

# 提取方法对玉米纤维胶—豌豆蛋白复合凝胶性能的影响

吾成龙<sup>1</sup> 蒋志丽<sup>1</sup> 黄丽霖<sup>1</sup> 唐雷鸣<sup>2</sup> 孙小红<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江 舟山 316022; 2. 舟山市食品药品检验检测研究院, 浙江 舟山 316022)

**摘要:** [目的] 探究碱提、酶提和酸提 3 种提取方法对玉米纤维胶 (CFG)—豌豆蛋白复合凝胶性能的影响。[方法] 以玉米麸皮为原料, 采用 3 种方法提取 CFG, 测定 CFG-豌豆蛋白复合凝胶的凝胶强度、持水性、流变性能以及微观结构的变化。[结果] 酶提 CFG 使豌豆蛋白凝胶强度由  $(27.20 \pm 2.45)$  g 提升至  $(65.80 \pm 2.67)$  g, 持水性由  $(40.60 \pm 3.40)\%$  提升至  $(75.80 \pm 5.10)\%$ , 同时与豌豆蛋白形成更为紧密且有序的网络结构, 具有更优的黏弹性。相比之下, 碱提和酸提 CFG 对复合凝胶性能的贡献不及酶提 CFG。[结论] 酶提 CFG-豌豆蛋白复合凝胶的性能最优。

**关键词:** 玉米麸皮; 玉米纤维胶; 提取方法; 凝胶性能

## Effects of various extraction methods on the performance of corn fiber gum-pea protein composite gels

Wu Chenglong<sup>1</sup> Jiang Zhili<sup>1</sup> Huang Lilin<sup>1</sup> Tang Leiming<sup>2</sup> Sun Xiaohong<sup>1</sup>

(1. Food Science and Pharmacy College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China;

2. Zhoushan Institute for Food and Drug Control, Zhoushan, Zhejiang 316022, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the effects of three extraction methods—alkaline extraction, enzymatic extraction, and acid extraction—on the properties of corn fiber gum (CFG)-pea protein composite gels. [Methods] CFG was extracted from corn bran using the three methods. The gel strength, water-holding capacity, rheological properties, and microstructure of the CFG-pea protein composite gels are evaluated. [Results] The CFG extracted by enzymatic extraction increases the gel strength of pea protein gels from  $(27.20 \pm 2.45)$  g to  $(65.80 \pm 2.67)$  g, and the water-holding capacity from  $(40.60 \pm 3.40)\%$  to  $(75.80 \pm 5.10)\%$ . Additionally, it forms a more compact and ordered network structure with pea protein, demonstrating superior viscoelasticity. In contrast, the CFG extracted by alkaline and acid extraction contributes less to the composite gel properties compared with that extracted by enzymatic extraction. [Conclusion] The CFG-pea protein composite gel prepared with enzymatically extracted CFG exhibits the best overall performance.

**Keywords:** corn bran; corn fiber gum (CFG); extraction method; gel performance

玉米 (*Zea mays* L.) 是全球范围内核心的粮食作物之一, 其深加工产业链在为人类供给充足能量的过程中, 同步产生了数量庞大的副产物<sup>[1]</sup>。其中, 玉米麸皮作为玉米加工过程中的主要副产物之一, 占玉米加工总量的 10%~15%。Sun 等<sup>[2]</sup>研究表明, 玉米麸皮富含膳食纤维, 其主要

成分为阿拉伯木聚糖 (Arabinoxylan, AX), 含量高达 50%~79%。目前, 玉米麸皮的应用仍主要局限于饲料领域, 其在食品工业等高附加值领域的开发尚处于初级阶段, 不仅限制了玉米加工产业的附加值提升, 也在一定程度上造成了资源浪费<sup>[3]</sup>。玉米纤维胶 (CFG) 是从玉米麸

**基金项目:** 浙江省自然科学基金青年基金项目 (编号: ZCLQN25C2002); 舟山市市级应用技术研究项目 (编号: 2025C31028)

**通信作者:** 唐雷鸣 (1988—), 男, 舟山市食品药品检验检测研究院高级工程师, 硕士。E-mail: 383471911@qq.com

**收稿日期:** 2025-07-08 **改回日期:** 2026-03-05

**引用格式:** 吾成龙, 蒋志丽, 黄丽霖, 等. 提取方法对玉米纤维胶—豌豆蛋白复合凝胶性能的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 153-159.

**Citation:** Wu Chenglong, Jiang Zhili, Huang Lilin, et al. Effects of various extraction methods on the performance of corn fiber gum-pea protein composite gels[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 153-159.

