时春青, 韩四海, 王言彬, 等. 大豆低聚肽对小麦面团和面包品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 82−89. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050080

SHI Chunqing, HAN Sihai, WANG Yanbin, et al. Effects of Soy Oligopeptides on the Quality Characteristics of Wheat Dough and Bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 82−89. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050080

· 研究与探讨 ·

大豆低聚肽对小麦面团和面包品质特性的影响

时春青[1], 韩四海[1,2,3,*], 王言彬[1], 贺婧雨[1], 李佩艳[1,2,3], 岳崇慧[1,2,3], 白周亚[1,2,3], 王立博[1,2,3], 罗登林[1,2,3]

（1.河南科技大学食品与生物工程学院, 河南洛阳 471023;
2.河南省食品原料工程技术研究中心, 河南洛阳 471023;
3.河南省食品绿色加工与质量安全控制国际联合实验室（河南科技大学）, 河南洛阳 471023）

摘　要: 为研究大豆低聚肽在小麦面包中的潜在应用价值，本文采用低场核磁共振、食品流变仪、扫描电子显微镜和傅里叶变换中远红外研究了大豆低聚肽（以 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1% 替代小麦粉）对小麦面团水分分布、流变学特性、微观结构及蛋白质二级结构的影响，面团制成面包后，探究了大豆低聚肽对面包的比容、孔隙率、质构特性、相对结晶度的影响。结果表明，在大豆低聚肽取代量为 1% 时，与对照组相比，面团中自由水的含量降低了 1.71%（P<0.05）。流变学分析结果表明，大豆低聚肽的加入能够降低面团的 G'和 G"值，增加面团的黏性。红外光谱表明，大豆低聚肽加入面团中，有序结构（β-折叠和 α-螺旋）的总和最大可增加 7.35%，说明大豆低聚肽的取代在一定程度上可以促进面团由无序向有序结构的转变。添加大豆低聚肽能够显著增加面包的比容、孔隙率、降低面包的硬度（P<0.05），当大豆低聚肽的取代量为 0.4% 时，面包的硬度与对照组相比降低了 42.27%，面包的相对结晶度与对照组相比降低了 1.16%，同时在此取代量下面包的气孔更加均匀细腻，口感更加柔软适口。综上，SOP 在低取代量下对面包的品质具有积极的影响。

关键词: 大豆低聚肽, 面团, 水分分布, 微观结构, 面包, 质构特性, 感官评价

中图分类号: TS213.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0082−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050080

本文网刊:

Effects of Soy Oligopeptides on the Quality Characteristics of Wheat Dough and Bread

SHI Chunqing[1], HAN Sihai[1,2,3,*], WANG Yanbin[1], HE Jingyu[1], LI Peiyan[1,2,3], YUE Chonghui[1,2,3], BAI Zhouya[1,2,3], WANG Libo[1,2,3], LUO Denglin[1,2,3]

（1.College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2.Henan Engineering Research Center of Food Material, Luoyang 471023, China;
3.Henan International Joint Laboratory of Food Green Processing and Safety Control (Henan University of Science and Technology), Luoyang 471023, China）

Abstract: To explore the potential application value of soy oligopeptides (SOP) in wheat bread, low-field nuclear magnetic resonance spectrometer, rheometer, scanning electron microscopy (SEM), and Fourier-transform infrared spectrometer (FTIR) were used to investigate the effects of SOP (replacing wheat flour at 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1%) on the moisture distribution, rheological properties, microstructure, and secondary structure of protein in wheat dough. After baking the dough into bread, the effects of SOP on the specific volume, porosity, textural properties, and relative

收稿日期: 2025−05−12

基金项目: 国家自然科学基金（32302075, 32202096）。

作者简介: 时春青（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品精深加工理论与技术, E-mail: shichunqing_scq@163.com。

*** 通信作者:** 韩四海（1971−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: hansihai@haust.edu.cn。

crystallinity of the bread were investigated. The results showed that when the replacement amount of SOP was 1%, compared with the blank control group, the free water content in the dough decreased by 1.71% (P<0.05). Rheological analysis revealed that the addition of SOP reduced the G' and G" values of the dough and increased its viscosity. Infrared spectrum showed that SOP increased the total content of ordered structures (β-sheets and α-helixes) by up to 7.35%, suggesting a promotion of dough protein transformation from disordered to ordered conformations. The addition of SOP significantly increased the specific volume and porosity of bread and reduced its hardness (P<0.05). When the substitution level was 0.4%, the hardness of the bread decreased by 42.27% compared to the control group, and the relative crystallinity decreased by 1.16% compared with the control. At this substitution level, the bread exhibited a more homogeneous and finer cellular structure, accompanied by a softer and more palatable texture. These findings demonstrate that SOP exerts a beneficial impact on bread quality under low substitution conditions.

Key words: soy oligopeptides; dough; moisture distribution; microstructure; bread; textural properties; sensory evaluation

