

月桂酸对含大豆分离蛋白馒头品质及储藏期间老化特性的影响

郑双翼¹, 万 潇¹, 陈倩倩¹, 周 静¹, 杜 静^{1,2,3}, 张海龙^{1,2,3}, 王学东^{1,2,3}

(1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 武汉轻工大学 大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 武汉 430023; 3. 武汉轻工大学 农产品加工与转化湖北省重点实验室, 武汉 430023)

摘要:旨在为月桂酸在面制品品质改良方面的应用提供理论依据,研究了月桂酸对含大豆分离蛋白(SPI)馒头比容、硬度、断层结构、淀粉消化性、储藏期间硬度及淀粉结构的影响。结果表明:单独添加SPI会导致馒头比容下降和硬度显著增加,月桂酸能提高含SPI馒头的比容且降低其硬度和淀粉消化性,促进馒头形成松软的内部结构;同时,月桂酸能降低储藏期间淀粉老化引起的含SPI馒头硬度增加,延缓馒头中淀粉长程和短程有序结构的增加,从而延缓馒头老化的速度。综上,月桂酸不仅能抑制SPI所致的馒头硬度增加,而且能降低其淀粉消化性和储藏期间淀粉老化所致的馒头硬度增加。

关键词:馒头;大豆分离蛋白;月桂酸;品质;老化

中图分类号:TS213.2;TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)04-0140-07

Effects of lauric acid on the quality and retrogradation during storage of steamed bread containing soy protein isolate

ZHENG Shuangyi¹, WAN Xiao¹, CHEN Qianqian¹, ZHOU Jing¹,
DU Jing^{1,2,3}, ZHANG Hailong^{1,2,3}, WANG Xuedong^{1,2,3}

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil of Ministry of Education, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 3. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: Aiming to provide a theoretical basis for the application of lauric acid in the quality improvement of flour products, the effects of lauric acid on the specific volume, hardness, fault structure, starch digestibility, hardness and starch structure during storage of steamed bread containing soy protein isolate (SPI) were investigated. The results showed that SPI decreased the specific volume and increased the hardness of steamed bread. Lauric acid increased the specific volume and decreased the hardness and starch digestibility of steamed bread containing SPI, and promoted the formation of fluffy internal structure of the steamed bread. Furthermore, lauric acid decreased the increase of hardness of steamed bread and delayed the increase of short- and long-range order of starch in steamed bread during storage, thus

slowing down the retrogradation of steamed bread. Therefore, lauric acid can not only inhibit the increase of hardness of steamed bread caused by SPI, but also reduce the starch digestibility and hardness of steamed bread caused by starch retrogradation during storage.

Key words: steamed bread; SPI; lauric acid; quality; retrogradation

收稿日期:2024-01-24; 修回日期:2024-12-20

基金项目:武汉市科技特派员“产学研”专项(2023110201030660)

作者简介:郑双翼(1997),男,硕士研究生,研究方向为食品组分互作对面制品的调控作用及机制(E-mail)2200567216@qq.com。

通信作者:王学东,教授,博士(E-mail)xuedongwuhan@163.com。

馒头是我国最重要的主食之一,占我国所有小麦消费量的 40% 左右。然而,其主要原料小麦粉中蛋白质因赖氨酸含量低,不能满足人们对蛋白质的需求^[1]。大豆分离蛋白(SPI)是一种富含赖氨酸的重要植物蛋白,成本低且具有预防糖尿病、肥胖以及肠道和肾脏疾病等健康效应^[2-3]。为此,研究者将 SPI 添加到面制品中以提高面制品的营养特性^[4]。例如,在普通面条中添加适量 SPI 后(添加量 > 6%),其蛋白质含量可从 10% 左右(因面粉品种等因素而异)提升到 15% ~ 20%,使面制品在营养上更接近“完全蛋白质”食品,更好地满足人体对蛋白质的需求^[5]。然而,大豆蛋白的添加会降低馒头的比容,提高馒头的硬度^[6]。为此,如何通过添加 SPI 提高馒头健康效应的同时提高馒头的比容且降低其硬度是目前需要解决的问题。

研究发现,添加单月桂酸甘油酯、月桂酸和硬脂酸可以降低馒头的硬度,并能抑制储藏期间馒头硬度的增加^[7]。此外,脂肪酸如月桂酸不仅能降低面条中淀粉的消化率,而且能显著改善其品质^[8]。月桂酸因易于与淀粉互作,常用于抗消化淀粉复合物的制备,但月桂酸能否改善含 SPI 馒头的比容和硬度,延缓其储藏期间的老化速度尚未见相关报道。为此,本文研究了添加月桂酸对含 SPI 馒头的比容、质构、淀粉的消化性、储藏期间硬度及淀粉长程有序结构和短程有序结构的影响,以期在脂肪酸在面制品中的应用提供理论依据,并为健康面制品的开发提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