皮中提取的天然多糖,其主要成分为阿拉伯木聚糖复合物<sup>[4]</sup>。CFG不仅具有预防慢性疾病等多种生理功效,在食品、医药等领域也展现出广阔的应用潜力<sup>[5]</sup>。CFG的结构复杂性在于其主链由 $\beta$ -D-吡喃木糖残基构成,侧链由 $\alpha$ -L-阿拉伯呋喃糖组成,并通过C(O)-2、C(O)-3或C(O)-2,3键与主链相连。此外,少量阿魏酸可通过酯键连接到阿拉伯呋喃糖的C(O)-5位,这种独特的结构赋予了CFG优异的物理和化学性质,使其在与蛋白质相互作用时能够显著改善凝胶特性<sup>[6]</sup>。在实际生产中,不同提取工艺会导致CFG的蛋白质含量、支化程度和阿魏酸含量等关键参数产生差异,进而影响其在食品体系中的应用效果。例如,高浓度碱液长时间处理可能会造成活性阿魏酸基团损失,降低CFG的凝胶性能<sup>[7]</sup>。然而,目前关于CFG提取工艺的研究多集中于单一提取方法的优化,而对不同提取工艺之间的系统性对比研究相对不足,一定程度上限制了CFG在食品工业中的高效应用。

食品凝胶因其独特的质地、稳定性以及多功能性,在食品工业中具有广泛的应用前景,包括作为增稠剂、稳定剂、乳化剂以及功能性食品载体等。近年来,天然多糖与蛋白质复合形成的凝胶因其优异的性能和生物相容性,受到越来越多的关注。豌豆蛋白作为一种优质的植物蛋白来源,凭借良好的营养特性和功能特性被广泛应用于食品工业中。然而,豌豆蛋白的凝胶性能仍有待提升,以满足食品工业对高性能凝胶材料的需求。

试验拟以玉米麸皮为试验原料,选取碱提法、酶解法、酸提法3种常用提取工艺,系统对比不同工艺对CFG各项理化及功能特性的影响,分析不同工艺制备的CFG与豌豆蛋白复合凝胶在凝胶强度、持水性、流变学特性以及微观结构等方面的差异,以期为玉米纤维胶在食品工业中的高效开发与应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

玉米麸皮:灰分、水分、蛋白质和淀粉含量分别为 $(5.78 \pm 0.60)\%$ 、 $(6.96 \pm 0.31)\%$ 、 $(10.28 \pm 0.28)\%$ 、 $(4.83 \pm 0.31)\%$ ,玉锋实业集团有限公司;

豌豆蛋白:郑州郑亚化工产品有限公司;

木聚糖酶( $\geq 2\,500\text{ U/g}$ ):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

其他化学试剂均为国产分析纯。

### 1.2 仪器与设备

流变仪:AR2000型,美国TA公司;

冷冻干燥机:LGI型,北京四环科学仪器厂;

质构仪:iTexture型,浙江浙科仪器设备有限公司;

高速多功能粉碎机:LDP-200型,浙江永康市红太阳机电有限公司;

磁力搅拌器:Cimarec型,美国赛默飞公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 CFG的制备

(1) 样品预处理:玉米麸皮研磨过筛后,按料液比1:8(g/mL)加入正己烷,200 r/min搅拌2 h,静置30 min,倒出含油上清液,105℃烘干2 h。除油麸皮中加入8倍蒸馏水,500 W煮沸1 h并搅拌均匀;降温至40℃,加入 $\alpha$ -淀粉酶,60℃水浴2 h,碘液检验确认淀粉完全水解。加入蛋白酶,40℃反应4 h,冷却,10 000×g离心10 min,沉淀用2倍无水乙醇冲洗2次,60℃烘干6 h。

(2) 碱提CFG:参照Yan等<sup>[8]</sup>的方法。

(3) 酶提CFG:参照Kaur等<sup>[9]</sup>的方法。

(4) 酸提CFG:参照Liu等<sup>[10]</sup>的方法。

1.3.2 凝胶的制作 参照Fang等<sup>[11]</sup>的方法。

1.3.3 凝胶强度测定 参照Shen等<sup>[12]</sup>的方法。

1.3.4 凝胶持水性测定 参照Du等<sup>[13]</sup>的方法,按式(1)计算凝胶持水性。

$$C_{WH} = \frac{M_1}{M_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$C_{WH}$ ——持水性,%;

$M_1$ ——离心后凝胶质量,g;

$M_2$ ——离心前凝胶质量,g。

1.3.5 动态流变学特性测定 参照Khalighi等<sup>[14]</sup>的方法。

1.3.6 红外光谱分析 参照Li等<sup>[15]</sup>的方法。

1.3.7 凝胶微观结构观察 参照Zhang等<sup>[16]</sup>的方法。

1.3.8 总酚(TPC)含量测定 参照Tuba Hülya等<sup>[17]</sup>的方法,按式(2)计算总酚含量。

$$C_{TP} = \frac{CVN}{M}, \quad (2)$$

式中:

$C_{TP}$ ——总酚酸含量,mg/g;

$C$ ——回归方程中计算出CFG的总酚质量浓度,mg/mL;

$V$ ——定容后提取液体积,mL;