面包作为基础膳食的重要构成, 在当前食品工业领域, 为提升烘焙制品的品质, 制造商普遍采用添加改良剂的方法来提升面包的品质。面包改良剂通常包含酶制剂[1]、乳化剂[2]、亲水胶体[3] 等, 可以单独添加或以复合配方的形式应用, 这些改良剂的添加旨在改善面包的质地、口感及延长面包的保质期, 从而满足消费者对高品质食品的需求。尽管面包作为碳水化合物的重要来源具备基础营养价值, 但其在膳食结构完整性评估中仍显现出显著的短板, 如优质蛋白质和微量元素含量较少。随着人们生活水平的提高和健康意识的增强, 消费者对面包的需求发生了显著的变化。他们不再仅仅追求饱腹感, 而是更加注重面包的营养价值[4]。因此, 研究者们将研究重点聚焦于具有功能营养性的生物活性物质, 并将其加入面包面团之中, 从而使面包不仅在品质上得到显著的提升, 同时还具备了更好的营养特性。现有的研究表明, 肽因其良好的生理功能性和理化性质, 成为研究天然型功能食品的优质辅料, 目前已被广泛应用于食品领域, 作为一种新型的营养强化剂[5]。许多研究已经证实, 肽具有降血脂、降血压、抗癌等生理功能[6], 可以预防各种慢性疾病。Li 等[7] 研究发现, 将鱼胶原蛋白肽加入馒头中, 能够改善馒头的质地和抗氧化活性。Zhang 等[8] 研究发现, 将小麦低聚肽加入到面包卷中, 能够改善面包卷的比容和内部结构。大豆低聚肽(soy oligopeptides, SOP)是大豆蛋白经过水解后得到的小分子肽, 其分子量低于 1000 Da。这种肽类物质含有丰富的必需氨基酸, 且易于被人体消化吸收, 特别适合蛋白质消化吸收能力较弱的人群食用[9]。大豆低聚肽被认为具有多种健康益处, 包括抗高血压、抗胆固醇、改善脂质代谢、预防动脉硬化和抗疲劳等。作为一种高品质的功能性蛋白配料, 非常适合焙烤食品营养健康和创新的需求。

本研究旨在探讨大豆低聚肽对小麦面团特性和面包品质的影响。利用低场核磁、食品流变仪、扫描电子显微镜及傅里叶变换中远红外分析小麦面团的水分分布、流变特性、微观结构和蛋白质的二级结构等特性的变化。采用质构仪和 X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)分析小麦面包的质构特性和面包的相对结晶度, 并对添加大豆低聚肽后的面包的感官特性进行评价, 为大豆低聚肽在焙烤产品中的应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

大豆低聚肽(大豆蛋白的水解物, 分子量: ≤500 Da, 纯度: 92.8%)　湖北健肽生物科技有限公司; 高筋面粉　中国周口益海小麦工业有限公司; 绵白糖　中国南京日照凌云海糖业有限公司; 盐　中国湖北孝感市光岩华源盐业有限公司; 活性干酵母　中国湖北安琪酵母有限公司; 黄油　内蒙古伊利实业集团有限公司金山分公司。

PE4680 和面机　广东立仁电器实业有限公司; CF570 卡士发酵箱　中山卡士电器有限公司; SM522 烤箱　新迈机械有限公司; 10N-50A 真空冷冻干燥机　杭州旌斐仪器科技有限公司; SM-IT200 日本电子扫描电镜　惠州市华高仪器设备有限公司; TA.XT 食品物性分析仪　英国稳定微系统有限公司; DHR-2 食品流变仪　美国沃特斯公司; SmartLab SE X-射线多晶衍射仪　日本理学株式会社; NMI20-015V-I 低场核磁共振成像分析仪　上海纽迈电子科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　面团的制备　面团的基础配方: 高筋面粉 100 g、盐 1 g、活性干酵母 1.2 g、绵白糖 20 g、黄油 10 g 和水 51 g。分别用 SOP 替代 0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 和 1% 的高筋面粉(干基, w/w), 空白对照组不用 SOP 替代。SOP 先溶于水, 将干料混匀之后加入水, 使用和面机低速揉 3 min, 加入黄油后高速揉 4 min 制成面团。

1.2.2　面团水分分布的测定　采用低场核磁共振仪测定面团的水分分布。参照 Bai 等[10] 描述的方法, 并稍作修改。每个样品重量设定为 3±0.01 g, 搓成条用保鲜膜包裹置于核磁试管中, 实验参数设置如下: 连续扫描间隔时间(TW)为 3500 ms, 回波时间(TE)为 0.200 ms, 回波数(NECH)为 2000, 扫描次数(NS)为 16。为了确保准确性, 每个面团需要进行三次测量。

1.2.3 动态流变学特性的测定 面团的动态频率测试使用食品流变仪，为了避免发酵对流变特性的影响，制作面团时不添加酵母，参照 Azeem 等[11] 描述的方法，并稍作修改。从制备好的面团的中心区域取出 4 g 样品，搓成球状，放置在平行板(TA-DHR2，1.5 mm 间隙，40 mm 直径)中。把面团压至 1.5 mm 之后将多余部分刮掉，并涂上硅油，防止水分的流失，频率扫描参数设置为：恒定应变力为 0.5%，温度 25 ℃，频率范围 0.1~100 Hz。记录面团的弹性模量(G')、黏性模量(G")和 tanδ(tanδ=G"/G')。

1.2.4 微观结构的观察 将冻干后的面团样品截断面用导电胶固定在铝板上，并喷金。在 5 kV 电压下，用扫描电子显微镜观察面团的微观结构[12]。放大倍数为 500 倍。

1.2.5 蛋白质二级结构的测定 面团中蛋白质二级结构的测定，参照 Ke 等[13] 建立的方法，并稍作修改。将冷冻干燥的面团样品研磨成粉末与 KBr 按照 1∶100 的比例混合，通过傅里叶变换红外光谱在 4000~400 cm^{-1} 波数范围、分辨率为 4 cm^{-1}，扫描 32 次，测定面团中蛋白质的二级结构。利用 OMNIC 8.0 和 Peak Fit 4.0 软件进行处理，计算蛋白质二级结构的含量。

1.2.6 面包的制作过程 将制备好的面团分割成 60 g/个，然后整形搓圆后放入模具中，在模具中松弛 5 min，在 37 ℃、85% 相对湿度的发酵箱中发酵 90 min。将发酵好的面团放入已经预热好的烤箱中，上火温度 160 ℃，下火温度 170 ℃，烘烤 8 min。

1.2.7 面包的比容和孔隙率的测定 采用油菜籽置换法[14] 测定面包样品的比容(cm^3/g)。使用 Image J 软件对面包图像进行处理和数据计算。结果以孔隙率的形式呈现。

