林倩竹, 孙梓晋, 陈帅, 等. 多糖协同豌豆蛋白复合水凝胶 3D 打印及吞咽特性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 26−33. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050002

LIN Qianzhu, SUN Zijin, CHEN Shuai, et al. 3D Printing and Swallowing Properties of Polysaccharide Synergistic Pea Protein Composite Hydrogels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 26−33. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050002

·特邀主编专栏—植物基食品原料基础研究、前沿技术创新及其健康绿色产品开发（客座主编：于寒松、张健、李健）·

多糖协同豌豆蛋白复合水凝胶 3D 打印及吞咽特性研究

林倩竹[1], 孙梓晋[1], 陈　帅[2], 纪杭燕[1], 金征宇[1], 邱　超[1,*]

（1.江南大学食品学院, 江苏无锡 214122;
2.武汉大学公共卫生学院, 湖北武汉 430072）

摘　要: 为应对全球老龄化趋势加剧所带来的吞咽障碍人群增加问题，提升该群体饮食的安全性与适口性，本研究旨在构建基于豌豆蛋白（Pea protein，PP）协同多糖的 3D 打印复合水凝胶，用于开发适合吞咽障碍患者的易吞咽食品。选取卡拉胶（κ-Carrageenan，Car）、玉米淀粉（Corn starch，CS）和海藻酸钠（Sodium alginate，SA）分别与 PP 复配，制备三种可 3D 打印的复合油墨（PP-Car、PP-CS 和 PP-SA），系统探究其流变学特性、质构特性、可打印性及吞咽特性。结果显示，三种复合油墨均表现出剪切变稀行为和良好的触变恢复性能，适用于挤出式 3D 打印。随多糖添加量的增加，油墨的黏度和储能模量（G'）显著提升，形成的复合水凝胶硬度也增加（PP-1.5% Car-G、PP-15.0% CS-G 和 PP-1.5% SA-G 的硬度分别为 626.49、790.67 和 287.85 g），表明凝胶结构增强。3D 打印测试中，PP-Car 和 PP-CS 油墨打印结构完整，纹理清晰，结构保持性优于 PP-SA。吞咽性能方面，经 A/IDDSI 方法测定，所有水凝胶均符合 IDDSI 7 级范畴，属于常规易咀嚼质地范畴。本研究成功构建了三种具有良好 3D 打印适应性与吞咽性能的植物蛋白基复合水凝胶体系，为基于个性化 3D 打印易吞咽食品的开发提供了参考。

关键词: 豌豆蛋白, 易吞咽, 水凝胶, 质地, 3D 打印

中图分类号: TS201.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0026−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050002　　本文网刊:

3D Printing and Swallowing Properties of Polysaccharide Synergistic Pea Protein Composite Hydrogels

LIN Qianzhu[1], SUN Zijin[1], CHEN Shuai[2], JI Hangyan[1], JIN Zhengyu[1], QIU Chao[1,*]

（1.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2.School of Public Health, Wuhan University, Wuhan 430072, China）

Abstract: To address the increasing prevalence of dysphagia associated with global population aging and to enhance the safety and palatability of food for affected individuals, this study aims to develop 3D-printable composite hydrogels based on pea protein (PP) in combination with various polysaccharides for the creation of easy-to-swallow foods. κ-Carrageenan (Car), corn starch (CS), and sodium alginate (SA) were respectively combined with PP to prepare three types of composite inks (PP-Car, PP-CS, and PP-SA). The rheological properties, textural characteristics, printability, and swallowing suitability of the hydrogels were systematically investigated. Results showed that all three composite inks exhibited shear-thinning behavior and good thixotropic recovery, making them suitable for extrusion-based 3D printing. With increasing concentrations of polysaccharides, the viscosity and storage modulus (G') of the printing inks significantly increased, along

收稿日期: 2025−05−06

基金项目: 中国科协青年人才托举工程（2021QNRC001）。

作者简介: 林倩竹（1994−）, 女, 博士, 研究方向: 食品科学, E-mail: lqz20172208008@163.com。

*** 通信作者:** 邱超（1989−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品科学, E-mail: phdqiu@jiangnan.edu.cn。

with the hardness of the resulting hydrogels. Specifically, the hardness values of PP-1.5% Car-G, PP-15.0% CS-G, and PP-1.5% SA-G were 626.49, 790.67, and 287.85 g, respectively, indicating enhanced gel structure. 3D printing tests demonstrated that the PP-Car and PP-CS inks produced constructs with well-defined structures and clear textures, showing superior structural integrity compared to the PP-SA system. In terms of swallowing properties, all hydrogels met the criteria of Level 7 as defined by the International Dysphagia Diet Standardisation Initiative (IDDSI), corresponding to regular, easy-to-chew textures. This study successfully developed three plant protein-based composite hydrogel systems with good 3D printability and swallowing performance, providing a reference for the personalized development of easy-to-swallow foods using 3D printing technology.