小麦粉(WF),克明面业有限公司;月桂酸(LA),食品级,武汉克米克生物医药技术有限公司;大豆分离蛋白(SPI)、小麦淀粉、3,5-二硝基水杨酸(DNS),上海源叶生物有限公司; α -淀粉酶,美国 Sigma 化学公司;葡萄糖苷酶、溴化钾,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;葡萄糖、氯化钠,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

SPI 11 和面机、SM-32S 醒发箱,新麦机械(中国)有限公司;BVM-L370 食品体积测定仪、C-Cell 食品图像分析仪,瑞典波通仪器公司;TA TOUCH 质构仪,上海保圣实业发展有限公司;SHJ-6D 磁力搅拌水浴锅,良友仪器有限公司;Bruker D8 Advance

X 射线衍射(XRD)仪,德国布鲁克分析仪器公司;inVia™ Qontor® 雷尼绍共焦显微拉曼光谱成像系统,英国 Renishaw 公司;Frontier 傅里叶红外光谱仪、Enspire 多功能酶标仪,美国 PerkinElmer 仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 馒头的制作

分别制作不添加 SPI(空白)、单独添加 SPI(WF + SPI)、单独添加月桂酸(WF + LA)和同时添加月桂酸和 SPI(WF + LA + SPI)的馒头,配方见表 1。具体制作方法如下:按表 1 配方将所有原料混合均匀后,经和面机搅拌成面团,将面团在 37 °C 和相对湿度 75% 的条件下发酵 20 min 后,切割成 60 g 左右的小面团,揉搓成型并在上述条件下再次发酵 20 min 后,蒸锅蒸 30 min,在室温下冷却 1 h 后,得到不同配方馒头。

表 1 馒头配方

组别	小麦粉	SPI	月桂酸	小麦淀粉	酵母	水
空白	364	0	0	36	8	240
WF + SPI	364	24	0	12	8	240
WF + LA	364	0	12	24	8	240
WF + LA + SPI	364	24	12	0	8	240

1.2.2 馒头比容的测定

取馒头,精确测定其质量(m)后,采用食品体积测定仪测定其体积(V),测定条件:参考形状选择椭圆,转速 60 r/min。按照式(1)计算馒头的比容(c)。

$$c = \frac{V}{m} \quad (1)$$

1.2.3 馒头硬度的测定

将馒头切成长、宽、高均为 2 cm 的馒头芯后采用配有 TA/36 探头的质构仪在 TPA 模式下测定硬度。测试参数:测前速度 3.0 mm/s,测试速度 1.0 mm/s,测后速度 2.0 mm/s,触发力 5 g,形变量 50%,间隔时间 5 s。

1.2.4 馒头断层结构的测定

用专用切刀从馒头中心位置将其切成两块,用食品图像分析仪对馒头块样品纹理结构进行扫描,并利用仪器自带软件分析馒头气孔数量、孔隙率和平均气孔体积。

1.2.5 馒头中淀粉的消化性测定

按照 Åkerberg 等^[9]的方法进行馒头中淀粉消

化性分析。将馒头进行冷冻干燥、磨粉后,称取 200 mg 馒头冻干粉,加入 15 mL 醋酸钠缓冲溶液 (0.1 mol/L, pH 5.2, 含 4 mmol/L 的 CaCl_2 溶液) 在 37 °C 的水浴锅中预热 20 min, 再加入 5 mL 混合酶溶液 (α -淀粉酶 290 U/mL, 葡萄糖苷酶 16.5 U/mL) 在水浴锅中孵育 180 min。分别在 0、10、20、30、40、60、90、120、150、180 min 时取样, 采用 DNS 法测定所取样品中葡萄糖浓度, 按照式(2) 计算淀粉的水解率(x)。

$$x = \frac{c \times V \times 0.9}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中: c 为取样的葡萄糖含量, mg/mL; V 为样品水解液的总体积, mL; 0.9 为葡萄糖和淀粉之间的换算系数; m 为馒头中淀粉质量, mg。

