冷榨花生饼为原料,采用超声辅助法提取花生蛋白,并添加高酯果胶制备花生蛋白凝胶,以碱溶酸沉提取花生蛋白制备的凝胶为对照,研究高酯果胶添加量对超声辅助提取花生蛋白凝胶质构、持水性、流变特性和微观结构的影响。结果表明:添加高酯果胶可显著提高超声辅助提取花生蛋白凝胶的硬度、弹性、内聚性和持水性;高酯果胶添加量为 1.0% 时,超声辅助提取花生蛋白凝胶的硬度、弹性、内聚性和持水性以及储能模量 ( $G'$ ) 和损耗模量 ( $G''$ ) 均达到最大值,且除持水性外,均大于碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的;超声辅助提取花生蛋白与高酯果胶产生静电相互作用,在加热和冷藏条件下形成均匀致密的凝胶网络结构,对比碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶,这种凝胶结构更为均匀致密。

**关键词:**花生蛋白;超声辅助提取;高酯果胶;凝胶;流变特性;微观结构

中图分类号: TS201.7; TS229 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)11-0038-07

## Effect of high methoxyl pectin addition on gel properties of peanut protein

SUN Xiaoyang<sup>1</sup>, GENG Junfeng<sup>2</sup>, PAN Chunmei<sup>1</sup>, ZHANG Lifeng<sup>2</sup>,  
CHEN Fusheng<sup>2</sup>, JIANG Shouye<sup>3</sup>

(1. College of Food and Biological Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China; 2. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. China Grain Wuhan Science Research and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430079, China)

**Abstract:** To investigate the effect of high methoxyl pectin (HMP) on the properties of peanut protein gels, peanut protein was extracted from cold-pressed peanut cake by ultrasound-assisted method (PPUAE), then peanut protein gels were prepared by adding HMP. The effects of addition of HMP on texture, water holding capacity, rheological properties and microstructure of peanut protein obtained by PPUAE gel were studied with alkali soluble and acid precipitation extracted peanut protein gel as a control. The results showed that the addition of HMP could significantly increase the hardness, elasticity, cohesion and water holding capacity of the PPUAE gel. When the dosage of HMP was 1.0%, the hardness, elasticity, cohesion, water holding capacity,  $G'$  and  $G''$  of the PPUAE gel reached the maximum value, and were greater than those of the alkali soluble and acid precipitation extracted peanut protein gel except for water holding capacity. PPUAE produces electrostatic interactions with HMP,

forming a uniform and dense gel network structure under heating and refrigeration conditions, which is more homogeneous and dense than the alkali soluble and acid precipitation extracted peanut protein gel.

**Key words:** peanut protein; ultrasound-assisted extraction; high methoxyl pectin; gel; rheological property; microstructure

收稿日期: 2022-08-06; 修回日期: 2023-09-13

基金项目: 河南省自然科学基金(222300420424); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U21A20270); 河南省青年骨干教师培养计划(2020GJS083)

作者简介: 孙晓洋(1981), 男, 讲师, 博士, 研究方向为油料油脂绿色加工技术(E-mail) xgsu2021@hnuah.edu.cn。

通信作者: 张丽芬, 副教授, 博士(E-mail) zhanglifeng2013@hotmail.com。

花生蛋白是一种高营养价值的植物蛋白,具有优良的持水性、乳化性和凝胶性功能特性<sup>[1]</sup>。凝胶性是蛋白的主要功能特性之一,可以改善食品的外观和质地<sup>[2]</sup>。然而,由于花生制油过程中高温蒸炒和脱溶会导致蛋白质发生不同程度变性,致使其凝胶性较差而限制其在食品工业中的应用和发展。为提高花生蛋白的凝胶特性,研究人员利用大分子多糖与蛋白质相互作用来改善蛋白凝胶的质构、流变特性和微观结构<sup>[3-6]</sup>。

果胶是一种来源广泛的天然水溶性多糖,所带负电荷可与蛋白质表面的正电荷结合,通过静电相互作用形成可溶性聚合物,使蛋白质的二级结构更加有序致密<sup>[7]</sup>。Zhang等<sup>[8]</sup>研究发现,果胶可以显著增强乳清蛋白的凝胶强度,并提高其持水性,而且复合物凝胶网络结构也更加均匀。Schreuders等<sup>[9]</sup>研究发现,果胶和纤维素与植物蛋白(豌豆分离蛋白和大豆分离蛋白等)混合物能够形成类似于肉类产品的纤维产品,添加碳水化合物(尤其是果胶)后可使植物蛋白产品糊状程度增强,而且加热还可增加弹性。由此可见,果胶与蛋白质利用静电相互作用进行结合形成更多的可溶性聚合物,可以改善蛋白的凝胶特性。前期研究发现,超声辅助提取可改善花生蛋白的乳化性和溶解性以及凝胶性功能特性,而且超声通过改变蛋白质亚基的聚集程度以及表面电荷的数量等来影响蛋白的凝胶特性。然而,高酯果胶对超声辅助提取蛋白凝胶特性影响的报道相对较少。