Key words: pea protein; easy to swallow; hydrogel; texture; 3D printing

吞咽障碍是指食物从入口到运送到胃这一过程存在困难，是一种以上消化道吞咽功能异常为特征的疾病[1−2]。老年人随着年龄的增长，生理功能下降或患有各种疾病[3−5]，成为吞咽障碍的高发人群。吞咽障碍不仅影响患者的营养摄入和生活质量，还可能引发误吸、肺炎等严重并发症[6]。随着全球老龄化趋势日益加剧，吞咽障碍人群数量逐年上升，成为亟待解决的公共健康问题之一，开发安全、适口、营养均衡且质地可控的易吞咽食品成为重要研究方向。水凝胶是一类具有三维网络结构、富含水分且可通过调节其组成、比例及制备工艺，实现对其大小、质地、结构和功能的精准调控，在易吞咽和个性化食品开发中具有良好的应用潜力[7−8]。

3D 打印是一种基于数字坐标逐层沉积制造物体的技术[9]，可以制造出形状和结构复杂的物体，并且具有操作简便、快速成型、一致性高等优势[10−12]。3D 食品打印可以通过食物组分复配和数字化设计开发出质地改善，功能强化并且具有视觉吸引力的个性化食品，为吞咽障碍患者提供更多的食品选择种类，改善用餐体验[13]。然而，3D 食品打印的关键技术瓶颈是打印“油墨”的可控性，理想的打印材料需具备良好的流变性能（如剪切变稀和触变恢复）以实现顺利挤出，及适当的机械性以确保打印后结构完整[14]。

豌豆蛋白（Pea protein, PP）是一种兼具乳化性、成胶性和营养价值的植物蛋白，适合用于易吞咽食品开发。但其自身凝胶性较弱、机械性能不足，限制了其在 3D 打印和质地调控中的应用。近年来，研究者尝试通过与多糖协同作用构建复合凝胶体系以改善其流变和凝胶性能。例如，已有研究利用黄原胶调控豌豆蛋白体系的流变性以实现 3D 打印，并通过调节 PP 和黄原胶之间的相互作用改变打印物体的质地以满足安全的吞咽需求[15]。

本研究以 PP 为主要基质，分别引入三种具有不同成胶机制的多糖：卡拉胶（κ-Carrageenan, Car）、玉米淀粉（Corn starch, CS）和海藻酸钠（Sodium alginate, SA），制备三种 3D 打印复合油墨（PP-Car、PP-CS、PP-SA），并进一步诱导使其凝胶化形成水凝胶（PP-Car-G、PP-CS-G、PP-SA-G），如图 1 所示。系统评估其流变性能、质构特性、3D 打印适应性及吞咽特性，并结合国际吞咽障碍饮食标准化倡议（International dysphagia diet standardization initiative, IDDSI）标准分类验证其在吞咽障碍食品开发中的应用可行性。该研究通过比较三种不同成胶机制的多糖协同 PP 构建复合水凝胶对打印性与吞咽适应性的影响，为 3D 打印植物蛋白基功能食品的质地调控与个性化开发提供理论依据和实践参考。

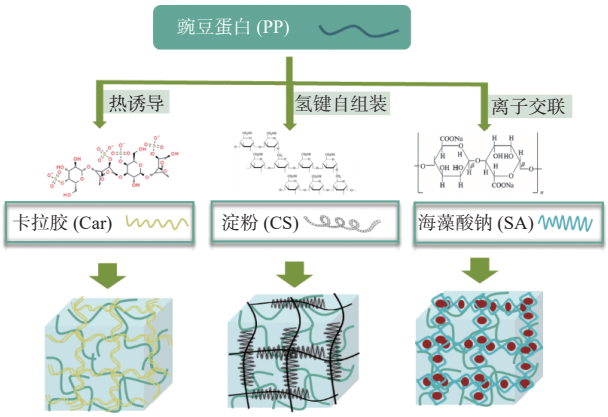


图 1　PP 分别与 Car、CS、SA 形成水凝胶的示意图

Fig.1　Schematic diagram of PP forming hydrogels with Car, CS and SA, respectively

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

PP　由双塔基团有限公司供应（中国山东）；Car　购自漳州绿星海洋生物技术有限公司（中国漳州）；SA　购自中国上海国药化学试剂；CS　由诸城兴贸玉米开发有限公司提供（中国山东）。

Discovery HR-3 旋转流变仪　美国 TA 仪器有限公司；TA-XTplus 质构仪　英国 SMS 公司；挤出型食品 3D 打印机　中国杭州时印科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　PP-多糖复合油墨的制备　分别配制 0.5%、1.0%、1.5% 的 Car 分散液，5%、10%、15% 的 CS 分散液和 0.5%、1.0%、1.5% 的 SA 溶液各 50 mL。分别向上述溶液中加入 12 g 的 PP 粉末，用玻璃棒充分搅拌直到混合均匀后可作为 3D 打印的复合油墨。根据多糖的种类和浓度分别将油墨命名为 PP-0.5% Car、PP-1.0%Car、PP-1.5%Car、PP-5%CS、PP-10% CS、PP-15%CS、PP-0.5%SA、PP-1.0%SA 和 PP-1.5%SA，测定上述油墨的 pH 范围为 6.6~6.9。

1.2.2 PP-多糖复合油墨的流变性测试 对于油墨的流变学特性采用旋转流变仪进行测试,夹具选用直径为 20 mm 的平板夹具。测试温度设为 25 ℃,间隙设为 1 mm,测试前在样品周围涂硅油以减少测试过程中水分的蒸发对于测试结果的影响。

静态剪切扫描:测定 0.1~100 s^{-1} 剪切速率范围内油墨表观黏度变化。

振荡时间扫描:采用 0.1% 和 100% 的交替应变评估油墨的恢复性。在 1、3、5 阶段施加 0.1% 的小应变,在 2、4、6 阶段施加 100% 的大应变,每个阶段持续时间为 120 s,记录整个扫描过程中储能模量(G')和损耗模量(G")的变化。

动态温度扫描:在固定频率为 10 rad/s,应变为 1% 的条件下,以 5 ℃/min 的升温速率在 25~90 ℃ 的温度范围内对复合油墨进行温度扫描,以评估温度对 3D 打印油墨的影响。