$N$ ——CFG溶液稀释倍数;

$M$ ——样品质量,g。

1.3.9 数据处理与分析 所有试验重复3次,结果以平均值±标准差表示。使用SPSS 27.0软件进行数据分析和显著性差异分析, $P < 0.05$ 表示差异显著,采用Origin 2021软件绘图。

## 2 结果与分析

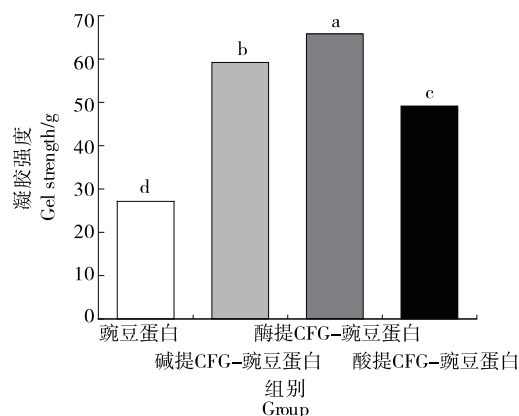
### 2.1 CFG对豌豆蛋白凝胶外观形态的影响

空白对照组(仅豌豆蛋白)凝胶呈淡黄色,表面粗糙且存在明显塌缩现象,凝胶边缘有少量水分析出(游离水含量约5%),说明纯豌豆蛋白凝胶的内部结构稳定性偏

弱;而添加不同工艺提取的CFG后,各组复合凝胶的外观状态均得到明显优化。其中酶提CFG组复合凝胶呈乳白色,表面光滑平整,无明显塌缩与水分析出,凝胶形态完整且具有良好的透明度;碱提CFG组复合凝胶虽无明显塌缩,但表面略显粗糙,颜色略深(可能因强碱导致少量色素溶出);酸提CFG组复合凝胶存在轻微边缘收缩,表面有极少量游离水(约1%)。外观形态的差异初步表明,酶提CFG与豌豆蛋白的相容性更佳,可形成更稳定的凝胶体系,这与酶提CFG具有更高的纯度和更完整的分子结构密切相关。高纯度减少了杂蛋白等干扰物质,完整的CFG结构可与豌豆蛋白形成更均匀的混合体系,避免因成分不均导致的凝胶结构缺陷<sup>[15]</sup>。与碱提CFG-豌豆蛋白复合凝胶相比,酶提CFG-豌豆蛋白复合凝胶内部形成了更为致密的微交联网络结构,这种结构能够有效降低加热或冷藏贮藏过程中的凝胶网络收缩概率,进而避免水分大量渗出和整体结构塌陷,因此综合凝胶性能更突出。

## 2.2 提取方法对复合凝胶强度的影响

由图1可知,添加CFG的复合凝胶强度显著大于未添加CFG的( $P<0.05$ ),酶提CFG-豌豆蛋白的凝胶强度最大,表明添加CFG可增强豌豆蛋白的凝胶强度。一方面,添加CFG为豌豆蛋白凝胶提供了更多的阿魏酸,从而使豌豆蛋白中酪氨酸与CFG中阿魏酸的相互作用增强,增强了复合凝胶硬度,提高了蛋白凝胶网络结构的刚度。酶提CFG可与豌豆蛋白酪氨酸形成疏水作用,同时CFG的阿拉伯糖侧链可与蛋白氨基形成氢键,两种作用协同增强凝胶网络刚度,故凝胶强度最高。另一方面,CFG的网络结构可以在蛋白网络结构中起到功能替代作用,促使凝胶分布更均匀,有利于网络的形成,使复合凝胶网络结构更加牢固<sup>[18]</sup>。此外,静电相互作用作为蛋白质、多糖之间的主要相互作用,其复合物具有比单一蛋白质和多糖更高效的功能特性<sup>[19]</sup>。添加CFG后,加强了与豌豆蛋白间的静电相互作用并形成了连接型凝胶,豌豆蛋白/CFG双网络凝胶质构特性显著提高( $P<0.05$ )。进一步分析不同工艺CFG的结构参数可知,3组试验样品的CFG支化度存在显著性差异( $P<0.05$ ),其中酶提CFG的支化度显著高于其他两组。这一高支化结构特性主要源于酶法提取过程中,CFG木聚糖主链上的侧链阿拉伯呋喃糖残基呈现非随机分布状态,完整保留了多糖的天然分支结构,而这一关键结构特征对CFG-豌豆蛋白复合凝胶的凝胶强度、网络结构等多项核心性能均起到重要调控作用。从凝胶网络形成机制来看,高支化度的CFG分子链带有丰富的分支结构,能为复合凝胶体系提供更多交联位点,可与豌豆蛋白分子形成更为密集的交联节点;分支末端的各类活性基团能够通过氢键、疏水相互作用等非共价键,与豌豆蛋白的氨基酸残基稳定结合,有效抑制分