本实验以碱溶酸沉提取花生蛋白为对照,借助质构仪、流变仪和扫描电镜研究高酯果胶添加量对超声辅助提取花生蛋白的凝胶质构、流变特性和微观结构的影响,阐释高酯果胶和超声辅助提取对花生蛋白凝胶特性的影响机制,为利用果胶调控花生蛋白凝胶特性提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

冷榨花生饼〔水分(5.72±0.16)%,粗脂肪(6.82±0.23)%,蛋白质(46.07±0.05)%,灰分(4.08±0.02)%〕,购自青岛长寿食品有限公司;果胶(半乳糖醛酸≥74%),上海麦克林生化科技有限公司;谷氨酰胺转氨酶(TG酶),江苏一鸣生物股份有限公司;磷酸二氢钠、磷酸氢二钠等均为分析纯。

#### 1.1.2 仪器与设备

BS210S分析天平(0.1 mg),北京赛多利斯天平

有限公司;SCIENTZ-II D超声波细胞粉碎机,宁波新芝仪器有限公司;TDL-5-A离心机,上海安亭科学仪器厂;LGJ-25C冷冻干燥机,上海顶诺仪器设备有限公司;TA XT Plus质构仪,美国TA仪器有限公司;HAAKE MARS 60流变仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;Quanta FEG 250型场发射扫描电子显微镜,荷兰FEI公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 花生蛋白的制备

采用石油醚浸泡、真空干燥脱溶对冷榨花生饼进行脱脂。称取7 g脱脂冷榨花生饼并按照质量体积比1:10溶于磷酸盐缓冲液(0.02 mol/L, pH 8.5)中,利用实验室优化的超声条件(超声时间20 min,超声功率密度5.43 W/cm<sup>2</sup>,超声温度35℃)进行辅助提取一定时间后,离心(5 000 r/min, 20 min),上清液用1.0 mol/L HCl调节pH至4.5,静置30 min后离心(5 000 r/min, 20 min)。将沉淀物与蒸馏水按照质量体积比1:5混合均匀,移入透析袋在4℃蒸馏水中透析后,冷冻干燥得到花生蛋白。按照上述操作流程,去掉超声步骤,制备常规碱溶酸沉法提取的花生蛋白。

#### 1.2.2 花生蛋白凝胶的制备

利用磷酸盐缓冲液(0.02 mol/L, pH 7.5)配制质量分数为18%的花生蛋白溶液,并分别加入0%、0.5%、1.0%、2.0%和3.0%的高酯果胶,然后将混合溶液于室温下搅拌2 h。利用1 mol/L氢氧化钠溶液调节混合溶液pH至7.5,按照30 U/g添加TG酶后于40℃搅拌2 h,放置4℃冰箱过夜,将混合溶液分装于5 mL烧杯,然后放入90℃水浴中静置加热30 min,待凝胶形成后取出样品,以流动自来水迅速将其冷却至室温,贮存于4℃冰箱,静置过夜备用。

#### 1.2.3 花生蛋白凝胶质构的测定

采用TA XT Plus质构仪对花生蛋白凝胶的质构进行测试<sup>[10]</sup>。测定条件:蛋白凝胶圆柱体直径1.5 cm、高度2.0 cm,探头直径35 mm,测前速度2.0 mm/s,测试速度1.0 mm/s,测后速度1.0 mm/s,下压距离为凝胶高度的30%,两次测量时间间隔5.0 s,触发力10 g。

#### 1.2.4 花生蛋白凝胶持水性的测定

将花生蛋白凝胶置于5 mL离心管中并称质量( $m_1$ ),以转速1 000 r/min离心15 min(4℃)。倒置离心管以倾液体,用干燥滤纸吸除离心管内壁和凝胶样品表层液体,保持10 min,再次称质量( $m_2$ )。