1.2.3 PP-多糖复合油墨 3D 打印 使用挤出式 3D 打印机进行打印试验,模型选用自带的 G-Code 格式模型,将配制好的油墨装入 3D 打印机的料筒中,在 25 ℃ 温度下进行打印。喷嘴直径选为 0.4 mm,移动速度设为 15 mm/s 进行打印。

1.2.4 打印物体的凝胶化 根据不同多糖的成胶方式不同,采用不同方式将 3D 打印后的物体进行凝胶化。对于 PP-Car 和 PP-CS 的油墨,经 3D 打印后,在 90 ℃ 水浴中隔水加热 10 min,然后储藏在 4 ℃ 冰箱中。对于 PP-SA 的油墨,经 3D 打印后浸泡在 2% 的 $CaCl_2$ 溶液中 4 h,取出后用蒸馏水冲洗表面残留的 $CaCl_2$,然后放在 4 ℃ 冰箱中储存。经凝胶化后的 PP 复合水凝胶分别命名为 PP-0.5% Car-G、PP-1.0% Car-G、PP-1.5% Car-G、PP-5% CS-G、PP-10% CS-G、PP-15% CS-G、PP-0.5% SA-G、PP-1.0% SA-G 和 PP-1.5% SA-G。

1.2.5 PP-多糖复合水凝胶质构测试 采用质构分析仪测定 PP 复合水凝胶的质构特征。水凝胶样品被切割成直径 22 mm,高 25 mm 的圆柱形样品。选用 P/0.5 探头,压缩应变为 50%,试验过程中,探头移动速度为 1 mm/s。根据力-形变曲线测定其硬度、内聚性和咀嚼性。

1.2.6 PP-多糖复合水凝胶 IDDSI 测试 通过质构仪配置的 A/IDDSI 探头进行 IDDSI 测试。探头形状被设计成圆弧和叉子,模仿原始测试中的拇指按压和叉子压缩。探头以 2 mm/s 的速度向下移动至 3.825 N 的力时,探头停止移动并在这个位置保持 10 s,再以 10 mm/s 的速度移动回到起始位置。

1.3 数据处理

所有实验均重复三次,结果采用平均值±标准差形式表示。绘图采用 Origin 2018 软件,统计学分析采用 SPSS V.17 软件。采用 Duncan 检验分析样本的差异显著性,$P<0.05$ 认为差异显著。

2 结果与分析

2.1 PP-多糖油墨的流变分析

图 2 分别显示了 PP-Car、PP-CS、PP-SA 表观黏度随剪切速率的变化趋势。所有油墨均表现出剪切变稀的特性,这意味着随着剪切速率的增加,油墨的表观黏度逐渐下降。这种性质对于挤出型 3D 食品打印是十分必要的,可使油墨在螺杆挤压的状态下黏度下降,从而具有足够的流动性被顺滑挤出[16]。图 2d 为 24%PP 以及选取了最高浓度的多糖(1.5% Car、15%CS、1.5%SA)作为对照进行黏度分析,可以

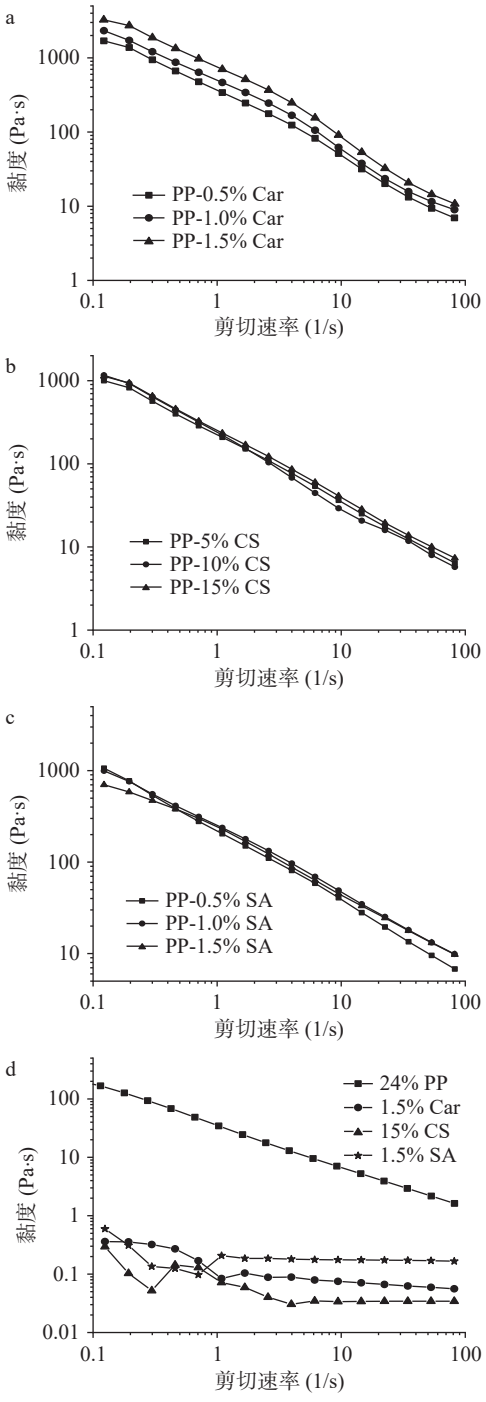


图 2 PP-Car、PP-CS、PP-SA 复合油墨以及对照样品的静态剪切扫描曲线

Fig.2 Steady shear sweep curves of PP-Car, PP-CS, PP-SA composite inks and control samples

看出 24% 的 PP 仍遵循剪切变稀的特性，而多糖则随着剪切速率增大，黏度逐渐趋于不变，并且黏度值远低于 PP，这也说明 PP 在体系中提供了主要的黏度，对于顺利进行 3D 打印起了关键作用。