1.2.6 馒头的储藏实验

将馒头置于密封袋中密封后, 在 4 °C 的冰箱中储藏 0.3、5、7、10 d。期间取样后按 1.2.3 方法测定硬度, 以此衡量储藏期间馒头的老化情况。

1.2.7 馒头中淀粉长程有序性分析

分别取 4 °C 储藏 0、7 d 的馒头样品进行冷冻干燥、磨粉, 称取一定量馒头冻干粉于饱和的 NaCl 溶液中平衡 3 d 后, 参考 Zhang 等^[10] 的方法用 XRD 仪分析馒头中淀粉长程有序性。分析条件: 射线源为 Cu-K α ($\lambda = 0.154$ nm), 工作电压 40 kV, 电流 40 mA, 检测速率 4 (°)/min, 2 θ 扫描范围 5° ~ 60°。使用 Jade 软件计算淀粉的结晶区和非结晶区的面积, 结晶度为结晶区面积与结晶区和非结晶区面积和之比^[11]。

1.2.8 馒头中淀粉短程有序性分析

1.2.8.1 拉曼光谱 (Raman) 分析

取少量 1.2.7 馒头冻干粉于载玻片上, 压成平滑不透明的薄片, 于拉曼光谱仪(预先经硅片在 520 cm^{-1} 校准) 上进行分析。测定条件: 以 785 nm 二极管为激光光源, 扫描范围 100 ~ 3 200 cm^{-1} , 分辨率 7 cm^{-1} ^[12]。

1.2.8.2 红外光谱 (FT-IR) 分析

取少量 1.2.7 馒头冻干粉与 KBr 以 1:100 的比例混合并充分研磨后, 压成透明的薄片, 采用傅里叶红外光谱仪测定。测定条件: 波数范围 400 ~ 4 000 cm^{-1} , 扫描次数 64 次, 分辨率 4 cm^{-1} 。利用 OMNIC 8.2 软件进行基线校准、分峰拟合, 设置半峰宽和增强因子分别为 4.0 cm^{-1} 和 3.5 cm^{-1} 。

1.2.9 数据分析与处理

数据结果以“平均值 \pm 标准差”的形式表示, 并用 SPSS 19 软件进行显著性分析, $p \leq 0.05$ 表示组间

有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 月桂酸对含 SPI 馒头比容和硬度的影响

表 2 为不同配方馒头的比容和硬度。

表 2 不同配方馒头的比容和硬度

Table 2 Specific volume and hardness of steamed bread prepared with different formula

组别	比容/(cm^3/g)	硬度/N
空白	2.10 \pm 0.11 ^a	17.95 \pm 0.67 ^b
WF + SPI	1.98 \pm 0.07 ^a	23.87 \pm 1.47 ^d
WF + LA	2.72 \pm 0.02 ^c	14.07 \pm 0.31 ^a
WF + LA + SPI	2.55 \pm 0.09 ^b	20.91 \pm 0.56 ^c

注: 同列不同小写字母表示有显著性差异 ($p \leq 0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($p \leq 0.05$). The same below

由表 2 可知, 添加 SPI 后, 馒头的比容略微降低且硬度显著增加, 这与 Li 等^[13] 报道的结果一致(其研究发现添加 0.5% 和 1.0% 的大豆蛋白都降低了馒头的比容且增加了馒头的硬度)。相比空白组, 单独添加月桂酸馒头的比容增加了 29.5%, 硬度降低了 21.6%, 表明月桂酸改善了馒头的硬度和比容。这与康雪敏^[7] 研究得到的月桂酸和硬脂酸均能显著降低馒头硬度的结果一致。同时添加月桂酸和 SPI 馒头的比容相对于单独添加 SPI 馒头的显著增加, 而硬度显著降低。SPI 使馒头的比容降低且硬度增加的原因可能是 SPI 干扰了面筋组分的相互作用, 弱化了面筋蛋白网络结构的形成^[14]。添加月桂酸提高馒头的比容且降低其硬度的原因可能是月桂酸与小麦淀粉形成淀粉-脂肪酸复合物, 降低了淀粉糊的凝胶强度^[15], 使馒头蒸制过程中更容易膨胀, 提高馒头的比容, 同时也使馒头在冷却后更加柔软, 从而降低了馒头的硬度。

2.2 月桂酸对含 SPI 馒头断层结构的影响

月桂酸对含 SPI 馒头断层形态的影响见图 1, 月桂酸对含 SPI 馒头气孔数量、孔隙率和平均气孔体积的影响见表 3。

由图 1 和表 3 可知, 与空白组相比, 单独添加 SPI 馒头的气孔数量显著增加, 平均气孔体积降低, 孔隙率下降, 因此 SPI 可促进馒头形成更致密的网络结构, 这与添加 SPI 使馒头硬度增加的结果一致。单独添加月桂酸馒头的气孔数量、孔隙率及平均气孔体积较空白组均增加。这与月桂酸可提高馒头比容及降低其硬度的结果一致。与单独添加 SPI 馒头