持水性( $x$ )按下式计算<sup>[11]</sup>。

$$x = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

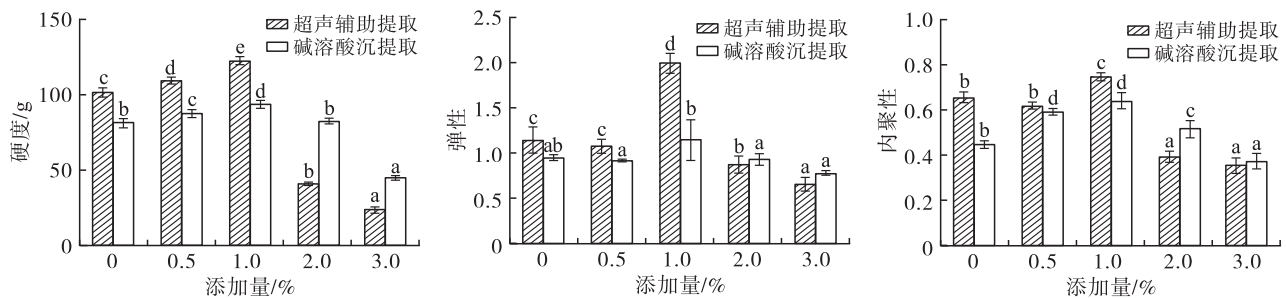
式中: $m_0$ 为离心管质量,g。

### 1.2.5 花生蛋白凝胶流变特性的测定

利用设定间距 1 mm 的 50 mm 平板夹具以恒定频率(1 Hz)和应变(1%)进行温度扫描<sup>[12]</sup>,设定初始温度 25 ℃,以 5 ℃/min 升温至 90 ℃并保持 30 min,然后降温至 25 ℃并保持 10 min,记录样品储能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )的变化。然后于 25 ℃、应变 1% 下进行频率扫描(0.1 ~ 10.0 Hz),记录样品  $G'$  和  $G''$  的变化。

### 1.2.6 花生蛋白凝胶微观结构观测

利用扫描电子显微镜观察花生蛋白凝胶的微观



注:同一提取方法中不同字母表示组内具有显著性差异( $p < 0.05$ )。下同

图1 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶质构的影响

由图1可知,高酯果胶添加量从0.5%增至1.0%时,超声辅助和碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的硬度均达到最大值,分别为122.42 g和93.55 g,较未添加高酯果胶时的101.69 g和81.20 g分别提高20.73 g和12.35 g,继续增加高酯果胶添加量至3.0%,两者则均呈现降低趋势。花生蛋白形成凝胶过程中主要受蛋白质和高酯果胶两种大分子物质所带电荷及两者间静电相互作用的影响<sup>[14]</sup>,调节高酯果胶和花生蛋白间的静电相互作用会发生高分子的络合或缔合作用<sup>[15]</sup>。高酯果胶添加量为0%~1.0%时,随着高酯果胶添加量的增加,超声辅助和碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的硬度逐渐增加,可能是由于凝胶形成过程中花生蛋白包裹的电荷逐渐暴露并与高酯果胶所带的负电荷产生了强静电作用<sup>[16]</sup>,使两者形成较稳定的复合物,超声辅助提取花生蛋白凝胶的硬度明显高于碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的,这可能是因为超声辅助提取过程使花生蛋白暴露更多的电荷,有利于与高酯果胶所带的负电荷形成较强的静电作用,从而使花生蛋白凝胶具有较高的硬度。高酯果胶添加量为1.0%~3.0%时,超声辅助和碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的硬度显著降低,可能是由于高酯果

胶添加量的增加使得花生蛋白与高酯果胶间的静电相互作用达到饱和,体系中存在的多余负电荷间产生了静电排斥作用,体系出现不相容现象,表现为液-液相(水相和复合物相)分离<sup>[17]</sup>,随着高酯果胶添加量增加,相分离现象更为明显。同时,相对于碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶,超声辅助提取花生蛋白凝胶的相分离现象相对较为明显,硬度更低,这可能由于超声辅助提取花生蛋白分子的非共价相互作用以及功能性基团暴露程度不同,还可能与超声辅助提取花生蛋白结构变得更加松散有关<sup>[18]</sup>。

### 1.2.7 数据处理

每组实验数据取3次结果的平均值,利用OriginPro 8.5软件绘图,使用SPSS(20.0)对数据进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶质构的影响

高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶质构的影响见图1。

由图1还可知:随着高酯果胶添加量的增加,超声辅助和碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的弹性和内聚性总体均呈现先增大后减小的趋势。高酯果胶添加量为1.0%时,超声辅助提取花生蛋白凝胶的弹性和内聚性均达到最大值,分别为1.98和0.74,明显高于碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的1.13和0.64。高酯果胶添加量从1.0%增至3.0%,超声辅助提取花生蛋白凝胶的弹性和内聚性下降速率明显高于碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的。