通过振荡时间扫描评估 PP-多糖可食 3D 打印油墨的恢复性，结果如图 3 所示。在小应变（0.1%）作用下，所有油墨样品均表现出类固体的凝胶特性（G'>G"）。根据单独的 PP 以及多糖样品的交替应变扫描也可以看出，24% 的 PP 的模量远大于多糖分散液，这也说明 PP 对于 3D 打印油墨的机械性起到了关键作用。其中，对于 PP-Car 和 PP-CS 油墨，由于 Car、CS 和 PP 在室温下均未溶解，类固体的凝胶行为主要是蛋白颗粒和多糖颗粒堆积产生的。而对于 PP-SA 样品，PP 未溶解，呈颗粒状态相互聚集堆叠，SA 呈溶解的分子状态，但由于缺少交联，SA 分子无法形成三维网络结构。因此油墨的机械性主要是由于 PP 颗粒堆积产生的。当应变增大时（100%），G"即刻超过 G'，样品表现出类似流体的行为，这说明大应变破坏了油墨中分子间的非共价相互作用。当应变再次减小（0.1%），样品的模量立即变为 G'>G"，这证明油墨能够快速恢复其类固体的凝胶特性。对于 3D 打印而言，这种快速恢复性能保证油墨在挤出时具有类似液体的行为，在沉积后恢复到类似固体的结构，以支持其自身的结构稳定[13]。PP-多糖复合油墨流变测试结果显示出的剪切变稀和自恢复性表明它们具有应用于食品 3D 打印的潜力。Lu 等[17] 的研究中也得到了类似的结果，纤维素纳米晶和豌豆蛋白复合水凝胶具有剪切变稀特性，在 0.5% 和 30% 应变下交替三次表现出良好的自恢复性能，可用于食品 3D 打印研究。

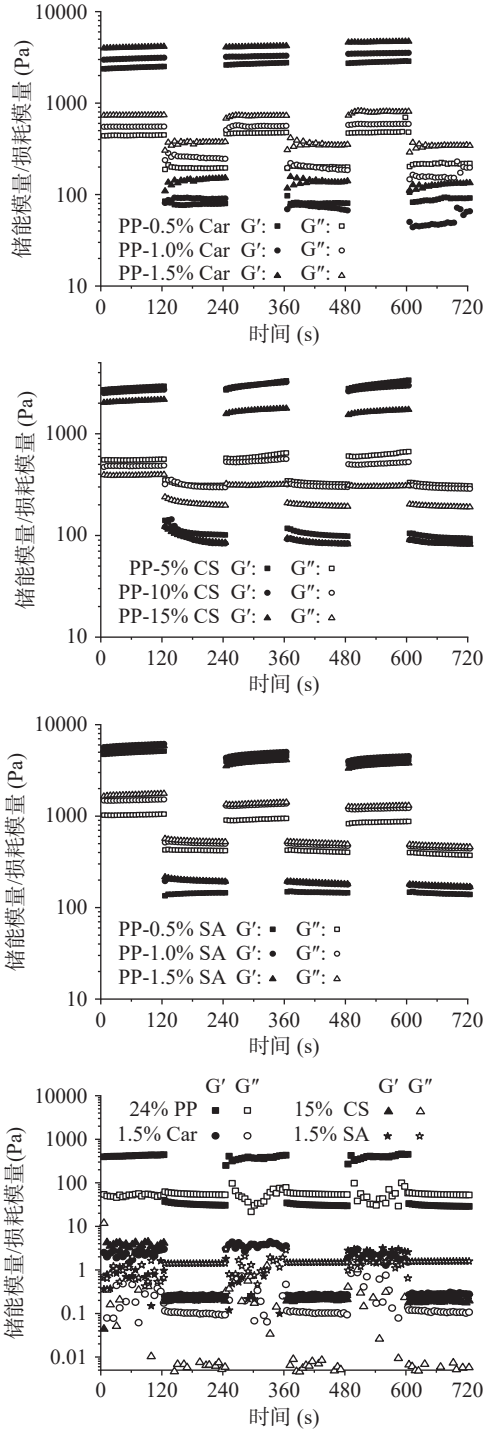


图 3　PP-Car、PP-CS、PP-SA 复合油墨以及对照样品的交替应变扫描

Fig.3　Alternate strain scanning of PP-Car, PP-CS, PP-SA composite inks and control samples

由于 PP-Car 和 PP-CS 是通过加热、冷却凝胶化的，所以通过温度扫描测试了 PP-Car 和 PP-CS 复合油墨的模量随温度的变化，结果如图 4 所示。多糖种类对复合油墨的温度扫描结果有着显著影响。对于 PP-Car 样品，随着温度的升高，测试样品的模量呈现一直下降的趋势，这是由于在升温过程中，Car 分子逐渐溶解，呈现无规则卷曲状态[18]。同时 PP 分子受热变性，分子展开，暴露出更多的疏水氨基酸和活性基团，颗粒堆积的状态被破坏，导致模量下降[19]。降温阶段时，溶解的 Car 分子逐渐向螺旋结构转变，分子的螺旋区域之间形成了氢键并聚集成凝胶网络[20]。PP 在疏水和二硫键的作用下也逐渐聚集[21]。Car 浓度越高，降温后得到的凝胶模量越高，这是由于浓度高时形成的凝胶网络更致密，凝胶性更强。而 PP-CS 样品则是在升温过程中，模量有一个明显增加的过程，这是由于 CS 颗粒加热时吸水，导致颗粒中的结晶区域融化，颗粒变形，直链淀粉浸出以及与淀粉颗粒纠缠[22]。温度下降后，CS 分子在氢键作用下重排，并自组装成双螺旋结构形成凝胶网络。与 PP-Car 相似的是，CS 浓度越高，降温后得到的复合凝胶模量越高，凝胶性越强。但 PP-Car 和 PP-CS 所有样品在整个温度变化范围内，均显示出 G'>G"的凝胶状态，这对于样品在热加工过程中的稳定性是有利的。