1.2.8 面包质构特性的测定 将面包芯切成小方块(2 cm×2 cm×2 cm)，使用食品物性分析仪测定面包的质构特性，使用 P/36R 探头[15]。面包测试参数为：测试前速率为 3 mm/s，测试中速率为 1 mm/s，测试后速率为 2 mm/s，触发力为 5 g，按压变量为 50%，间隔时间为 2 s。

1.2.9 面包相对结晶度的测定 面包样品冷冻干燥后磨成粉末，采用 X 射线衍射仪进行测定，扫描速度为 5°/min，衍射角范围为 5°~50°。目标电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA。利用 Origin 软件分析峰区和非晶区的晶体性质并用结晶式计算相对结晶度[16]。结果以相对结晶度表示。

$$TC = \frac{lc}{lc + la}$$

式中：TC 表示相对结晶度；lc 表示晶相的积分强度；la 表示非晶相的积分强度。

1.2.10 面包的感官评价 面包样品感官评价由 10 名经过培训的评审员(男女各 5 名，平均年龄 20~55 岁)，参照国家面包感官评价标准(国家标准 GB/T 20981-2021)略作调整。本研究获得了受试者的知情同意。面包样品被切成薄片(1 cm×1 cm×2 cm)，并放在随机编码的一次性塑料杯中。每次品尝后，要漱口。小组成员被要求对不同的感官指标进行评定并给出相应的分数，包括形态(15 分)：外观完整、丰满、无塌陷、无严重变形、大小均匀；色泽(15 分)：表面呈金黄色，色泽均匀，无异常色斑；面包芯质地(20 分)：柔软且富有弹性，无干硬、掉渣现象；纹理结构(20 分)：气孔均匀细腻，无大空洞；口感(30 分)：松软适口，无异味，无酸败味，吞咽顺畅。

1.3 数据处理

每个试验至少有三个重复，数据处理结果以均数±标准差表示。样本间的统计学差异采用单因素方差分析(ANOVA)，以 P<0.05 为统计学显著性。实验数据采用 Microsoft Excel、IBM SPSS Statistics 26 和 Origin Pro 2021 进行处理。

2 结果与分析

2.1 大豆低聚肽对面团水分分布的影响

图 1A 为面团典型的 T2 弛豫分布曲线，T21 代表结合水，是流动性最弱的水，说明水与淀粉、蛋白质等大分子结合紧密。T22 被称为半结合水，流动性介于结合水和自由水之间。T23 为流动性最大的自由水[17]。面团的主要成分是半结合水，随着 SOP 取代量的增加，当 SOP 的取代量大于等于 0.4% 时，T21

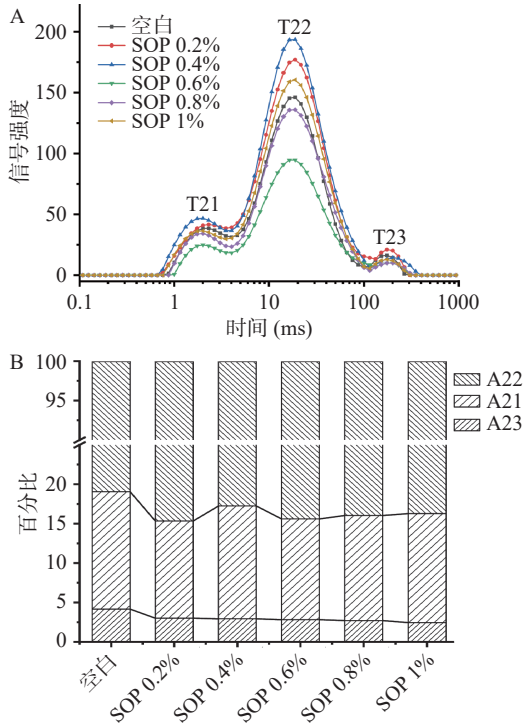


图 1 不同 SOP 取代量下面团中不同种类水分的 LF-NMR 谱(A)和相对百分比(B)

Fig.1 LF-NMR spectra (A) and relative percentages (B) of different categories of water in dough with different substitution quantity of SOP

与对照组相比是下降的，但在统计学上没有显著性的差异（P>0.05），T23 没有明显的规律。T21 是 T2 弛豫时间最短的峰，T21 降低表明面团体系中水分与大分子结合得更紧密，说明面团的持水能力增强[18]。研究结果与大蒜肽对面团中水分的影响结果相似，在面团中加入大蒜肽导致 T21 与对照组相比显著降低，表明面团的保水能力增强[19]。SOP 加入面团中导致水的流动性降低，这可能归因于 SOP 的强亲水性和强保水能力，SOP 含有多个亲水性氨基酸残基，这些氨基酸上的羧基和酰胺基团能够与水分子形成氢键。氢键可以限制水分子的运动，使得水分子的运动变得缓慢[20]。

图 1B 为结合水、半结合水和自由水的相对占比。随着 SOP 取代量的增加，面团中自由水（A23）的比例呈下降的趋势（P<0.05），当 SOP 取代量为 1% 时，面团中自由水的含量与对照组相比降低了 1.71%。SOP 的取代量越大，A23 越小，说明 SOP 的加入对面团自由水含量影响较大，而紧密结合水（A21）和半结合水（A22）整体比例呈现上升趋势，加入 SOP 后，A21 没有显著的变化，当 SOP 的取代量在 0.4% 时，A21 与对照组更接近。A22 与对照组相比均呈现增加的趋势，这是因为部分的紧密结合水和自由水向半结合水转变，归因于SOP 具有强吸水性，将部分的自由水向半结合水迁移。SOP 与面筋蛋白竞争水分，使部分的紧密结合水向半结合水迁移。面团中 SOP 的存在促进了自由水和紧密结合水向半结合水转变。这种现象可能与 SOP 中的极性基团有关，极性基团与水结合形成氢键，通过氢键的形成削弱了水与面筋蛋白的结合[21]。总的来说，水分分布的变化反映出了 SOP 与系统中淀粉基质和面筋蛋白之间竞争性水分迁移的影响。