相比,同时添加月桂酸和 SPI 馒头的平均气孔体积增加,并且气孔大小更加均一。这说明月桂酸可能

促进馒头形成松软的内部结构,从而改善了仅添加 SPI 时馒头硬度增加的缺点。

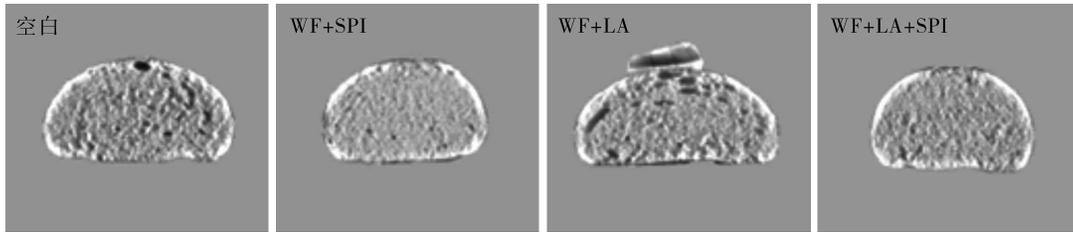


图 1 月桂酸对含 SPI 馒头断层形态的影响

Fig. 1 Effect of lauric acid on the fault morphology of steamed bread with SPI

表 3 月桂酸对含 SPI 馒头气孔数量、孔隙率和平均气孔体积的影响

Table 3 Effects of lauric acid on pore number, porosity and average pore volume of steamed bread with SPI

组别	气孔数量(个)	孔隙率/%	平均气孔体积/mm ³
空白	1 374.30 ± 132.93 ^a	52.60 ± 0.98 ^{ab}	5.80 ± 1.66 ^a
WF + SPI	1 709.70 ± 273.96 ^b	51.10 ± 2.74 ^a	5.00 ± 2.17 ^a
WF + LA	1 461.30 ± 120.48 ^{ab}	53.80 ± 1.12 ^b	9.40 ± 1.58 ^b
WF + LA + SPI	1 566.70 ± 103.64 ^{ab}	51.20 ± 1.21 ^{ab}	5.90 ± 1.07 ^a

2.3 月桂酸对含 SPI 馒头中淀粉消化性的影响

月桂酸对含 SPI 馒头中淀粉消化性的影响见图 2。

由图 2 可知,随着消化时间的延长,4 组馒头中淀粉的水解率都逐渐增加。与空白组相比,单独添加 SPI 或月桂酸馒头中淀粉的水解率都降低,同时添加月桂酸和 SPI 馒头中淀粉的水解率在各个时间点都小于其他 3 组馒头的。经 180 min 的消化处理,同时添加月桂酸和 SPI 馒头中淀粉的水解率相

对空白组降低了 10.8%。这可能是由于月桂酸与小麦淀粉和蛋白形成的淀粉-脂肪酸复合物或淀粉-脂肪酸-蛋白复合物抑制了淀粉的膨胀,降低了馒头中淀粉的消化率^[16]。因此,月桂酸有助于控制食用 SPI 馒头后血糖的快速升高,可为肥胖人群提供膳食选择。

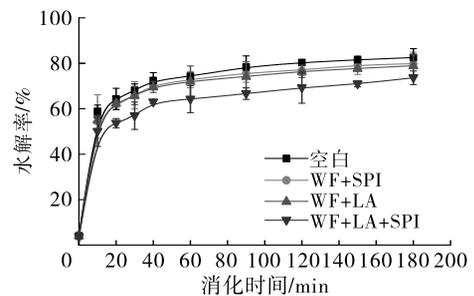


图 2 月桂酸对含 SPI 馒头中淀粉消化性的影响

Fig. 2 Effect of lauric acid on the digestibility of starch in steamed bread with SPI

2.4 月桂酸对含 SPI 馒头储藏期间硬度的影响

月桂酸对含 SPI 馒头储藏期间硬度的影响见表 4。

表 4 月桂酸对含 SPI 馒头储藏期间硬度的影响

Table 4 Effect of lauric acid on the hardness of steamed bread with SPI during storage