小写字母不同表示差异显著 ( $P<0.05$ )

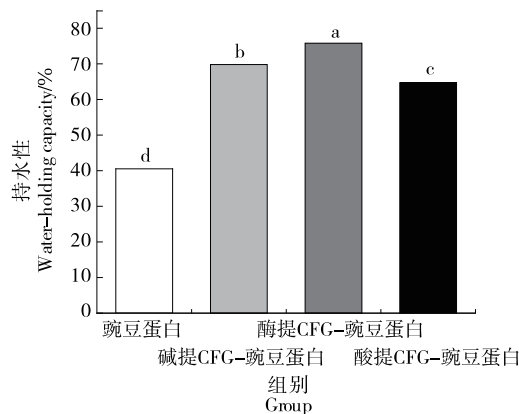
图1 凝胶强度

Figure 1 Gel strength

子间过度聚集成粗大聚集,进而搭建出分布更均匀、结构更致密的三维凝胶网络,全面提升复合凝胶的整体强度。此外,酶法提取本身具备高度的反应选择性与特异性,提取过程条件温和,既能高效去除玉米麸皮中的杂蛋白、淀粉等杂质,又能最大程度保留目标多糖的完整结构,最终获得的CFG纯度远高于传统碱提法。高纯度的CFG所含有的多糖活性基团更为充足,可与豌豆蛋白分子中的氨基、疏水基团等形成更多稳定的氢键和静电相互作用,进一步强化分子间交联效果,构建出致密均一的凝胶网络体系,这也是酶提CFG复合凝胶性能更优的核心原因之一。

## 2.3 提取方法对复合凝胶持水性的影响

由图2可知,只含有豌豆蛋白的凝胶持水性显著低于添加CFG的各组合凝胶( $P<0.05$ ),表明CFG的添加能够增强凝胶持水性。酶提CFG-豌豆蛋白的凝胶持水性最大为( $75.80\pm 5.10$ )%,可能是由于CFG作为一种亲水胶体,其



小写字母不同表示差异显著 ( $P<0.05$ )

图2 凝胶持水性

Figure 2 Water holding capacity

本身具有良好的持水性能,能够增大复合凝胶网络的持水性。酶提 CFG-豌豆蛋白复合凝胶形成了更致密、均匀的三维网络结构(SEM 观察显示平均孔径),小而均匀的孔隙可与氢键更牢固地束缚水分,减少离心过程中的水分流失<sup>[20]</sup>。此外,双网络结构的协同作用也减少了凝胶网络的收缩,避免因结构坍塌导致的水分释放,进一步提升持水性。高度支化的 CFG 结构通过表面大量羟基形成氢键网络,致密的网络结构能有效抑制水滴迁移。类似于 Su 等<sup>[21]</sup>的报道,黄原胶(XG)在乳液凝胶中有 80% 的油脂保留效果,减少了水分与油脂的渗漏,均匀的三维网络可形成更多尺寸适宜的储水/储油孔道。同时,由于酶提 CFG 的纯度较高,构建的致密网络凭借小而均匀的孔隙结构,减少了自由水渗出,从而提高了凝胶的持水性。

#### 2.4 提取方法对复合凝胶流变特性的影响

由图 3(a)可知,在 0.10~16.0 Hz 频率范围内,所有样品的  $G'$  值均随频率升高呈明显上升趋势,且不同提取方式制备的 CFG-豌豆蛋白复合凝胶的  $G'$  值上升幅度存在差异。该现象表明,在较高频率条件下,凝胶网络分子链运动受限,难以充分响应外力形变,进而使凝胶网络结构的弹性显著增强,呈现出更优的抗形变能力。具体来说,加入 CFG 后,豌豆蛋白凝胶的  $G'$  值显著高于未添加 CFG 的( $P < 0.05$ )。证明 CFG 的引入可通过与豌豆蛋白形成协同作用,显著增强复合凝胶的弹性性能,使其在外力作用下能更高效地储存弹性能量。由图 3(b)可知,与  $G'$  值变化趋势一致,所有样品的  $G''$  值随频率升高呈上升趋势,但相较于  $G'$  值的上升幅度,  $G''$  值的上升幅度明显更小,且不同样品间  $G''$  值的差异小于  $G'$  值的。添加 CFG 后,豌豆蛋白凝胶的  $G''$  值显著高于未添加 CFG 的,表明添加 CFG 不仅增强了凝胶的弹性,还增强了其黏性,使得凝胶在受到外力作用时能够更好地耗散能量。由图 3(c)可知,在 0.10~16.0 Hz 频率范围内,添加 CFG 的复合凝胶的  $\tan \delta$  值均显著低于纯豌豆蛋白的( $P < 0.05$ ),且酶提 CFG-豌豆蛋白复合凝胶的  $\tan \delta$  值最低,表明其固体特性最为突出。