2.2　大豆低聚肽对面团流变特性的影响

不同取代量的 SOP 对小麦面团流变特性的影响如图 2 所示，对样品的 G'、G"、tanδ 进行了表征，以探究面团分子间的相互作用。储存模量 G'表示面团可逆变形时储存的能量，反映了面团的弹性。损耗模量 G"表示不可逆变形而造成的能量损失，反映面团的黏性。损耗正切值 tanδ 是损耗模量 G"与储存模量 G'之比[10]。面团的 G'和 G"的频率扫描结果如图 2A 和图 2B 所示，结果表明，样品的 G'和 G"随频率的增加而增加，且 G'大于 G"，说明面团以弹性为主，表现出固体性质[22]。G'和 G"随着 SOP 取代量的增加而减小，说明 SOP 对面团结构和面筋网络有负面影响，且随着 SOP 含量的增加，这种负面影响更为明显。这些发现与 Li 等[23] 在面团中加入选择性水解大豆蛋白有类似的结果，在面团中添加选择性水解大豆蛋白导致 G'和 G"与对照组相比显著降低。这种影响可能与加入大豆蛋白后，面筋含量的稀释有关；这种稀释会阻碍蛋白质网络结构的形成，进一步降低面团的黏弹性。同样这些发现也与 Liu 等[19] 在面团

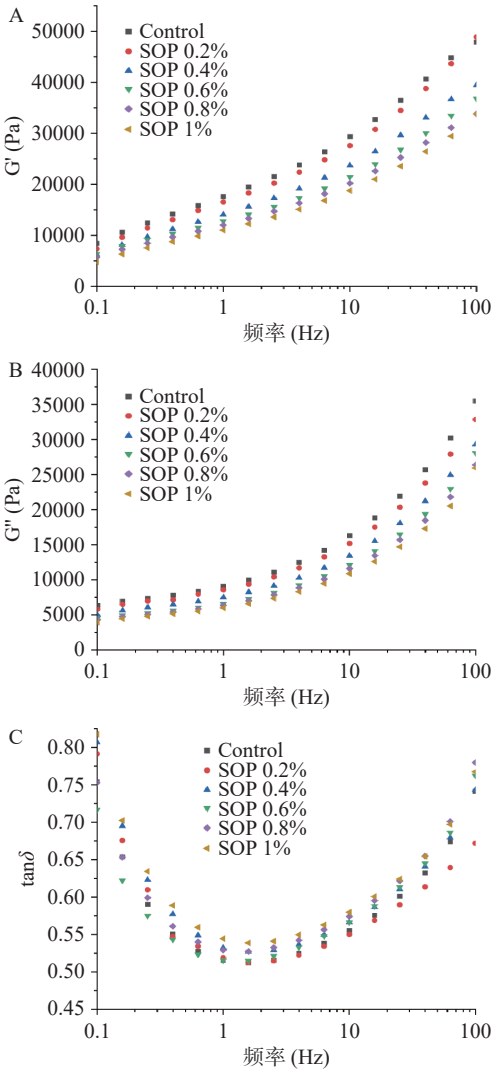


图 2　添加 SOP 小麦面团的贮藏模量（A）、损耗模量（B）和损耗切线（C）的变化

Fig.2　Changes in storage modulus (A), loss modulus (B) and loss tangent (C) of the wheat dough with the addition of SOP

中加入大蒜肽有类似的研究结果，在面团中加入大蒜肽导致 G'和 G"与对照组相比显著降低，这可能是由于大蒜肽中含有大量的 Asp。Asp 通过降低面筋蛋白之间的二硫键来作用于面团，产生游离巯基（-SH）。在面团加入 SOP 后，与空白对照组相比，G'和 G"降低的原因可能是 SOP 中的亲水性氨基酸上的羧基和酰胺基团与水分子形成氢键，从而干扰了面筋蛋白分子间的相互作用。水在面筋网络形成中是必不可少的，水的高竞争力也会削弱面筋网络[24]。

tanδ 反映面团的加工质量。较低的 tanδ 表明面团具有较高的塑性。图 2C 的结果表明，所有样品的 tanδ 都小于 1，这进一步表明在 0.1~100 Hz 范围内面团的弹性大于黏性，随着频率的增大，tanδ 呈现先减小后增大的趋势。结果表明，在缓慢变形时，面团更符合固体行为，而在快速变形时，面团则相反。

2.3　大豆低聚肽对面团微观结构的影响

为了探究不同取代量的 SOP 与蛋白质和淀粉颗

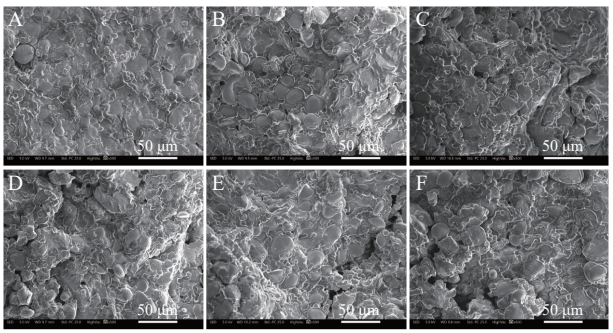


图 3 添加 SOP 小麦面团样品的扫描电镜图(50 μm)

Fig.3 SEM images of wheat dough samples with the addition of SOP (50 μm)

注：A：空白，B：SOP 0.2%，C：SOP 0.4%，D：SOP 0.6%，E：SOP 0.8%，F：SOP 1%。

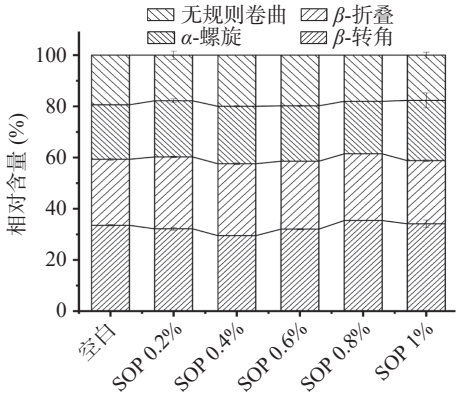


图 4 不同 SOP 取代量下小麦面团中蛋白质二级结构的变化

Fig.4 Changes in secondary structure of different SOP substitution levels in wheat dough