2.2　PP-多糖油墨的 3D 打印性能分析

为了研究多糖种类和浓度对 PP 油墨 3D 打印性能的影响，选取了“南瓜”作为打印模型进行打印，结果如图 5 所示。在所选浓度范围内，PP-Car 和 PP-CS 均表现出良好的可打印性，打印后的物体表

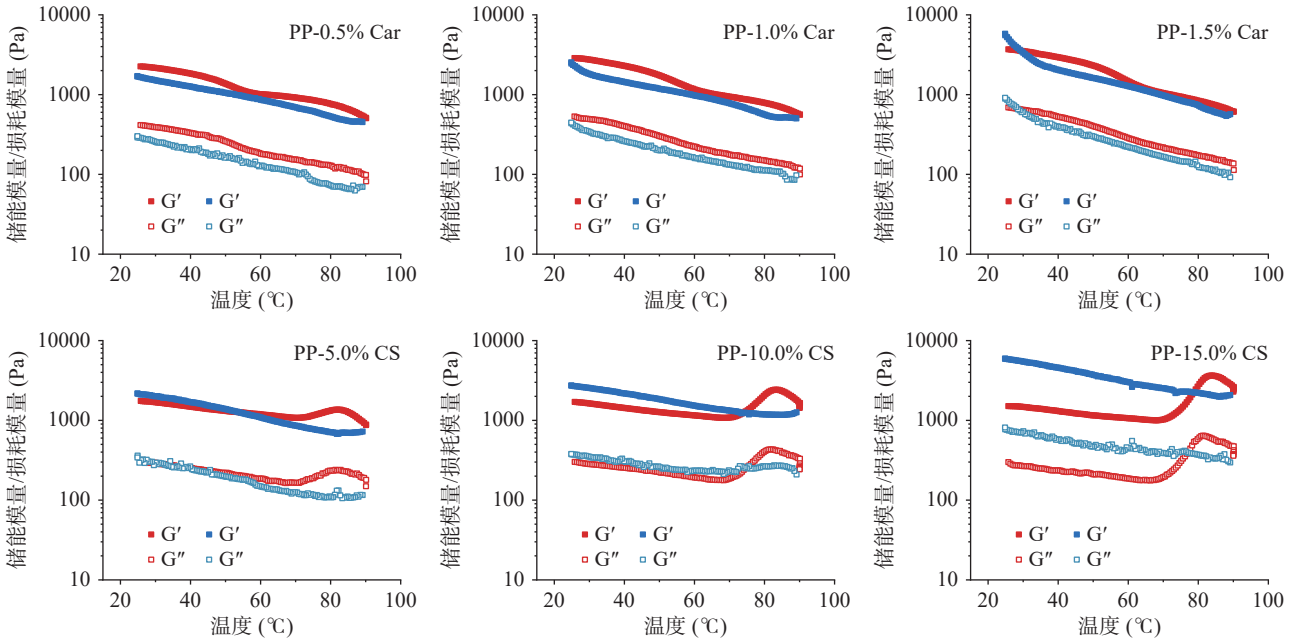


图 4 不同浓度 Car 和 CS 与 PP 形成复合油墨在升温(红色: 25~90 ℃)和降温(蓝色: 90~25 ℃)过程中的模量变化

Fig.4 Modulus changes of the composite inks formed by PP with different concentrations of Car and CS during heating (red: 25~90 ℃) and cooling (blue: 90~25 ℃)

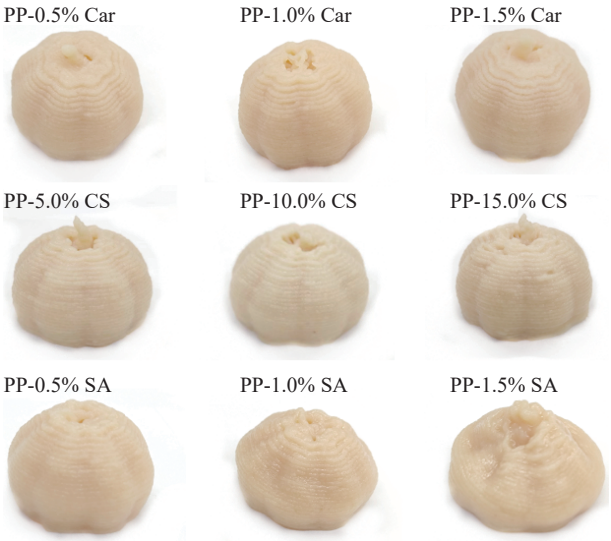


图 5 不同浓度 Car、CS、SA 与 PP 形成复合油墨后 3D 打印南瓜照片

Fig.5 Photos of 3D printed pumpkins formed by PP with different concentrations of Car, CS, and SA