组别	硬度/N				
	0 d	3 d	5 d	7 d	10 d
空白	17.95 ± 0.67 ^{Ab}	20.67 ± 2.80 ^{ABb}	24.18 ± 2.30 ^{Bb}	32.31 ± 2.40 ^{Cb}	33.41 ± 2.80 ^{Cb}
WF + SPI	23.86 ± 1.47 ^{Ad}	28.01 ± 2.07 ^{Bc}	35.38 ± 1.30 ^{Cc}	40.80 ± 2.28 ^{Dc}	42.21 ± 1.75 ^{Dc}
WF + LA	14.07 ± 0.31 ^{Aa}	15.49 ± 0.64 ^{Aa}	21.28 ± 1.22 ^{Ba}	24.21 ± 0.47 ^{Ca}	25.06 ± 2.51 ^{Ca}
WF + LA + SPI	20.90 ± 0.56 ^{Ac}	24.43 ± 1.06 ^{Bc}	28.50 ± 1.24 ^{Cb}	33.41 ± 1.72 ^{Db}	35.82 ± 0.47 ^{Db}

注:同行不同大写字母表示有显著性差异($p \leq 0.05$)

Note: Different capital letters in the same row indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

随着储藏时间的延长,馒头中淀粉分子间会形成氢键,导致淀粉老化,老化的淀粉分子紧密地排列在一起,使得馒头的结构变得紧密而硬实。因此,馒头在储藏期间会由于淀粉老化而变硬^[17]。由表 4

可知,随着储藏时间的延长,4 组馒头的硬度都呈逐渐上升的趋势,其中空白组、单独添加 SPI、单独添加月桂酸和同时添加月桂酸和 SPI 馒头储藏 10 d 后硬度较储藏 0 d 的馒头分别增加了 86.1%、

76.9%、78.1%和71.4%。可以看出,单独添加月桂酸和SPI都能抑制储藏期间馒头的老化。肖安红等^[18]研究发现,储藏期间添加低温脱脂豆粉馒头的硬度上升趋势小于未添加低温脱脂豆粉馒头的,与本研究结果一致。Chen等^[19]研究发现,脂肪酸可抑制米粉储藏期间硬度的增加,这与本研究中单独添加月桂酸延缓储藏期间馒头硬度增加的结果一

致。与单独添加SPI相比,同时添加月桂酸和SPI可延缓储藏期间馒头硬度的增加,因此添加月桂酸可延缓含SPI馒头的老化。

2.5 月桂酸对含SPI馒头储藏期间淀粉长程有序结构的影响

月桂酸对含SPI馒头储藏期间淀粉长程有序结构的影响见图3。

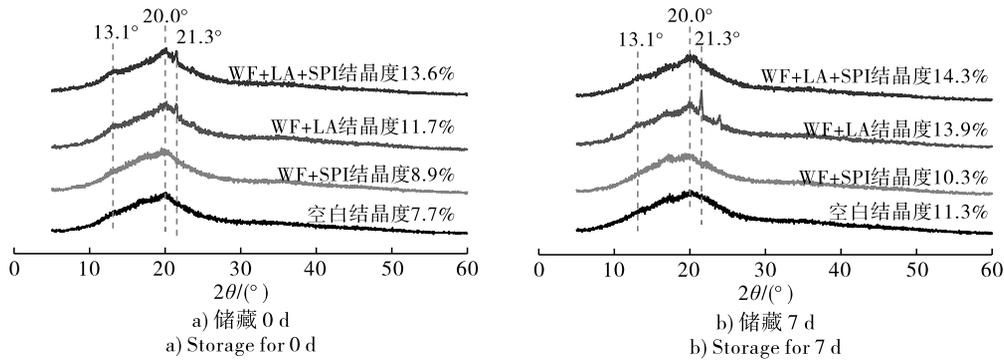


图3 月桂酸对储藏期间含SPI馒头淀粉长程有序性的影响

Fig. 3 Effect of lauric acid on the long-term order of starch in steamed bread with SPI during storage

淀粉的长程有序性是指淀粉分子链在空间中长距离范围内的有序排列,其是淀粉老化的基础,淀粉老化过程中,淀粉分子通过氢键等相互作用重新排列,形成有序的结晶结构。结晶度是指淀粉颗粒中结晶部分所占的比例,因为结晶区域内部淀粉分子链的排列更加有序,所以结晶度高的淀粉颗粒通常有较高的长程有序性^[20]。由图3可知,单独添加SPI或月桂酸馒头中淀粉的结晶度相较于空白组都有所增加,并且单独添加月桂酸馒头中淀粉的结晶度大于单独添加SPI的。同时添加月桂酸和SPI馒头中淀粉的结晶度最大的原因是月桂酸与小麦淀粉、蛋白形成了淀粉-脂肪酸、淀粉-脂肪酸-蛋白复合物,从而提高了小麦淀粉的结晶度和长程有序性^[12]。