粒之间的相互作用，采用扫描电子显微镜对添加和未添加 SOP 的面团样品的微观结构进行了表征。扫描电子显微镜的扫描结果如图 3 所示，可以观察到面团内部的微观结构呈现连续且有序的面筋网络，淀粉颗粒被面筋网络所包裹，这是小麦面团的典型结构[25]。没有添加 SOP 时，淀粉被面筋网络很好地包裹和覆盖如图 3A 所示。不同取代比例的 SOP 会影响面团的微观结构，添加 0.2% 的 SOP 后，面筋网络结构开始被削弱，部分淀粉颗粒被暴露出来如图 3B 所示。随着 SOP 取代量的增加，面筋网络的连续性和完整性逐渐被削弱，面筋链之间的连接减少，淀粉颗粒逐渐被暴露出来的数量增加，面筋网络中也出现了少量的孔洞和裂痕。这与选择性水解大豆蛋白和大蒜肽加入面团中的研究结果相似，选择性水解大豆蛋白和大蒜肽加入到面团中，也会削弱面筋网络结构，使部分淀粉颗粒暴露出来，同时出现少量的孔洞和裂痕[19,23]。

面团聚集网络的稳定性在很大程度上取决于面筋蛋白的二级结构[26]。结果表明，SOP 破坏了面筋网络的完整性。这可能是由于 SOP 与面筋之间竞争水分造成的[27]，从而导致面筋水化不足，面筋网络结构被破坏。SOP 添加量越多，竞争的水分就越多，面筋网络结构被破坏的就越严重。这种现象类似于鱼皮胶原蛋白肽(FSCP)对未冷冻面团微观结构的影响。随着 SOP 添加量的增加，更多的淀粉被暴露出来的原因可能是因为 SOP 通过氢键与面筋蛋白结合，减少了蛋白质与淀粉颗粒之间的相互作用，从而导致淀粉被暴露[25]。

2.4 大豆低聚肽对面团蛋白质二级结构的影响

面团中蛋白质的二级结构的相对含量变化如图 4 所示，面团中蛋白质的二级结构主要包括 α-螺旋、β-折叠、β-转角和无规则卷曲，它们在酰胺 I 波段的特征峰波数分别为 1650~1660 cm^{-1}、1610~1640 cm^{-1}、1660~1700 cm^{-1} 和 1640~1650 cm^{-1}。α-螺旋和 β-折叠是蛋白质分子中较为常见的二级结构，被认为是蛋白质中较稳定的结构[28]，氢键是维持 α-螺旋结构稳定的主要作用力。β-折叠与 α-螺旋形状截然不同，α-螺旋在氢键的作用下形成双螺旋结构，而 β-折叠是在氢键的作用下形成锯齿状结构[29]。两者都属于相对致密且稳定的有序结构，共同赋予面筋蛋白良好的性质，两者相对含量较高，说明面筋网络结构越致密，黏弹性较好。相反，β-转角和无规卷曲被认为是一种无序结构，它们的含量越高说明面筋网络结构的性能越差[10]。由图 4 可知，面包面团中蛋白质二级结构的相对含量为：β-转角>β-折叠>α-螺旋>无规则卷曲。随着 SOP 取代量的增加，β-折叠的相对含量呈现先增加后降低的趋势，与对照组相比具有显著性的差异($P<0.05$)，α-螺旋的相对含量变化无显著性差异($P>0.05$)。与空白对照组相比，有序结构(β-折叠和 α-螺旋)的总和最大可增加 7.35%，说明 SOP 的加入在一定程度上可以促进面团中蛋白质的二级结构由无序向有序结构的转变。这主要是由于 SOP 中亲水性氨基酸中的羧基能够与水形成更多的氢键，氢键是维持 β-折叠和 α-螺旋的主要作用力，从而促进 β-折叠和 α-螺旋的形成。同时，在面团中，SOP 通过疏水基团的暴露和氢键的重组，促进蛋白质的有序化。

2.5 大豆低聚肽对面包比容及孔隙率的影响

面包比容的计算由成品质量与体积共同决定，发酵与焙烤过程中酵母产气效率与面团持气能力的动态平衡，直接影响着最终面包体积与质量的协同变化[30]。不同取代量的 SOP 对面包比容的影响如表 1

表 1 SOP 对面包品质的影响

Table 1 Effect of SOP on bread quality

样品	比容(cm^3/g)	孔隙率(%)
空白	3.36 ± 0.08^{b}	37.73 ± 0.58^{e}
SOP 0.2%	3.54 ± 0.19^{ab}	40.64 ± 1.11^{d}
SOP 0.4%	3.55 ± 0.03^{ab}	42.33 ± 2.00^{cd}
SOP 0.6%	3.57 ± 0.01^{ab}	43.43 ± 0.97^{bc}
SOP 0.8%	3.62 ± 0.09^{ab}	44.95 ± 0.57^{ab}
SOP 1%	3.67 ± 0.15^{a}	46.80 ± 0.77^{a}

注：同列数据标注不同的小写字母表示数据间具有差异性显著($P<0.05$)；表2同。

所示，从结果中可以看出，SOP 的加入对面包的比容有显著性的影响（P<0.05），与空白对照组相比，SOP 的添加均能增加面包的比容，是因为肽的相对分子质量介于蛋白质和氨基酸之间，更容易被酵母吸收利用，SOP 能够为酵母的生长繁殖提供所需要的氨基酸等营养成分，营造出良好的发酵环境，进而增强酵母的产气能力，最终使面包的比容得以增加[31]。SOP 能够增加面包的比容，这与鲣鱼肽和玉米肽的研究结果一致，它们都能增加面包的比容[32]。