2.2 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶持水性的影响

高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶持水性的影响见图2。

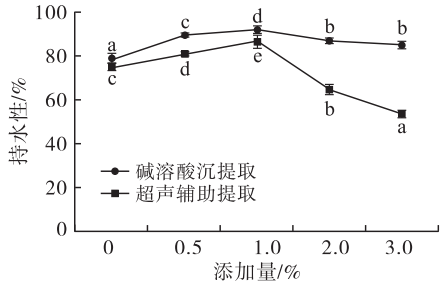


图2 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶持水性的影响

由图2可知,随着高酯果胶添加量的增加,超声辅助和碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的持水性呈现先增大后减小趋势,当高酯果胶添加量为1.0%时二者持水性达到最大值,分别为86.89%、92.12%,且均明显高于未添加高酯果胶的。高酯果胶添加量为1.0%时持水性达到最大的原因可能是此添加量下

高酯果胶与花生蛋白形成的凝胶网络结构排列致密,对水分的束缚能力最强。高酯果胶添加量超过1.0%时持水性下降,可能是凝胶体系发生了相分离<sup>[19]</sup>,花生蛋白聚集相体积增大,使得凝胶孔径增加,破坏了凝胶结构,使其持水性下降。同时,不同高酯果胶添加量下,超声辅助提取花生蛋白凝胶持水性较碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶持水性低,这可能与超声辅助提取花生蛋白凝胶微观结构较紧密,基质中存在未结合的过量水,离心后这些水被释放出来有关<sup>[20]</sup>。

### 2.3 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶流变特性的影响

温度扫描、频率扫描下不同高酯果胶添加量的花生蛋白凝胶流变特性的变化情况分别见图3、图4。

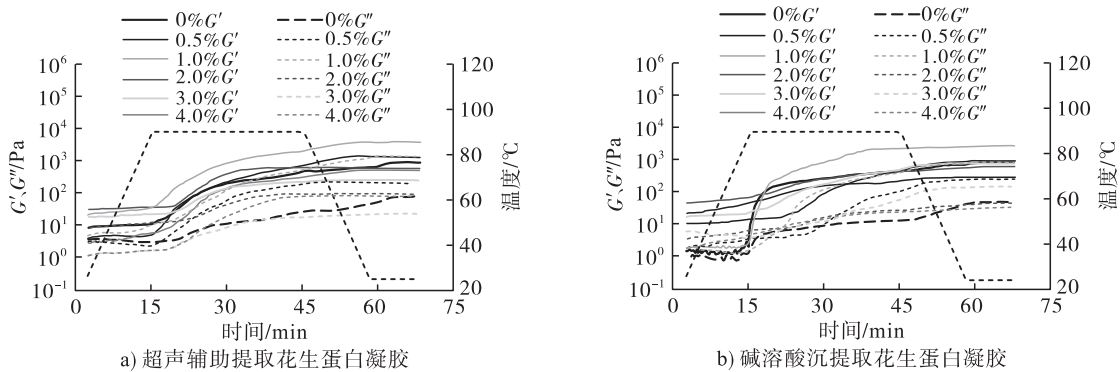


图3 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶  $G'$  和  $G''$  随温度变化曲线的影响