在4℃储藏7d后,空白组、单独添加SPI、单独

添加月桂酸和同时添加月桂酸和SPI馒头中淀粉的结晶度相较于储藏0d分别增加了46.8%、15.7%、18.8%和5.1%。可以看出,单独添加SPI馒头在储藏期间的结晶度增加速度(老化程度)低于空白组。这是因为SPI可以附着在淀粉颗粒的表面,阻止淀粉颗粒和水分子之间的氢键结合,从而可延缓淀粉的老化^[6]。另外,同时添加月桂酸和SPI馒头中淀粉的结晶度增加速度低于单独添加SPI馒头的。因此,月桂酸的添加进一步抑制了含SPI馒头储藏期间的老化。

2.6 月桂酸对含SPI馒头储藏期间淀粉短程有序结构的影响

储藏0、7d馒头的拉曼光谱图和红外光谱图分别见图4和图5。月桂酸对含SPI馒头储藏期间淀粉短程有序性的影响见表5。

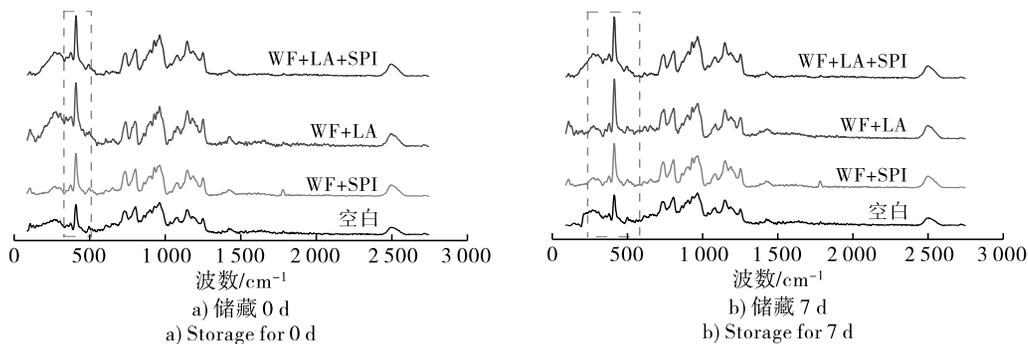


图4 月桂酸对储藏期间含SPI馒头中淀粉拉曼光谱图的影响

Fig. 4 Effect of lauric acid on the Raman spectra of starch in steamed bread with SPI during storage

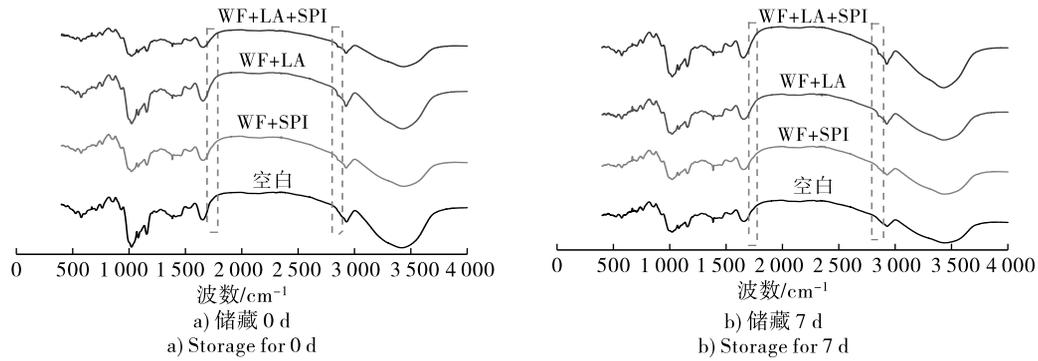


图 5 月桂酸对储藏期间含 SPI 馒头中淀粉红外光谱图的影响

Fig. 5 Effect of lauric acid on the infrared spectra of starch in steamed bread with SPI during storage

表 5 月桂酸对储藏期间含 SPI 馒头淀粉短程有序性的影响

Table 5 Effect of lauric acid on short-range order of starch in steamed bread with SPI during storage

组别	480 cm ⁻¹ 处的半峰宽		1 040 cm ⁻¹ /1 022 cm ⁻¹	
	0 d	7 d	0 d	7 d
空白	21.30 ± 2.73 ^b	19.80 ± 0.85 ^b	0.48 ± 0.04 ^a	0.52 ± 0.03 ^a
WF + SPI	19.10 ± 1.13 ^{ab}	18.60 ± 1.28 ^{ab}	0.67 ± 0.14 ^{ab}	0.70 ± 0.14 ^b
WF + LA	18.70 ± 1.80 ^{ab}	17.80 ± 0.97 ^a	0.71 ± 0.15 ^c	0.73 ± 0.03 ^b
WF + LA + SPI	17.60 ± 0.23 ^a	17.40 ± 0.48 ^a	0.78 ± 0.04 ^c	0.80 ± 0.02 ^b