SOP 对面包孔隙率的影响如表 1 所示，SOP 的添加对面包孔隙率有显著性的影响（P<0.05），与空白对照组相比，SOP 的添加能够增加面包的孔隙率。随着 SOP 取代量的增加，面包的孔隙率也随之增加，这是因为 SOP 的加入使酵母的持气量增加的原因。这与杜仲叶微粉加入面团中对面包孔隙率的影响结果一致，将杜仲叶微粉加入面团中制成面包，面包的孔隙率与空白对照组相比，添加量在 1% 以下，能够显著增加面包的孔隙率[15]。

2.6　大豆低聚肽对面包质构特性的影响

面包的质构特性，是衡量其感官品质的关键因素之一，对消费者的接受度和满意度有着很大的影响[33]。质构特性直接影响面包的口感，主要包括硬度、弹性、胶着性、咀嚼性及回复性这五个重要指标。添加 SOP 对面包质构特性的影响如表 2 所示，面包硬度作为质构特性核心指标，直接影响产品的感官品质评估，是消费者偏好研究中关键性质量判定要素之一[34]。当 SOP 的取代量小于 0.5% 时，面包的硬度下降，而当取代量超过 0.5% 时，硬度虽然上升，但仍低于不含 SOP 的空白对照组。当 SOP 的取代量在 0.4% 时，此时面包的硬度达到最低值（P<0.05），与对照组相比降低了 42.27%，说明此时的面包更柔软。SOP 通过与淀粉和蛋白质的相互作用改变了面团中水分的流动性和迁移。经水分分布分析证实，面团的保水能力增强，延缓了淀粉的降解，降低了硬度[19]。

面包的弹性与空白对照组相比是下降的，当 SOP 的取代量为 1% 时，面包的弹性达到最低值，所以较小的 SOP 取代量对面包的弹性影响较小，可能是因为随着 SOP 取代量的增加，面包变得更加的粘。由于 SOP 具有良好的溶解性和吸水性使得在面包制作过程中能够吸收更多的水分，从而增加面包的粘性。与空白对照组相比，SOP 的加入能够显著降低面包的胶着性和咀嚼性（P<0.05）。当 SOP 的取代量为 0.4% 时，此时面包的硬度比对照组降低了 42.27%，胶着性和咀嚼性同样达到最低值。SOP 可能通过弱化面筋网络、调节水分分布及协同脂质作用等多重机制，来降低面包的胶着性和咀嚼性。面包的回复性随着 SOP 取代量的增加，呈现降低的趋势，这也可能与 SOP 弱化面筋网络有关[35]。

2.7　大豆低聚肽对面包相对结晶度的影响

面包中淀粉的结晶度是影响面包质地和保质期的关键因素。了解烘焙过程中淀粉结晶度的变化，有助于提高面包的品质[30]。利用 XRD 分析了 SOP 的取代对面包相对结晶度（RC）的影响。图 5 为不同取代量的 SOP 面包的 XRD 图谱。面包样品在 2θ 约为 17°和 20°处观察到两个衍射峰，分别对应于支链淀粉和直链淀粉的重结晶的特征峰[16,36−37]。其中 17°处出现的衍射峰表征 B 型晶体结构的形成，主要由支链淀粉的外侧支链通过双螺旋结构有序堆积形成[38]。20°处出现的衍射峰表征 V 型晶体结构的形成，代表着直链淀粉-脂质复合物的形成[39]。加入 SOP 后，衍射峰的位置没有发生改变，说明加入 SOP 后没有形成新的晶体类型。

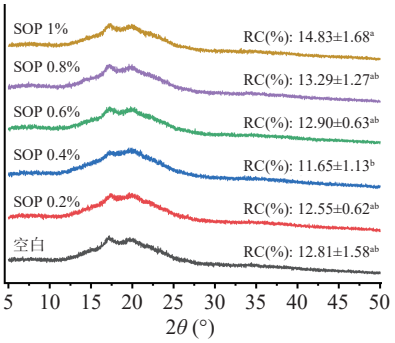


图 5　面包的 X 射线衍射图

Fig.5　X-ray diffraction patterns of breads

由图 5 可知，随着 SOP 的取代量的增加，面包的相对结晶度呈现先下降后增加的趋势，当 SOP 的取代量为 0.4% 时，面包的相对结晶度由 12.81% 下降到 11.65%，此时面包的相对结晶度与对照组相比降低了 1.16%。这可能是因为 SOP 与淀粉竞争水分，导致可用于淀粉水合的无定形区减少，进而限制重结晶区域的扩展[40]。已有研究表明，添加小麦低聚肽

表 2　SOP 对面包质构特性的影响

Table 2　Effects of SOP on the textural properties of bread

样品	硬度(g)	弹性	胶着性	咀嚼性(g)	回复性
空白	270.94±8.17^{a}	0.85±0.06^{a}	164.11±16.83^{a}	140.32±23.72^{a}	0.27±0.06^{a}
SOP 0.2%	212.64±5.25^{b}	0.80±0.01^{a}	137.23±7.18^{b}	109.32±5.85^{b}	0.24±0.01^{a}
SOP 0.4%	156.39±7.80^{c}	0.57±0.02^{bc}	73.07±4.86^{e}	41.53±2.70^{c}	0.16±0.01^{b}
SOP 0.6%	179.73±2.20^{c}	0.60±0.02^{b}	85.61±9.18^{de}	50.99±4.66^{c}	0.16±0.02^{b}
SOP 0.8%	249.56±17.13^{a}	0.52±0.01^{cd}	94.76±1.38^{d}	49.45±0.70^{c}	0.12±0.01^{b}
SOP 1%	255.23±39.59^{a}	0.49±0.07^{d}	110.71±5.22^{c}	54.59±5.74^{c}	0.15±0.02^{b}