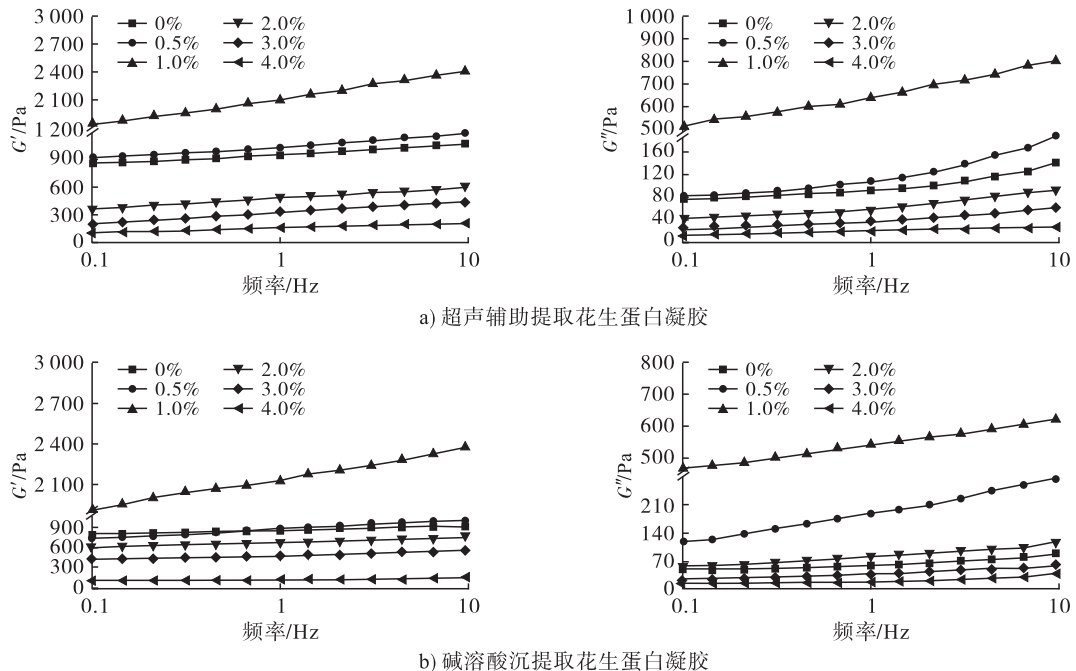


图4 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶  $G'$  和  $G''$  随频率变化曲线的影响

由图3可知,对不同高酯果胶添加量的花生蛋白凝胶进行温度扫描过程中,其  $G'$  始终大于  $G''$ ,且在高酯果胶添加量为1.0%时  $G'$  和  $G''$  均达到最大

值,这与2.1中凝胶质构测定结果一致,表明此时复合体系中静电相互作用最强。初始升温阶段,  $G'$  和  $G''$  变化不明显,此时高酯果胶与花生蛋白复合体系

内正负电荷分布不均衡,未能形成凝胶;当温度升至约 90℃ 时,  $G'$  和  $G''$  迅速升高,凝胶形成<sup>[21]</sup>,且随着时间延长凝胶网络结构逐渐稳定,曲线趋于平坦。当高酯果胶添加量大于 1.0% 时,  $G'$  和  $G''$  降低,这是因为体系中多余负电荷间产生排斥作用使蛋白质聚集,体系出现相分离不利于形成稳定的凝胶网络结构<sup>[22]</sup>。未添加高酯果胶超声辅助提取花生蛋白凝胶的  $G'$  变化趋势与添加高酯果胶凝胶的相似,并且适当的高酯果胶添加量可提高凝胶的  $G'$ ,说明高酯果胶可以促进花生蛋白形成致密、均一和高强度的蛋白凝胶网络结构<sup>[23]</sup>。超声辅助提取花生蛋白凝胶的  $G'$  高于碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的,这可能是由于超声产生的空化作用使花生蛋白暴露出更多的活性基团而有利于分子间的相互作用。同时,  $G''$  与  $G'$  变化趋势相似,说明其黏性变化行为与弹性的类似,而且  $G'$  始终大于  $G''$ ,说明花生蛋白凝胶弹性及凝胶状特性在黏弹性中占主导地位。

由图 4 可知,当高酯果胶添加量从 0% 增加到 1.0% 时,花生蛋白凝胶  $G'$  和  $G''$  增加,在高酯果胶添加量为 1.0% 时达最大值,且此时超声辅助提取花生蛋白凝胶的  $G'$  和  $G''$  高于碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的。这可能是因为超声辅助提取花生蛋白分子结构充分展开,体系产生更强的静电相互作用,在凝胶内部形成更牢固的网络结构<sup>[24]</sup>。高酯果胶添加量从 2.0% 增至 4.0% 时,花生蛋白凝胶  $G'$  和  $G''$  降低,且随着频率的增加,增长速率减缓,主要是因为过高的果胶添加量使复合体系内部的静电排斥作用引起蛋白质分子的聚集增大,导致凝胶结构较差,凝胶强度显著下降。

#### 2.4 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶微观结构的影响

图 5 为高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶微观结构的影响。由图 5 可知,未添加高酯果胶的花生蛋