面光滑, 具有清晰的沉积层状结构, 无坍塌的现象。前期的实验发现 24%PP 和不同浓度的 Car(0.5%、1.0%、1.5%)、CS(5.0%、10.0%、15.0%)分散液均呈现流动状态, 经 3D 打印机挤出后无法维持物体的结构, 因此未作为打印样品进行分析。这也说明 PP-Car 和 PP-CS 油墨的打印性需要由 PP 和多糖共同提供, 二者复合后黏度和机械性增大(图 2 和图 3), 保证了复合油墨经挤出后有足够的机械强度支撑物体的结构。类似的, 单独的 SA 溶液在不同浓度时(0.5%~1.5%)呈现出流动状态, 也无法进行 3D 打印, 而对于 PP 与 SA 形成的复合油墨, PP-0.5%SA 基本保持完整的打印形态, 与 PP-Car 和 PP-CS 打印性相似。然而随着 SA 浓度的增大, 打印物体的质量降低, PP-1.5%SA 的油墨打印后无法保持完整的形状, 出现坍塌的现象。一方面这可能跟 PP 和 SA 静电相互作用有关, PP 和 SA 主要带负电荷, 因此分子间的静电斥力导致聚合物链的膨胀使黏度降低[23]。另一方面可能是由于 SA 处于未交联的分子状态, 高浓度游离的 SA 分子增加了体系的流动性, 因此难以支撑打印物体的结构。

PP-多糖油墨通过 3D 打印得到长×宽×高为 2 cm×2 cm×1.5 cm 的长方体, 凝胶化前后的长方体形态变化如图 6 所示。对于 Car 和 CS, 在所选浓度范围内与 PP 复配后均具有良好的打印性, 打印的长方体表面光滑, 纹理清晰, 并且结构保持完整无坍塌。PP-Car 和 PP-CS 是通过加热、冷却凝胶化的, 可以看出在加热前后长方体的形状几乎保持不变, 打印的层状结构依旧清晰可见, 这说明打印的物体具有良好的温度稳定性, 可以适应食品生产或食用时的热加工过程。对于 SA 与 PP 复配后, 打印后的长方体随着 SA 浓度的增加逐渐不稳定, 发生部分塌陷, 这与上述打印性能分析结果一致。PP-SA-G 是通过将打印后的长方体浸泡到 $CaCl_2$ 溶液中而得到的。值得注意的是, 凝胶化后的 PP-SA-G 体积发生收缩, SA 浓度越高, 体积收缩越大。这是由于 SA 溶解后分子链上的羧基(COO-)电离并带负电荷, 与 Ca^{2+}结合后形成“蛋盒”结构从而形成水凝胶网络[24], 在这个过程中 Ca^{2+}与羧酸根结合形成交联点, 这种交联使分子链排列更致密, 导致部分水被挤出从而使体积收缩。

2.3 PP-多糖复合水凝胶质地分析

质构测试能够模拟口腔咀嚼和吞咽过程, 可用于分析产品的吞咽特性。通过质构仪测试了 PP-多



图 6　PP 复合油墨经 3D 打印的长方体及凝胶化后的照片

Fig.6　PP composite inks 3D printed cuboid and gelatinized photos

糖复合水凝胶的硬度、内聚性和咀嚼性，结果如表 1 所示。PP-多糖复合水凝胶的硬度、内聚性与咀嚼性均随多糖浓度升高而显著增加(P<0.05)，表现出浓度依赖性。其中，硬度作为反映第一口咀嚼所需力值的指标[25]，在三种凝胶中均随多糖浓度升高而增强，PP-15.0% CS-G 硬度最高(790.67±55.86 g)，显著高于其 5.0% 和 10.0% 样品(P<0.05)，PP-1.5% Car-G 也达到较高水平(626.49±53.90 g)，这是因为更高的聚合物浓度相互缠结形成了更致密的三维网络结构，因此硬度增加。内聚性可以反映样品内部之间的结合强度[26]，研究报道，内聚性高的样品内部之间结合更强，在吞咽过程中不易分散成小颗粒，有利于安全吞咽[27]。三种凝胶在高浓度(PP-1.5% Car-G、PP-15.0% CS-G、PP-1.5% SA-G)时内聚性均达到了 0.84~0.85，显著高于低浓度组(P<0.05)，说明多糖浓度越高，内部网络结构越致密，结合力越强。咀嚼性趋势与硬度一致，PP-15.0% CS-G 咀嚼性最高(564.44±55.84 g)，显著高于其低浓度样品及其他组别(P<0.05)。此外，硬度与咀嚼性之间呈正相关性，与已有文献报道一致，说明更高硬度通常伴随更强的咀嚼力[28−29]。三类复合水凝胶的质构性质在不同多糖体系中均可通过调控浓度实现有效调节，为开发具有可控口感与良好吞咽性的功能食品提供参考依据。

表 1　PP-多糖复合水凝胶质构参数

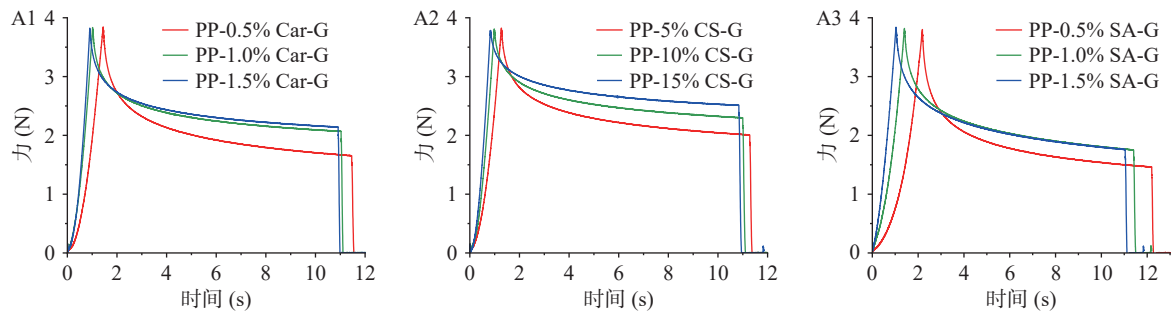
Table 1　Texture parameters of PP-polysaccharide composite hydrogels