拉曼光谱中 480 cm⁻¹ 处的半峰宽对淀粉的短程有序性(即螺旋簇的排列)变化十分敏感。480 cm⁻¹ 处的半峰宽越小或其峰强度(即峰高)越大,淀粉的短程分子有序结构越高^[21],淀粉老化程度增加^[22]。由图 4 和表 5 可知,随着储藏时间从 0 d 增加到 7 d,4 组馒头中淀粉在 480 cm⁻¹ 处的峰高均增加,半峰宽均减小。储藏 7 d 后,空白组、单独添加 SPI、单独添加月桂酸和同时添加月桂酸和 SPI 馒头中淀粉在 480 cm⁻¹ 处的半峰宽相较储藏 0 d 分别减小 7.0%、2.6%、4.8% 和 1.1%。可以看出,空白组馒头中淀粉在储藏期间半峰宽减小幅度最大,短程有序度变化最大,表明在储藏过程中其馒头中淀粉老化速度最快。同时添加月桂酸和 SPI 馒头在 480 cm⁻¹ 处的半峰宽在储藏期间的减小幅度小于单独添加 SPI 馒头的,说明月桂酸可降低储藏期间含 SPI 馒头短程有序结构的增加,这可能是因为月桂酸和 SPI 的添加导致蛋白质和淀粉以及月桂酸形成了排列更加规整的有序结构,抑制了馒头在储藏过程中的老化^[16]。

红外光谱中 1 740 cm⁻¹ 和 2 850 cm⁻¹ 处的吸收峰是由脂肪酸—C=O 振动和—CH₂—不对称拉伸振动引起的^[23-24]。由图 5 可知,单独添加月桂酸和同时添加月桂酸和 SPI 的样品在 2 850 cm⁻¹ 处都有峰,但在 1 740 cm⁻¹ 处都没有峰,这归因于月桂酸进

入小麦淀粉的螺旋腔内形成了淀粉-脂肪酸复合物,掩蔽了脂肪酸的—C=O^[25]。淀粉的红外光谱中,1 040 cm⁻¹ 附近的吸收峰与淀粉的有序结构相关,而 1 022 cm⁻¹ 附近的吸收峰则与淀粉的无定形区相关。1 040 cm⁻¹ 与 1 022 cm⁻¹ 吸收峰比值(1 040 cm⁻¹/1 022 cm⁻¹)越大,说明有序结构在淀粉中的占比相对越高,淀粉的结晶度越高^[26]。由表 5 可看出,随着储藏时间从 0 d 增加到 7 d,1 040 cm⁻¹/1 022 cm⁻¹ 都略有增加,这表明随着储藏时间的延长,馒头中淀粉的短程有序性增加,与拉曼光谱的结果一致。储藏 7 d 后,空白组、单独添加 SPI、单独添加月桂酸和同时添加月桂酸和 SPI 馒头中淀粉 1 040 cm⁻¹/1 022 cm⁻¹ 相较储藏 0 d 分别增加 8.3%、4.5%、2.8% 和 2.6%。可以看出,同时添加月桂酸和 SPI 馒头中淀粉的短程有序性增加的速度低于单独添加 SPI 馒头的。因此,月桂酸有望抑制长期储藏期间单独添加 SPI 馒头中淀粉短程有序结构的增加。

3 结论

添加 6% (配方中除酵母和水的质量占比) 的 SPI 降低了馒头的比容且显著增加了馒头的硬度,向其中添加 3% 的月桂酸能改善 SPI 所致馒头比容的降低和硬度的增加,同时能通过与淀粉、蛋白互作形成淀粉基复合物降低含 SPI 馒头中淀粉的消化性。此外,向含 SPI 馒头中添加月桂酸还能降低储藏期间含 SPI 馒头硬度的增加,延缓储藏期间含 SPI 馒头中淀粉长程和短程有序结构的增加,从而延缓淀粉的老化。综上,月桂酸能通过干扰小麦淀粉、面筋蛋白和 SPI 的相互作用,参与小麦淀粉糊化和老化过程,从而改善 SPI 所致馒头比容的降低和硬度的增加,延缓储藏期间含 SPI 馒头中淀粉的老化。

参考文献:

[1] 赵景艳, 张剑, 高继伟. 大豆分离蛋白对面团特性及馒

- 头品质的影响[J]. 农产品加工: 学刊, 2012(10): 47-48, 53.
- [2] DONG D, CUI B. Fabrication, characterization and emulsifying properties of potato starch/soy protein complexes in acidic conditions [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2021, 115: 106600 [2024-01-24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106600>.
- [3] ZHOU J, LIU J, TANG X. Effects of whey and soy protein addition on bread rheological property of wheat flour[J]. J Texture Stud, 2018, 49(1): 38-46.
- [4] 臧学丽. 大豆分离蛋白在食品加工中的应用[J]. 食品安全导刊, 2019(32): 31.
- [5] 王晓辉. 大豆蛋白对面团中蛋白质的组成和结构的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
- [6] 董梦飞, 郭兴凤, 张明, 等. 大豆分离蛋白及其改性产物对馒头品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 251-261.
- [7] 康雪敏. 淀粉-脂质复合物的构建及对面制品的影响[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2020.
- [8] 窦博鑫, 李明玉, 张煜, 等. 淀粉-脂肪酸复合物的研究进展[J]. 中国调味品, 2023, 48(12): 206-212.
- [9] ÅKERBERG A, LILJEBERG H, BJÖRCK I. Effects of amylose/amylopectin ratio and baking conditions on resistant starch formation and glycaemic indices [J]. J Cereal Sci, 1998, 28(1): 71-80.
- [10] ZHANG Y, CHEN C, CHEN Y, et al. Effect of rice protein on the water mobility, water migration and microstructure of rice starch during retrogradation [J]. Food Hydrocolloid, 2019, 91: 136-142.
- [11] LING Z, TANG W, SU Y, et al. Stepwise allomorphic transformations by alkaline and ethylenediamine treatments on bamboo crystalline cellulose for enhanced enzymatic digestibility [J/OL]. Ind Crops Prod, 2022, 177: 114450 [2024-01-24]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114450>.
- [12] 牛斌. 不同因素对淀粉-脂肪酸-蛋白质相互作用的影响及其机制[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- [13] LI W, CAO W, WANG P, et al. Selectively hydrolyzed soy protein as an efficient quality improver for steamed bread and its influence on dough components [J/OL]. Food Chem, 2021, 359: 129926 [2024-01-24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129926>.
- [14] ROCCIA P, RIBOTTA P D, PÉREZ G T, et al. Influence of soy protein on rheological properties and water retention capacity of wheat gluten[J]. LWT - Food Sci Technol, 2009, 42(1): 358-362.
- [15] WANG S, CHAO C, CAI J, et al. Starch - lipid and starch - lipid - protein complexes: A comprehensive review[J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2020, 19(3): 1056-1079.
- [16] ZHENG M, CHAO C, YU J, et al. Effects of chain length and degree of unsaturation of fatty acids on structure and *in vitro* digestibility of starch - protein - fatty acid complexes[J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(8): 1872-1880.
- [17] 邓丽丽. 小麦淀粉分子结构基础与冷冻馒头品质关系的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
- [18] 肖安红, 马昌义, 李学昌, 等. 低温脱脂豆粉改善馒头老化的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2005(6): 20-22.
- [19] CHEN J, CAI H, YANG S, et al. The formation of starch - lipid complexes in instant rice noodles incorporated with different fatty acids: Effect on the structure, *in vitro* enzymatic digestibility and retrogradation properties during storage [J/OL]. Food Res Int, 2022, 162 (Pt A): 111933 [2024-01-24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111933>.
- [20] 黄世清. 非晶态淀粉短程有序性对淀粉功能性质及面包品质的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- [21] 陈炜铠. 蛋白-脂质互作对淀粉-脂质-蛋白复合物形成的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
- [22] 董慧娜. 板栗淀粉-脂质复合物的构建及特性对抗老化影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- [23] ZHANG H, WANG H, ZHANG Q, et al. Fabrication and characterization of starch - lipid complexes using chain - elongated waxy corn starches as substrates [J/OL]. Food Chem, 2023, 398: 133847 [2024-01-24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133847>.
- [24] LIN L, YANG H, CHI C, et al. Effect of protein types on structure and digestibility of starch - protein - lipids complexes [J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2020, 134: 110175 [2024-01-24]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110175>.
- [25] 郑梦歌. 淀粉-脂肪酸-蛋白质三元复合物的形成机制及对淀粉功能性质的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- [26] 韩蕊, 许秀颖, 侯景瑶, 等. 冻融循环次数对超声改性玉米淀粉凝胶特性和结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 9-17.