说明添加 CFG 可显著增强豌豆蛋白凝胶的固体特性,使其在受到外力作用时表现出更强的弹性而非黏性<sup>[22]</sup>。Yang 等<sup>[23]</sup>的研究同样证实,与单一乳球蛋白纤维凝胶相比,琼脂-乳球蛋白纤维复合凝胶因形成更致密的双网络结构,其机械强度显著提升,与试验结果一致,进一步佐证了通过复合不同功能性材料可有效增强凝胶机械性能的科学合理性。CFG 与豌豆蛋白之间可形成氢键、疏水相互作用等多种非共价键作用力,多重分子间作用力协同发力,促使多糖与蛋白分子紧密结合,搭建起相对致密的空间网络结构,二者共同分担外界作用力,进而大幅提升复合凝胶的弹性与机械强度<sup>[24]</sup>。相较于碱提、酸提工艺制备的 CFG,酶提 CFG 的相对分子质量分布更为集中,分子链长度更均一,能够与豌豆蛋白分子实现更充分的物理缠结,二者相互穿插、交联,最终形成稳定性更强的双网络凝胶结构。这种致密的双网络结构能够有效降低外力作用下体系的能量耗散,避免凝胶网络轻易发生形变或断裂,这也直接解释了酶提 CFG-豌豆蛋白复合凝胶具备更高的储能模量( $G'$ ),更低的损耗角正切值( $\tan \delta$ ),固体弹性特征更为突出的核心机理。综上,在豌豆蛋白凝胶中添加 CFG,能够通过调控凝胶内部三维网络的致密程度与分子间相互作用强度,同步优化凝胶的弹性、黏性与固体特性,从结构层面强化凝胶的机械性能,使其在外力作用下具备更优异的稳定性与抗形变能力。

#### 2.5 提取方法对复合凝胶红外光谱图的影响

由图 4 可知,1 600~1 700  $\text{cm}^{-1}$  为酰胺 I 带由 C—O 拉伸振动产生,是蛋白质的特征吸收带<sup>[25]</sup>。添加 CFG 后,蛋白质特征带对应的吸收峰无明显偏移,表明 CFG 与豌豆蛋白不存在共价交联,可能存在非共价相互作用。此外,1 000~1 200  $\text{cm}^{-1}$  处为多糖 C—O—C 伸缩振动,酶提 CFG 组的特征峰强度最高,表明其在凝胶中的分散性更好,与蛋白的相容性更佳,可更均匀地参与凝胶网络构建,这也是其凝胶性能更优的重要原因之一。3 400  $\text{cm}^{-1}$