样品	硬度(g)	内聚性	咀嚼性(g)
PP-0.5%Car-G	161.10±13.32^{f}	0.75±0.02^{c}	106.51±14.05^{f}
PP-1.0% Car-G	479.84±21.52^{c}	0.84±0.03^{ab}	380.65±3.30^{c}
PP-1.5% Car-G	626.49±53.90^{b}	0.85±0.02^{a}	477.00±37.31^{b}
PP-5.0% CS-G	128.08±34.64^{f}	0.78±0.03^{c}	98.67±35.84^{fg}
PP-10.0% CS-G	425.70±38.70^{d}	0.84±0.02^{ab}	324.78±31.03^{d}
PP-15.0% CS-G	790.67±55.86^{a}	0.84±0.01^{ab}	564.44±55.84^{a}
PP-0.5% SA-G	133.67±8.46^{f}	0.57±0.08^{d}	50.72±20.10^{g}
PP-1.0% SA-G	269.66±11.03^{e}	0.80±0.00^{bc}	195.58±10.53^{e}
PP-1.5% SA-G	287.85±23.15^{e}	0.85±0.02^{a}	231.61±16.06^{e}

注：同列不同小写字母代表差异显著(P<0.05)。

2.4　国际吞咽障碍饮食标准化倡议（IDDSI）分析

IDDSI 旨在为咀嚼和吞咽障碍人群提供全球标准化术语和定义。IDDSI 使用双金字塔设计在单一尺度上呈现食物和液体的 8 个级别(0~7)来描述食物质地和饮品稠度[30]。通过质构仪模拟 IDDSI 测试可以创建一套定量仪器程序，更好地模拟手动 IDDSI 方法，确保了更高的可重复性和标准化。图 7 为测试过程中样品的受力曲线，斜率越大，说明样品硬度越高。可以看出，多糖的种类和浓度可影响样品的硬度，浓度越大，凝胶网络的缠结和交联越多，因此凝胶具有更强的网络结构。PP-Car-G、PP-CS-G、PP-SA-G 三种复合水凝胶均呈现 IDDSI 中 7 级常



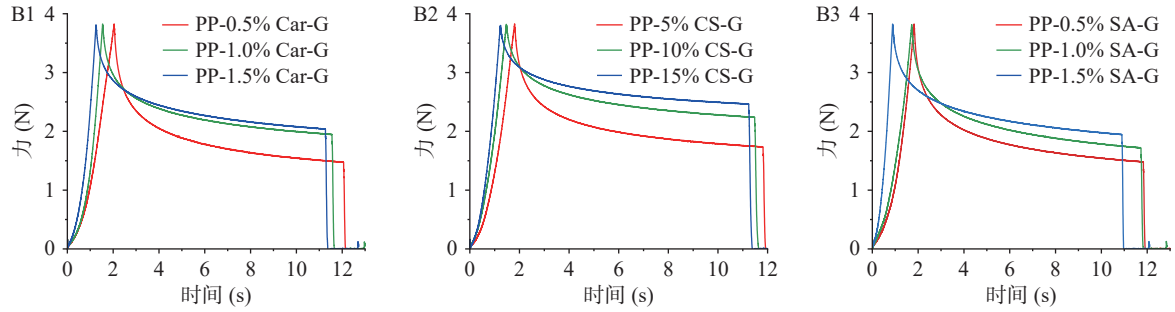


图 7 PP-多糖复合水凝胶 IDDSI 图

Fig.7 IDDSI diagram of PP-polysaccharide composite hydrogels

注: 勺子压缩: A1~A3; 叉子压缩: B1~B3

规食品的质地特征, 属于容易咀嚼、质地柔软的日常食物[31]。

3 结论

本研究基于物理交联通过 PP 协同 Car、CS、SA 三种多糖复合构建了 3D 打印复合水凝胶体系。单独的 PP 或多糖不具备 3D 打印所需的流变性和机械支撑, PP 与多糖复配后的油墨可实现 3D 打印。流变学测试结果显示出打印油墨具有剪切变稀的假塑性流体和应变恢复特性, 适用于挤出性 3D 打印。在所选的多糖浓度范围内, PP-Car、PP-CS 打印油具有良好打印精度, 打印物体结构完整, 表面光滑, 纹理清晰。由于 SA 和 PP 的静电相互作用, PP-SA 油墨随着 SA 浓度的增加打印结构逐渐趋于不稳定。PP-Car 和 PP-CS 经过加热、冷却而凝胶化, 90 ℃ 加热对于打印物体的外观影响较小, 温度扫描也显示出其具有良好的温度稳定性, 可适应食品加工和食用过程中的热处理。PP-SA 通过离子交联实现凝胶化, Ca^{2+}交联可导致凝胶体积收缩。三种 PP-多糖复合水凝胶的硬度和内聚性随多糖浓度的增加而增加, 但均属于 IDDSI 框架中 7 级常规食物质地范畴。本研究构建的豌豆蛋白基复合水凝胶在易吞咽食品质地改善及个性化定制方面具有较大的应用潜力。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] HOU Jingjie, LIU Mengzhuo, LIU Yujia, et al. Strategy to kill two birds with one stone: High internal phase Pickering emulsions to modulate 3D printed pork texture as a dysphagia diet[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141319.

[2] TECHASUKTHAVORN V, ANUNTAGOOL J. Rheological properties and visual cohesiveness of soy protein-based formulations without thickening agents in dysphagic management[J]. Food Hydrocolloids for Health, 2025, 7: 100193.

[3] LIU Xiao, FENG Yulin, LI Ren, et al. Comprehensive review of dysphagia and technological advances in dysphagia food[J]. Food Research International, 2025, 199: 115354.