白凝胶结构较为无序、网络稀疏和孔径大小不均匀,与其较差的凝胶硬度和持水性结果一致;高酯果胶添加量为 0.5% 时,比未添加高酯果胶花生蛋白凝胶的孔径更均匀,形成较为稳定的网络结构;高酯果胶添加量为 1.0% 时,超声辅助和碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的网络均表现出孔径分布均匀且排列致密,这可能是由于花生蛋白与高酯果胶之间存在的强静电相互作用而使凝胶形成较为稳定的三维结构<sup>[25]</sup>,同时,超声辅助提取花生蛋白凝胶网络结构比碱溶酸沉提取的更加均匀致密,这可能是由于超声辅助提取使花生蛋白发生解折叠而暴露出更多的功能性基团<sup>[26]</sup>,使花生蛋白与高酯果胶更容易结合形成较多可溶性聚集体,从而增强花生蛋白凝胶网络结构<sup>[7]</sup>,而这种稳定的网络结构也较好地解释了凝胶  $G'$  和  $G''$  的变化规律;继续增加高酯果胶添加量,花生蛋白凝胶微观结构发生显著变化,花生蛋白开始逐渐形成较大的聚集体,这使凝胶孔径变大、内部出现大量空洞和破损、表面变得较为粗糙,网络结构变得复杂、无序。对于超声辅助提取花生蛋白凝胶,当高酯果胶添加量为 3.0% 时,其凝胶网络结构出现坍塌,体系出现部分条状和片状结构,凝胶结构无序程度增加,而当高酯果胶添加量为 4.0% 时无序程度更为明显,这在微观结构上解释了花生蛋白凝胶硬度降低的原因。对于碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶,当高酯果胶添加量达到 4.0% 时,其凝胶结构出现部分片状的结构。增加高酯果胶添加量会导致体系内部的静电相互作用不平衡(主要表现为静电排斥力),从而引起相分离现象而使形成的凝胶网络结构较差<sup>[27]</sup>。对比碱溶酸沉提取,超声辅助提取花生蛋白凝胶结构较早出现相分离现象,这可能与其改变花生蛋白空间结构而使蛋白质与高酯果胶间的静电相互作用发生变化有关<sup>[28]</sup>。

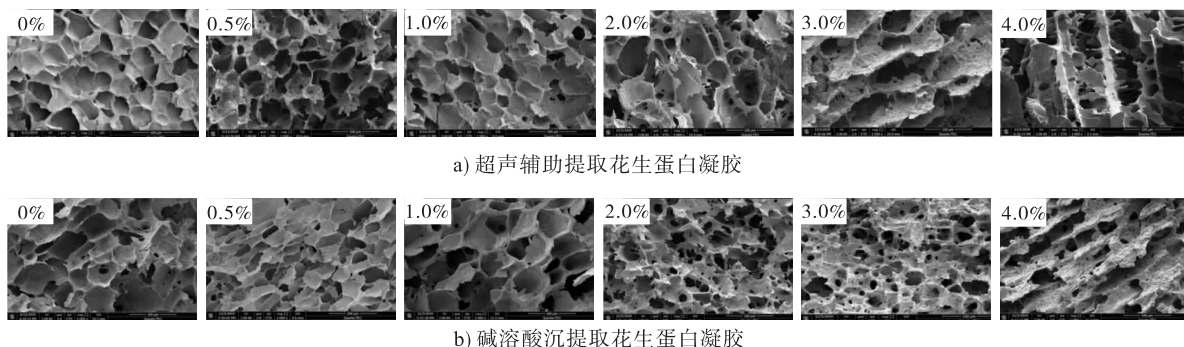


图 5 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶微观结构的影响

#### 2.5 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶影响机制

综上所述,适宜的高酯果胶添加量可显著提高

超声辅助和碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的硬度、弹性、内聚性等,并且改善凝胶表面的光滑细腻程度,

进一步提高花生蛋白的凝胶特性。由于超声辅助提取过程使花生蛋白分子发生解折叠使其暴露出更多的功能性基团<sup>[26]</sup>,当添加高酯果胶进行热处理时,对比碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶,在疏水相互作用基础上,超声辅助提取花生蛋白表面所带正电荷与高酯果胶所带的负电荷具有更强的静电相互作用,

冷藏过程中可形成更加致密均匀的凝胶网络结构。同时有研究报道,加热条件下,多糖与蛋白质的静电结合可以改变蛋白质的折叠状态<sup>[29]</sup>,从而影响其凝胶特性。因此,本文推测高酯果胶对花生蛋白凝胶影响机制见图6。