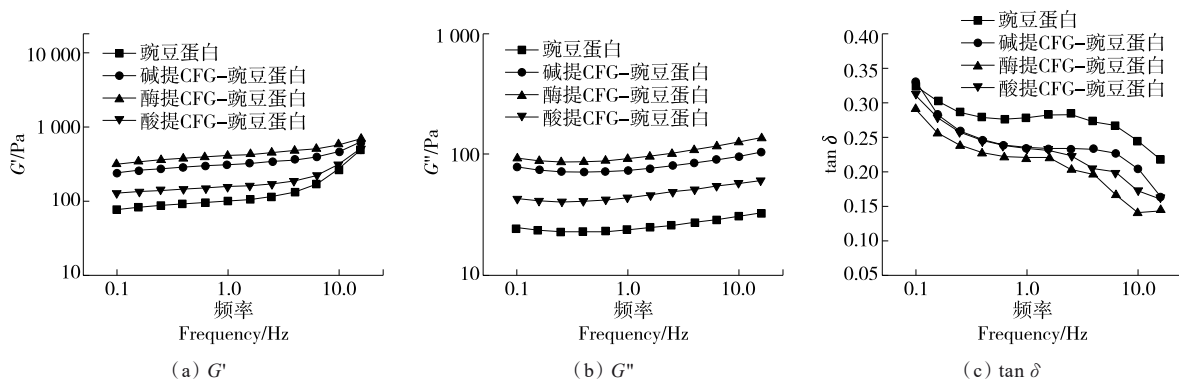


图 3 凝胶的流变特性

Figure 3 Rheological properties of different composite gels

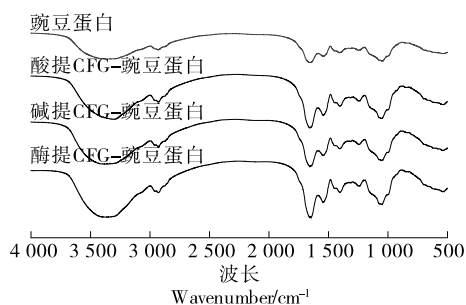


图4 凝胶的红外光谱图

Figure 4 Infrared spectra of different composite gels

处氢键吸收峰增强,进一步证实非共价作用(氢键+疏水作用)为主要交联方式,无共价键形成,可避免蛋白结构被破坏。非共价作用赋予蛋白质分子动态性和适应性,对于维持复合凝胶的结构和功能至关重要。 $3\ 200\sim 3\ 600\text{ cm}^{-1}$ 处的强吸收峰为氢键的伸缩振动吸收峰,说明4组蛋白凝胶均存在分子内或分子间氢键,这对于蛋白质凝胶的形成与稳定是极为重要的<sup>[26]</sup>。对4组蛋白凝胶样品进行傅里叶变换红外光谱检测,结果显示,各组样品的FT-IR图谱特征峰数量、峰形以及峰位均无明显差异,整体谱图趋势高度相似。表明添加不同工艺提取的CFG,并未显著改变豌豆蛋白自身的基本化学结构与蛋白质二级结构,这种结构稳定性对于维持豌豆蛋白自身的营养特性与加工功能性具有重要的积极意义,也说明CFG与豌豆蛋白之间主要以非共价键的物理互作为主,未破坏蛋白原有核心结构。

## 2.6 提取方法对复合凝胶微观结构的影响

由图5可知,纯豌豆蛋白凝胶的微观状态呈现明显松散性,凝胶结构粗糙且内部孔洞大小不均、分布无序,未能形成规则有序的三维网络结构,这种不完整的微观结构是导致其宏观凝胶强度较弱的主要原因。添加不同的CFG后,各组复合凝胶均形成了更连续贯通的水通道结构,且豌豆蛋白分子的无序聚集状态得到显著改善,呈现出更规则的排列方式。进一步观察可知,酶提CFG-豌豆蛋白复合凝胶的蛋白质网络结构表现出最优的均匀性与致密性,其网络孔径显著缩小且分布更均一,这种精细化的微观结构直接促成了更优异的凝胶综合质量在CFG的调控作用下,豌豆蛋白分子的聚集行为得到优化,能够展开形成更均匀的三维网络结构;同时,CFG的亲水特性可辅助水分子更高效地进入凝胶内部网络,减少水分流失,这也是复合凝胶持水性提升的重要微观机制之一。曹晴晴等<sup>[27]</sup>研究表明,豌豆蛋白-果胶基乳液凝胶的综合特性优于其单一水凝胶,添加一定体积分数的外源物可以使凝胶网络结构更加致密,与试验结果一致。因此,CFG(作为外源多糖)能够通过强化豌豆蛋白凝胶的网络结

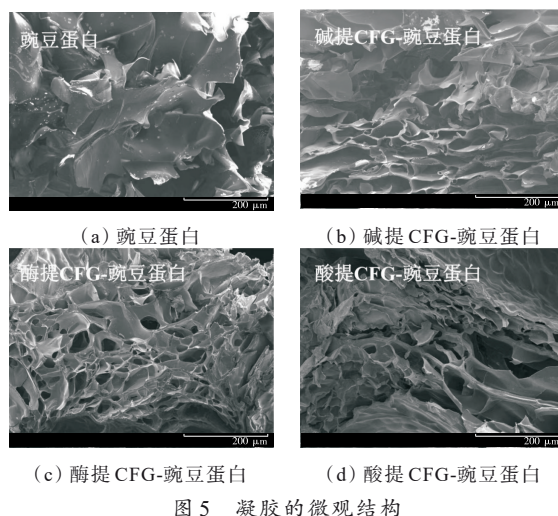


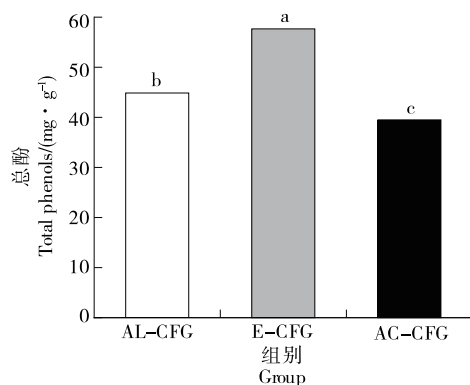
图5 凝胶的微观结构

Figure 5 Microstructure of different composite gels

构,进而提升其保水性能,进一步验证了外源多糖优化蛋白凝胶微观结构以改善宏观性能这一规律。Chen等<sup>[28]</sup>研究发现,添加适量的结冷胶或卡拉胶可以使凝胶网络结构更加细密,从而提高凝胶的强度和持水性,进一步佐证了天然多糖在改善蛋白凝胶微观结构—提升宏观性能方面的共性作用。3种提取方式中,酶提CFG与豌豆蛋白能够形成结构最优化的复合凝胶网络(更致密、更均匀、孔洞分布更有序),这种优异的微观网络结构为复合凝胶展现出的高凝胶强度、高持水性等宏观优异性能提供了直接的结构支撑。