[4] TRAN E K, JUAREZ K O, LONG J L. Stem cell treatments for oropharyngeal dysphagia: Rationale, benefits, and challenges[J]. World Journal of Stem Cells, 2020, 12(9): 1001−1012.

[5] DRUMOND N, STEGEMANN S. Better medicines for older patients: Considerations between patient characteristics and solid oral dosage form designs to improve swallowing experience[J]. Pharmaceutics, 2021, 13(1): 32.

[6] LIU Shuhan, QIAO Dongling, CHENG Zihang, et al. Towards designing dysphagia foods: Recent advances in influencing factors and computer modeling for the swallowing of thickened fluids[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 137: 17−30.

[7] LI Jinlong, JIA Xin, YIN Lijun. Hydrogel: Diversity of structures and applications in food science[J]. Food Reviews International, 2021, 37(3): 313−372.

[8] 李安琪, 尚静, 李前进, 等. 基于蛋白质、多糖混合体系的食品凝胶结构设计策略[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 344−352. [LI Anqi, SHANG Jing, LI Qianjin, et al. Structural sesign strategies for food gels based on protein-polysaccharide hybrid systems[J]. Food Science, 2021, 42(13): 344−352.]

[9] FENG Lei, WU Jingnan, CAI Lei, et al. Effects of different hydrocolloids on the water migration, rheological and 3D printing characteristics of *β*-carotene loaded yam starch-based hydrogel[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133422.

[10] CHEN J W, MU T H, GOFFIN D, et al. Application of soy protein isolate and hydrocolloids based mixtures as promising food material in 3D food printing[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 261: 76−86.

[11] MA Tao, LÜ Linxiang, OUYANG Chengzheng, et al. Rheological behavior and particle alignment of cellulose nanocrystal and its composite hydrogels during 3D printing[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 253: 117217.

[12] WANG Mingshuang, LI Dongnan, ZANG Zhihuan, et al. 3D food printing: Applications of plant-based materials in extrusion-based food printing[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(26): 7184−7198.

[13] CHAO C, KYONG N, JIN P, et al. Potentials of 3D printing in nutritional and textural customization of personalized food for elderly with dysphagia[J]. Applied Biological Chemistry, 2024, 67(1): 25.

[14] ZHENG Luyao, LIU Junbo, LIU Rui, et al. 3D printing performance of gels from wheat starch, flour and whole meal[J]. Food Chemistry, 2021, 356: 129546.

[15] LIU Zhenbin, CHEN Xi, DAI Quanyu, et al. Pea protein-xanthan gum interaction driving the development of 3D printed dysphagia diet[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108497.

[16] ZHANG L J, ZAKY A A, ZHOU C F, et al. High internal phase Pickering emulsion stabilized by sea bass protein microgel

particles：Food 3D printing application[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107744.
[17] LU Shuyu, DIAO Shanshan, HU Xinna, et al. Enhancement effect of cellulose nanocrystal on the rheological properties and 3D printing performance of pea protein isolate-based hydrogels[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 168: 111477.
[18] WANG Xiuchao, GUO Chuanyan, GUO Hongge. Progress of carrageenan-based films and coatings for food packaging applications[J]. Packaging Technology and Science, 2024, 37(6): 533−550.
[19] LIN Qianzhu, SHANG Mengshan, LI Xiaojing, et al. Rheology and 3D printing characteristics of heat-inducible pea protein-carrageenan-glycyrrhizic acid emulsions as edible inks[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109347.
[20] KAMLOW M A, HOLT T, SPYROPOULOS F, et al. Release and co-release of model hydrophobic and hydrophilic actives from 3D printed kappa-carrageenan emulsion gels[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107852.
[21] LIN Qianzhu, HU Yao, QIU Chao, et al. Peanut protein-polysaccharide hydrogels based on semi-interpenetrating networks used for 3D/4D printing[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108332.
[22] SINGH N, SINGH J, KAUR L, et al. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources[J]. Food Chemistry, 2003, 81(2): 219−231.
[23] DELANNE-CUMÉNAL A, LAINÉ E, HOFFART V, et al. Effect of molecules' physicochemical properties on whey protein/alginate hydrogel rheology, microstructure and release profile[J]. Pharmaceutics, 2024, 16(2): 258.
[24] WANG Yi, ZHAO Yiguo, HE Jun, et al. Doubling growth of egg-box structure during calcium-mediated molecular assembly of alginate[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 634: 747−756.
[25] CHANDRA M V, SHAMASUNDAR B A. Texture profile analysis and functional properties of gelatin from the skin of three species of fresh water fish[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(3): 572−584.
[26] PHUHONGSUNG P, ZHANG M, DEVAHASTIN S. Investigation on 3D printing ability of soybean protein isolate gels and correlations with their rheological and textural properties via LF-NMR spectroscopic characteristics[J]. LWT, 2020, 122: 109019.
[27] WANG X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Easy-to-swallow mooncake using 3D printing: Effect of oil and hydrocolloid addition[J]. Food Research International, 2023, 164: 112404.
[28] CHEN Yu, LIANG Ying, LIU Hao, et al. Extrusion of wheat gluten-peanut oil complexes and their rheological characteristics[J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130435.
[29] TONNI I, RICCIARDI G, PIANCINO M G, et al. The influence of food hardness on the physiological parameters of mastication: A systematic review[J]. Archives of Oral Biology, 2020, 120: 104903.
[30] CICHERO J A Y. Evaluating chewing function: Expanding the dysphagia field using food oral processing and the IDDSI framework[J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(1): 56−66.
[31] SUNGSINCHAI S, NIAMNUY C, WATTANAPAN P, et al. Texture modification technologies and their opportunities for the production of dysphagia foods: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(6): 1898−1912.