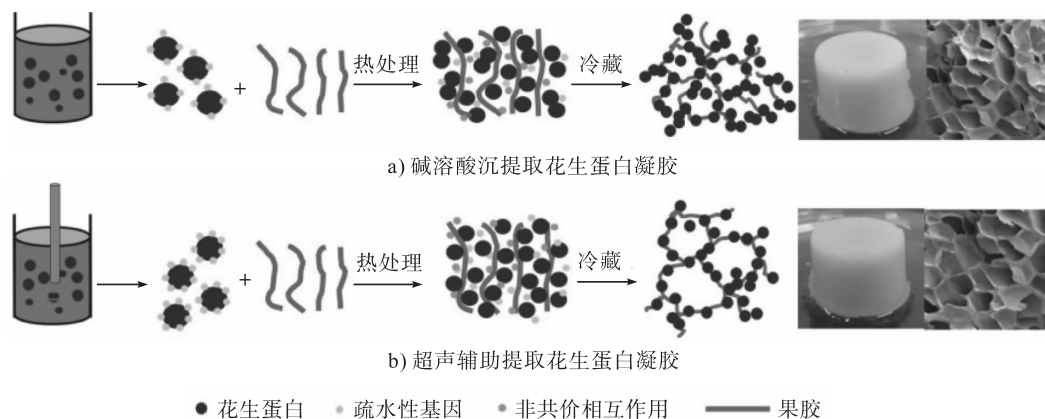


图6 高酯果胶对花生蛋白凝胶影响机制

### 3 结论

适宜的高酯果胶添加量可显著提高超声辅助提取花生蛋白凝胶的硬度、弹性、内聚性和持水性,当高酯果胶添加量为1.0%时,除持水性外,超声辅助提取花生蛋白凝胶均比碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的高,且花生蛋白凝胶的硬度、弹性、内聚性及持水性均达到最大值。超声辅助提取花生蛋白凝胶的 $G'$ 高于碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的,且两种凝胶的 $G'$ 始终大于 $G''$ 。高酯果胶添加量为1.0%时,超声辅助提取花生蛋白与高酯果胶之间存在强相互作用,从而形成均匀且致密的凝胶网络结构,且超声辅助提取花生蛋白凝胶的凝胶网络结构比碱溶酸沉提取花生蛋白凝胶的更加均匀致密。利用高酯果胶可调控花生蛋白的质构、流变特性和微观结构,为拓宽花生蛋白应用领域提供了重要信息。

#### 参考文献:

- [1] MOURE A, SINEIRO J, DOMÍNGUEZ H, et al. Functionality of oilseed protein products: a review [J]. Food Res Int, 2006, 39(9): 945-963.
- [2] SPOTTI M J, LOYEAU P A, MARANGÓN A, et al. Influence of Maillard reaction extent on acid induced gels of whey proteins and dextrans [J]. Food Hydrocolloid, 2019, 91: 224-231.
- [3] DU Q, ZHOU L, LYU F, et al. The complex of whey protein and pectin: interactions, functional properties and applications in food colloidal systems: a review [J/OL]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2022, 210: 112253 [2022-08-06]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.112253>.
- [4] LI Z, XI J, CHEN H, et al. Effect of glycosylation with apple pectin, citrus pectin, mango pectin and sugar beet pectin on the physicochemical, interfacial and emulsifying properties of coconut protein isolate [J/OL]. Food Res Int, 2022, 156: 111363 [2022-08-06]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111363>.
- [5] 丁玲,唐艺华,张丽芬,等.花生蛋白-果胶复合乳液凝胶的流变学特性和微观结构[J].食品科学,2022,43(16):46-52.
- [6] ARCHUT A, DRUSCH S, KASTNER H. Complex coacervation of pea protein and pectin: effect of degree and pattern of free carboxyl groups on biopolymer interaction [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2022, 133: 107884 [2022-08-06]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107884>.
- [7] PANM K, ZHOU F F, SHI R H, et al. Characterizations of a pectin extracted from *Premna microphylla* Turcz and its cold gelation with whey protein concentrate at different pHs [J]. Int J Biol Macromol, 2019, 139: 818-826.
- [8] ZHANG S, VARDHANABHUTI B. Acid-induced gelation properties of heated whey protein-pectin soluble complex (Part II): effect of charge density of pectin [J]. Food Hydrocolloid, 2014, 39: 95-103.
- [9] SCHREUDERS F K G, SCHLANGEN M, BODNÁR I, et al. Structure formation and non-linear rheology of blends of plant proteins with pectin and cellulose [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2022, 124: 107327 [2022-08-06]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107327>.
- [10] GUO J, JIN Y C, YANG X Q, et al. Computed microtomography and mechanical property analysis of soy