也可以显著降低相对结晶度[8]。在 SOP 的取代量为 1% 时，面包的相对结晶度由 12.81% 增加到 14.83%。这可能是因为 SOP 具有强水溶性，在加热过程中与淀粉竞争水分子，削弱了淀粉颗粒的吸水膨胀能力，导致糊化不完全，未充分糊化的淀粉在冷却时更易发生重结晶[41]。

2.8 面包的感官评价

感官评分是面包质量控制过程中的一个重要环节，可以量化面包的感官特性。面包的感官评价见表 3，随着 SOP 取代量的增加，面包的形态、色泽、质地、纹理结构和口感均呈现先增加后降低的趋势，当 SOP 的取代量为 0.4% 时，此时面包更加柔软，色泽更加均匀，气孔更加均匀细腻，口感更加柔软适口。SOP 的取代量为 1% 时，面包在色泽均匀和质地方面比对照组略差，是因为加入过多的 SOP 会干扰面筋蛋白的结构，从而影响面包的感官特性。SOP 富含必需氨基酸，易于人体消化吸收，但加入过多的 SOP 会对面包产生负面影响，所以选择合适的取代比例显得至关重要。

表 3 SOP 对面包品质的影响

Table 3 Effect of SOP on bread quality

样品	形态	色泽	质地	纹理结构	口感
空白	8.9 ± 1.20^{c}	10.6 ± 1.43^{ab}	14.8 ± 1.32^{b}	15.0 ± 1.33^{b}	20.0 ± 2.05^{c}
SOP 0.2%	10.1 ± 1.20^{bc}	11.2 ± 1.23^{a}	15.7 ± 1.42^{ab}	15.2 ± 0.92^{b}	20.8 ± 1.03^{bc}
SOP 0.4%	11.5 ± 1.08^{a}	11.4 ± 0.84^{a}	16.2 ± 1.14^{a}	16.6 ± 0.70^{a}	22.8 ± 2.10^{a}
SOP 0.6%	10.3 ± 1.42^{ab}	10.9 ± 0.99^{ab}	15.8 ± 0.79^{ab}	15.9 ± 0.88^{ab}	22.4 ± 2.01^{ab}
SOP 0.8%	9.9 ± 1.20^{bc}	10.5 ± 1.27^{ab}	15.5 ± 0.85^{ab}	15.4 ± 0.97^{b}	21.9 ± 0.99^{ab}
SOP 1%	9.5 ± 1.27^{bc}	9.6 ± 1.26^{b}	14.6 ± 1.17^{b}	15.0 ± 0.94^{b}	21.60 ± 1.43^{abc}

3 结论

SOP 能够有效减缓面团体系中的水分迁移，降低面团的 G'和 G"值，表明 SOP 对面团的黏弹性具有调节作用，有助于改善面团的加工适应性。SOP 可以促进面团中蛋白质的二级结构由无序向有序结构的转变，这对稳定面团结构具有积极意义。SOP 的加入显著提升了面包的比容和孔隙率，同时有效降低了面包的硬度，在改善面包硬度方面表现出良好的应用潜力。将 SOP 应用于面包生产，不仅能够显著提升面包的比容、孔隙率等品质指标，还能促进肽类成分与其他食品基质之间的相互作用，为开发功能性烘焙制品提供了新的技术路径和配方设计思路，具有较好的工业化应用前景。尽管 SOP 在改善面包比容、降低硬度等方面表现出积极作用，但本研究亦发现 SOP 对小麦面团的微观结构完整性存在一定的负面影响，其具体作用机制尚待深入解析。

© 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] AZIZI S, AZIZI M H. Evaluation of producing gluten-free bread by utilizing amaranth and lipase and protease enzymes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(8): 2213−2222.

[2] YEŞIL S, LEVENT H. The effects of emulsifiers on quality and staling characteristics of gluten-free bread containing fermented buckwheat, quinoa, and amaranth[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46: e16668.

[3] SALEHI F. Effect of common and new gums on the quality, physical, and textural properties of bakery products: A review[J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(2): 361−370.

[4] 段云龙. 茶叶提取物对面包品质影响及其抗氧化能力研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. [DUAN Y L. Effect of tea extracts on the bread quality and polyphenols antioxidant activity[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.]

[5] HAYES M. Food proteins and bioactive peptides: New and novel sources, characterisation strategies and applications[J]. Foods, 2018, 7(3): 38.

[6] JIA L T, WANG L, LIU C, et al. Bioactive peptides from foods: production, function, and application[J]. Food & Function, 2021, 12: 7108−7125.

[7] LI P Y, GUO J Y, LU C, et al. Effects of fish skin collagen peptide on physicochemical properties of frozen dough and quality and antioxidant activity of steamed bread[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110420.

[8] ZHANG Y T, LIU X R, YU J B, et al. Effects of wheat oligopeptide on the baking and retrogradation properties of bread rolls: Evaluation of crumb hardness, moisture content, and starch crystallization[J]. Foods, 2024, 13(3): 397.

[9] 吕育新, 梁金钟. 大豆低聚肽的研究进展[J]. 大豆科技, 2013(2): 37−39. [LÜ Y X, LIANG J Z. The research development of soybean oligopeptide[J]. Soybean Science & Technology, 2013(2): 37−39.]

[10] BAI Z Y, ZHANG Y H, LI H Y, et al. Effects of red kidney bean polysaccharide on the physicochemical properties of frozen dough and the resulting steamed bread quality[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 16: 101063.

[11] AZEEM M, MU T, ZHANG M. Effects of hydrocolloids and proteins on dough rheology and *in vitro* starch digestibility of sweet potato-wheat bread[J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 142: 110970.

[12] HUANG X Y, WANG S N, ZHANG M H, et al. Enhancing frozen dough quality: Investigating the impact of soy hull polysaccharide (SHP) on rheological properties and microstructure[J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139853.