## 2.7 提取方法对CFG总酚含量的影响

由图6可知,酶提CFG的总酚含量显著高于碱提CFG与酸提CFG( $P<0.05$ ),这源于酶法提取对酚类化合物的高效保留作用,而碱法与酸法提取过程中剧烈的酸碱环境易导致酚类化合物发生降解或流失<sup>[29]</sup>。总酚含量作为CFG关键的生物活性指标,其差异对CFG-豌豆蛋白复合凝胶的结构、功能特性及稳定性具有多维度调控作用:一方面,CFG中酚类化合物的酚羟基可与CFG分子链上的羟基( $-\text{OH}$ )、豌豆蛋白氨基酸残基(如丝氨酸的羟基、赖氨酸的 $\epsilon\text{-NH}_2$ 、半胱氨酸的巯基)形成强氢键与共价交联键(酚羟基氧化为醌基后与蛋白巯基/氨基的加成反应),显著提升复合体系的交联密度。相较于总酚含量较低的碱提和酸提CFG,酶提CFG构建的复合凝胶网络更致密且孔径分布更均匀。另一方面,致密的交联网络可与水分结合,显著改善凝胶持水性,减少冷却或冷藏过程中的析水现象,同时提升凝胶强度。此外,酚类化合物的抗氧化活性可延缓复合凝胶中豌豆蛋白的氧化降解(如减少羰基化合物生成、抑制巯基巴比妥酸反应物积累),延长凝胶产品的货架期。酶提CFG较高的总酚含量不仅赋予复合凝胶更优异的结构与功能特性,还拓展了其在



小写字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 6 CFG 的总酚含量

Figure 6 Total phenol content of CFG

功能型食品领域的应用潜力,进一步印证了提取方法可通过调控生物活性成分影响 CFG-豌豆蛋白复合凝胶综合性能的作用。

### 3 结论

系统评估了碱提、酶提和酸提 3 种提取方法对玉米纤维胶—豌豆蛋白复合凝胶性能的影响。结果表明,酶提玉米纤维胶在提高凝胶强度和持水性方面效果最为显著 ( $P < 0.05$ )。相比之下,碱提和酸提玉米纤维胶虽也能提高凝胶强度,但在持水性和网络结构致密性方面均不如酶提玉米纤维胶。流变学分析进一步证实了酶提玉米纤维胶增强了凝胶的弹性和黏性,损耗角正切值的降低表明其固体特性增强,有助于提升凝胶的机械性能。红外光谱分析显示,玉米纤维胶的添加并未改变豌豆蛋白的基本化学结构和二级结构,表明玉米纤维胶主要通过非共价相互作用与豌豆蛋白结合,这种相互作用对于维持复合凝胶的结构和功能至关重要。微观结构分析表明,酶提玉米纤维胶—豌豆蛋白凝胶具有更均匀和紧凑的网络结构,有助于提高凝胶的持水性和强度。酶提玉米纤维胶的总酚含量显著高于碱提与酸提玉米纤维胶,这不仅让玉米纤维胶—豌豆蛋白复合凝胶的结构更稳定、功能更优,还进一步拓宽了该复合凝胶在功能型食品领域的应用空间。

综上,酶提玉米纤维胶的结构与功能特性均优于碱提、酸提样品,是一种优质天然食品添加剂,在食品工业尤其是新型植物基凝胶食品开发中具备极高应用潜力。后续可将该复合凝胶体系应用于乳制品、植物基肉制品、代餐食品等场景,测试其实际加工与贮藏稳定性,验证工业化可行性;同时深入解析 CFG 关键结构特征与宏观凝胶性能的定量构效关系,构建性能预测数学模型,为其定向改性 with 高效应用提供理论支撑。

### 参考文献

- [1] 许秀颖,文连奎,贺阳,等. 玉米花丝多糖提取方法及生物活性研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 207-215.  
Xu X Y, Wen L K, He Y, et al. Research progress on extraction and biological activity of corn silk polysaccharides[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 207-215.
- [2] Sun X H, Wu C L, Ma L, et al. Positive improvement of nutritional profile and safety of maize processing by-products: effects of *Bacillus subtilis* fermentation treatment[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 223: 117775.
- [3] Chen L, Guo Y, Liu X, et al. Cellulase with *Bacillus velezensis* improves physicochemical characteristics, microbiota and metabolites of corn germ meal during two-stage co-fermentation [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2024, 40 (2): 59.
- [4] 王维石,张君慧,李玲,等. 水不溶性阿拉伯木聚糖添加量对油条品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 186-191.  
Wang W S, Zhang J H, Li L, et al. Effects of water-unextractable *Arabinoxylans* on the qualities of traditional Chinese Youtiao[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 186-191.
- [5] Zhang Z Y, Yang P, Zhao J B. Ferulic acid mediates prebiotic responses of cereal-derived *Arabinoxylans* on host health[J]. Animal Nutrition, 2022, 9: 31-38.
- [6] Boukid F. Corn (*Zea mays* L.) *Arabinoxylan* to expand the portfolio of dietary fibers[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103181.
- [7] Ayala-soto F E, Serna-Saldívar S O, Welti-Chanes J. Effect of processing time, temperature and alkali concentration on yield extraction, structure and gelling properties of corn fiber *Arabinoxylans*[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 21-28.
- [8] Yan J X, Jia X, Feng L P, et al. Rheological and emulsifying properties of *Arabinoxylans* from various cereal brans[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 90: 102844.
- [9] Kaur A, Singh B, Yadav M P, et al. Isolation of *Arabinoxylan* and cellulose-rich *Arabinoxylan* from wheat bran of different varieties and their functionalities[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106287.
- [10] Liu A X, Zhang S J, Wang W T, et al. Effects of different pretreatments on wheat bran and its *Arabinoxylan* obtained by sequential extraction with dilute alkali and alkali-urea mixture [J]. Foods, 2025, 14(4): 696.
- [11] Fang S Z, Liu W W, Zhang Y Q, et al. Effect of *Arabinoxylan* amount and molecular structure on the microstructure, physicochemical and delivery properties of casein/*arabinoxylan* composite hydrogels[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109216.
- [12] Shen R H, Yang X, Liu M Y, et al. Preparation of bovine serum albumin-*arabinoxylan* cold-set gels by glucono- $\delta$ -lactone and salt ions double induction[J]. International Journal of