- protein porous hydrogel prepared by homogenizing and microbial transglutaminase cross - linking [ J ]. *Food Hydrocolloid*, 2013, 31(2) : 220 - 226.
- [11] WU C, MA W, CHEN Y, et al. The water holding capacity and storage modulus of chemical cross - linked soy protein gels directly related to aggregates size[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2019, 103: 125 - 130.
- [12] TANG C H, WANG X Y, YANG X Q, et al. Formation of soluble aggregates from insoluble commercial soy protein isolate by means of ultrasonic treatment and their gelling properties[J]. *J Food Eng*, 2009, 92(4) : 432 - 437.
- [13] XU X Y, CAO Y, ZHANG H, et al. Effects of cornstarch on the gel properties of black bean protein isolate[J]. *J Texture Stud*, 2018, 49(5) : 548 - 555.
- [14] VAN DEN BERG L, VAN VLIET T, VAN DER LINDEN E, et al. Breakdown properties and sensory perception of whey proteins/polysaccharide mixed gels as a function of microstructure[J]. *Food Hydrocolloid*, 2007, 21(5/6) : 961 - 976.
- [15] TOLSTOGUZOV V. Phase behavior in mixed polysaccharide systems[M]//STEPHEN A M, PHILLIPS G O. *Food polysaccharides and their applications*. Boca Raton: CRC Taylor & Francis, 2006: 589 - 627.
- [16] LAN Y, OHM J B, CHEN B, et al. Phase behavior, thermodynamic and microstructure of concentrated pea protein isolate - pectin mixture: effect of pH, biopolymer ratio and pectin charge density [ J/OL ]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 101: 105556 [ 2022 - 08 - 06 ]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105556>.
- [17] COOPER C L, DUBIN P L, KAYITMAZER A B, et al. Polyelectrolyte - protein complexes[J]. *Curr Opin Colloid In*, 2005, 10(1/2) : 52 - 78.
- [18] SUN X, ZHANG W, ZHANG L, et al. Effect of ultrasound - assisted extraction on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate[J]. *J Sci Food Agric*, 2021, 101(3) : 1150 - 1160.
- [19] TRAN T, ROUSSEAU D. Stabilization of acidic soy protein - based dispersions and emulsions by soy soluble polysaccharides[J]. *Food Hydrocolloid*, 2013, 30(1) : 382 - 392.
- [20] SOUMYA B, SUVENDU B. Compressive textural attributes, opacity and syneresis of gels prepared from gellan, agar and their mixtures[J]. *J Food Eng*, 2010, 102(3) : 287 - 292.
- [21] RENKEMA J M S, KNABBen J H M, VAN VLIET T. Gel formation by  $\beta$  - conglycinin and glycinin and their mixtures[J]. *Food Hydrocolloid*, 2001, 15(4/5/6) : 407 - 414.
- [22] MONTEIRO S R, LOPES - DA - SILVA J A. Effect of the molecular weight of a neutral polysaccharide on soy protein gelation[J]. *Food Res Int*, 2017, 102: 14 - 24.
- [23] 陈炳宇, 胡晖, 王强, 等. 蛋白 - 多糖复合凝胶性质及微观结构研究进展[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(11) : 319 - 327.
- [24] SHEN X, ZHAO C, GUO M. Effects of high intensity ultrasound on acid - induced gelation properties of whey protein gel[J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, 39: 810 - 815.
- [25] LE X T, RIOUX L E, TURGEON S L. Formation and functional properties of protein - polysaccharide electrostatic hydrogels in comparison to protein or polysaccharide hydrogels[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2017, 239: 127 - 135.
- [26] RESENDIZ - VAZQUEZ J A, ULLOA J A, URÍAS - SILVAS J E, et al. Effect of high - intensity ultrasound on the technofunctional properties and structure of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seed protein isolate [J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, 37: 436 - 444.
- [27] PILLAI P K S, MORALES - CONTRERAS B E, WICKER L, et al. Effect of enzyme de - esterified pectin on the electrostatic complexation with pea protein isolate under different mixing conditions [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 305: 125433 [ 2022 - 08 - 06 ]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125433>.
- [28] MA X, YAN T, HOU F, et al. Formation of soy protein isolate (SPI) - citrus pectin (CP) electrostatic complexes under a high - intensity ultrasonic field: linking the enhanced emulsifying properties to physicochemical and structural properties[J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 59: 104748 [ 2022 - 08 - 06 ]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104748>.
- [29] 潘泓杉, 马高兴, 裴斐, 等. 金针菇多糖对大豆分离蛋白凝胶的增强作用及其结构表征[J]. *食品科学*, 2022, 43(20) : 102 - 108.