[13] KE Y, WANG Y Y, DING W P, et al. Effects of inulin on protein in frozen dough during frozen storage[J]. Food & Function, 2020, 11(9): 7775−7783.

[14] GERARDO-RODRÍGUEZ J E, RAMÍREZ-WONG B, TORRES-CHÁVEZ P I, et al. Effect of part-baking time, freezing rate and storage time on part-baked bread quality[J]. Food Science and Technology, 2021, 14: 352−359.

[15] HAN S H, LIU X J, CHEN S M, et al. Quality and staling characteristics of wheat bread improved by adding *Eucommia ulmoides* oliver leaf micropowder[J]. LWT - Food Science and Technology, 2024, 198: 116008.

[16] DEMIRKESEN I, CAMPANELLA O H, SUMNU G, et al. A study on staling characteristics of gluten-free breads prepared with chestnut and rice flours[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(3): 806−820.

[17] ZHU X W, YUAN P P, ZHANG T, et al. Effect of car-

boxymethyl chitosan on the storage stability of frozen dough: State of water, protein structures and quality attributes[J]. Food Research International, 2022, 151: 110863.
[18] GUO W T, YANG X F, JI Y S, et al. Effects of transglutaminase and glucose oxidase on the properties of frozen dough: Water distribution, rheological properties, and microstructure[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 111: 103689.
[19] LIU X R, XIE Q R, LIU D Z, et al. Effects of garlic peptides on rheology, moisture, microstructure, gluten distribution, and baking properties of dough[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 113: 103758.
[20] ZHANG G G, GUO J Y, ZHAO F, et al. Peptide incorporation in frozen dough and steamed bread: Characteristics and structure-function relationship[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 205: 116551.
[21] CHEN J R, XIAO J H, TU J, et al. The alleviative effect of sweet potato protein hydrolysates on the quality deterioration of frozen dough bread in comparison to trehalose[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 175: 114505.
[22] ZHOU J J, JIA Z Y, WANG M, et al. Effects of *Laminaria japonica* polysaccharides on gelatinization properties and long-term retrogradation of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107908.
[23] LI W W, CAO W H, WANG P, et al. Selectively hydrolyzed soy protein as an efficient quality improver for steamed bread and its influence on dough components[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129926.
[24] ZHANG Y Y, GUO X F, XIONG H R, et al. Effect of modified soy protein isolate on dough rheological properties and noodle qualities[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(3).
[25] SUN R, ZHANG Z M, HU X J, et al. Effect of wheat germ flour addition on wheat flour, dough and Chinese steamed bread properties[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 64: 153−158.
[26] SHYU Y S, HWANG J K, HSU C K. Improving the rheological and thermal properties of wheat dough by the addition of γ-polyglutamic acid[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(6): 982−987.
[27] DEKKERS B L, EMIN M A, BOOM R M, et al. The phase properties of soy protein and wheat gluten in a blend for fibrous structure formation[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 273−281.
[28] 关纬超, 张炜佳, 董立军, 等. 西北酵头发酵绿豆粉对绿豆面包品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 141−149. [GUAN W C, ZHANG W J, DONG L J, et al. Effect of northwest fermentation agents on the quality of mung bean bread by fermenting mung bean powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 141−149.]
[29] LI X G, LIU P F, BAI Z Y, et al. Ultrasound-assisted process of dough for noodle production: Textural properties, moisture distribution, microstructure and cooking quality[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 119: 104005.
[30] SULLIVAN W R, HUGHES J G, COCKMAN R W, et al. The effects of temperature on the crystalline properties and resistant starch during storage of white bread[J]. Food Chemistry, 2017, 228: 57−61.
[31] LIU X, LI T, LIU B Y, et al. An external addition of soy protein isolate hydrolysate to sourdough as a new strategy to improve the quality of chinese steamed bread[J]. Journal of Food Quality, 2016, 39(1): 3−12.
[32] KOH B K, LEE G C, LIM S T. Effect of amino acids and peptides on mixing and frozen dough properties of wheat flour[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(6).
[33] 何颖, 迟玉杰, 迟媛. 复配蛋液对小麦面团流变学特性和面包品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 10(46): 1−9. [HE Y, CHI Y J, CHI Y. Effect of reconstituted liquid egg on the rheological properties of wheat dough and bread quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 10(46): 1−9.]
[34] YANG S, JEONG S, LEE S. Elucidation of rheological properties and baking performance of frozen doughs under different thawing conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 284: 110084.
[35] ESPINOZA ACOSTA J L, NAVARRO EÚAN M J, BUITIMEA CANTÚA N E, et al. Influence of refreshment varying flour and water on sourdough viscoelasticity and textural properties of bread[J]. Cereal Chemistry, 2025, 102: 144−156.
[36] AGUIRRE J F, OSELLA C A, CARRARA C R, et al. Effect of storage temperature on starch retrogradation of bread staling[J]. Starch - Stä rke, 2011, 63(9): 587−593.
[37] RIBOTTA P D, CUFFINI S, Le N A E, et al. The staling of bread: an X-ray diffraction study[J]. European Food Research and Technology, 2004, 218(3): 219−223.
[38] LIU Y X, ZHANG X L, DING B B, et al. Effect of hydrocolloids on physical, thermal and microstructure properties of par-baked baguette during frozen storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 1866−1874.
[39] FU Y, LIU X R, XIE Q R, et al. Effects of *Laminaria japonica* polysaccharides on the texture, retrogradation, and structure performances in frozen dough bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112239.
[40] PENG B, LI Y Q, DING S Y, et al. Characterization of textural, rheological, thermal, microstructural, and water mobility in wheat flour dough and bread affected by trehalose[J]. Food Chemistry, 2017, 233: 369−377.
[41] HUANG S Q, CHAO C, YU J L, et al. New insight into starch retrogradation: The effect of short-range molecular order in gelatinized starch[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106921.