- Biological Macromolecules, 2024, 277: 133596.
- [13] Du Y, Oh C, No J. Effects of the ketogenic diet on components of the metabolic syndrome: a systematic review and meta-analysis[J]. Nutrition Clinique et Métabolisme, 2023, 37(1): 10-20.
- [14] Khalighi S, Berger R G, Ersoy F. Cross-linking of wheat bran Arabinoxylan by fungal laccases yields firm gels[J]. Processes, 2020, 8(1): 36.
- [15] Li W, Lu J Y, Ju Y D, et al. Structural analysis of Arabinoxylan and its effect on beer foam: a comparison of three Arabinoxylans with different viscosity[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 163: 111117.
- [16] Zhang J, Sun H, Zhu L J, et al. Micro ribonucleic acid 27a aggravates ferroptosis during early ischemic stroke of rats through nuclear factor erythroid-2-related factor 2[J]. Neuroscience, 2022, 504: 10-20.
- [17] Tuba Kıyan H, Öztürk N, Eröz Poyraz İ. 216 total phenolic content and biological activities of gentiana pyrenaica L[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2016, 100: S102.
- [18] Robert B, Chenthamara D, Subramaniam S. Fabrication and biomedical applications of Arabinoxylan, Pectin, Chitosan, soy protein, and silk fibroin hydrogels *via* laccase-Ferulic acid redox chemistry[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 201: 539-556.
- [19] Ribeiro E F, Morell P, Nicoletti V R, et al. Protein- and polysaccharide-based particles used for Pickering emulsion stabilisation[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106839.
- [20] Chang L X, Li Y, Bai X, et al. Inhibition of chitosan ice coating on the quality deterioration of quick-frozen fish balls during repeated freeze-thaw cycles[J]. Foods, 2023, 12(4): 717.
- [21] Su Y J, Zhang W Q, Liu R D, et al. Emulsion-templated liquid oil structuring with egg white protein microgel- xanthan gum [J]. Foods, 2023, 12(9): 1 884.
- [22] Ran J J, Zhang B, Su Y W, et al. The effects of the mixed fermentation of honeysuckle cereal mixed flour on the dough characteristics and bread quality[J]. Fermentation, 2023, 9 (3): 271.
- [23] Yang N, Huang M H, Gao C, et al. Preparation and drug release performance of different gelation type polysaccharide/ $\beta$ -lactoglobulin fiber composite gels[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 269: 132003.
- [24] Yan J X, Yin L J, Qu Y Y, et al. Effect of calcium ions concentration on the properties and microstructures of doubly induced sorghum *Arabinoxylan*/soy protein isolate mixed gels [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107997.
- [25] Sadat A, Joye I J. Peak fitting applied to Fourier transform infrared and Raman spectroscopic analysis of proteins[J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 5 918.
- [26] Nakanaga T, Ito F. Infrared depletion spectroscopy of aniline-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>O cluster and corresponding cluster cation[J]. Journal of Molecular Structure, 2003, 649(1/2): 105-110.
- [27] 曹晴晴, 朱婷伟, 陈雨, 等. 豌豆蛋白-果胶基乳液凝胶的制备与性能表征[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(3): 87-94.
- Cao Q Q, Zhu T W, Chen Y, et al. Preparation and characterization of pea protein-pectin based emulsion gels[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(3): 87-94.
- [28] Chen J X, Deng T Y, Wang C, et al. Effect of hydrocolloids on gel properties and protein secondary structure of silver carp surimi[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 2 252-2 260.
- [29] Lama-Muñoz A, Contreras M D M. Extraction systems and analytical techniques for food phenolic compounds: a review [J]. Foods, 2022, 11(22): 3 671.