

大豆分离蛋白影响面团特性的作用机制研究

高雪丽¹, 陈复生², 张丽芬², 布冠好², 樊明涛¹

(1. 西北农林科技大学食品学院, 陕西杨凌 712100) (2. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘要: 本文研究了大豆分离蛋白对面团特性的影响规律及其对小麦蛋白的作用机制。结果表明, 随着大豆分离蛋白(SPI)添加量的增加, 湿面筋含量呈下降趋势, 面筋指数呈上升趋势。SPI-小麦面团的吸水率、形成时间、稳定时间和粉质指数逐渐增加, 而弱化度逐渐减小。拉伸能量和延伸度逐渐降低, 拉伸阻力和拉伸比值逐渐增大。糊化最高黏度、回升值依次降低。总质子信号幅度、 $T_2(1)$ 质子信号幅度、 $T_2(2)$ 质子信号幅度逐渐增大。巯基含量呈上升趋势, 二硫键含量呈下降趋势。综合考虑, SPI 在面制品中的添加量应低于 7%。通过非还原和还原条件下的电泳图, 可以看出 SPI 与小麦蛋白之间确实发生了交联, 且 SPI 与小麦蛋白之间除形成二硫键外, 还形成其它共价键。本研究为利用大豆分离蛋白改善面制食品的营养及加工品质, 扩大大豆分离蛋白在面制食品加工中的应用范围提供理论基础。

关键词: 大豆分离蛋白; 面团; 特性; 作用; 机制

文章编号: 1673-9078(2015)12-177-184

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.12.027

Study on The Mechanism Underlying The Impact of Soy Protein Isolate on Dough Properties

GAO Xue-li¹, CHEN Fu-sheng², ZHANG Li-fen², BU Guan-hao², FAN Ming-tao¹

(1.College of Food Science and Engineering of Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

(2.College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The effects of soy protein isolate (SPI) on dough properties and the mechanism underlying the impact of SPI on wheat protein were investigated in this study. The results showed that as the amount of SPI added gradually increased, the wet gluten content and the gluten index displayed downward and upward trends, respectively. The water absorption rate, development time, stability time, and farinograph quality number of SPI-dough gradually increased, whereas the degree of softness gradually decreased. The tensile energy and extensibility of mixed dough gradually decreased, whereas the resistance to extension and the extension ratio gradually increased. Compared with the control, the peak viscosity and setback of mixed dough decreased upon addition of SPI. The total proton signal amplitude, $T_2(1)$ proton signal amplitude, and $T_2(2)$ proton signal amplitude gradually increased with SPI addition. The -SH and -S-S- contents gradually increased and decreased, respectively, upon addition of SPI. After comprehensive consideration, the optimum amount of added SPI in flour products should be under 7%. As can be seen from the results of sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) under reducing and non-reducing conditions, crosslinking between SPI and wheat protein did occur; in addition to disulfide bonds, other covalent bonds were also observed between SPI and wheat protein. These results provide a theoretical basis for adding SPI to improve the nutritional value and processing quality of flour products and expand the application of soybean protein in the processing of flour-based foods.

Key words: soy protein isolate; dough; properties; effect; mechanism

食物蛋白质的氨基酸组成中, 如果某一氨基酸缺乏, 将影响整体蛋白质的营养价值, 如: 小麦蛋白质

收稿日期: 2015-07-25

基金项目: 国家 863 项目 (2013AA102208-5); “十二五”国家科技支撑计划项目 (2014BAD04B10)

作者简介: 高雪丽 (1982-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 食品蛋白质资源开发及利用

通讯作者: 樊明涛 (1962-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向: 低值蛋白质资源生物转化。

中缺少赖氨酸^[1]。为了增加面制品中氨基酸的平衡, 可以在面制品中添加大豆蛋白^[2-3]。小麦面粉与水混合搅拌形成具有一定持气性的粘弹性面团, 这是小麦粉特有的性质。形成的粘弹性面团的骨架部分是小麦蛋白。在面团形成的过程中, 面粉中蛋白的主要成分麦谷蛋白和麦醇溶蛋白会吸水膨胀, 通过二硫键的断裂或形成, 以及一些非共价键和共价键的作用连接在一起, 形成面制品特有的流变学特性^[4-6]。大豆蛋白和小麦蛋白之间在水溶性、一级结构和粒度分布等方面有

很大的差异, 在小麦粉中大量的添加大豆蛋白, 会对小麦粉面团的流变学特性产生巨大的影响, 甚至降低最终产品的品质^[7-9]。

研究大豆蛋白和小麦蛋白之间的相互作用有利于深入了解如何降低面团中的大豆蛋白对面团的弱化效应。先前的研究认为大豆蛋白对面团形成的负作用主要是由于大豆蛋白与小麦面筋蛋白之间相互交联太少^[10]。最近关于大豆蛋白与小麦蛋白之间相互作用的研究成为热点^[11-12]。一些研究者发现大豆蛋白与小麦蛋白之间是通过非共价键相互作用的, 因为通过对面团和小麦-大豆复合面团中的巯基进行分析, 并没有发现有所改变。其他人认为大豆蛋白和小麦蛋白通过非共价键和共价键(二硫键)相互作用, 而且作用程度取决于大豆蛋白形态^[12]。尽管这些研究对于理解大豆-小麦面团所产生的一些物理、化学、及流变学特性的改变起到了一定的作用。然而大豆蛋白与小麦蛋白在分子层面的研究还较少。

本文旨在研究大豆分离蛋白对面团特性的影响机制。通过研究添加大豆分离蛋白(SPI)对面团的筋力、粉质、拉伸、糊化、水分迁移等特性及巯基和二硫键含量的影响, 并采用电泳分析非还原和还原条件下的SPI-小麦蛋白, 深入探讨SPI与小麦蛋白作用的分子机制, 为其在面制品中应用和改良提供理论基础, 拓宽它在面制品中的应用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大豆分离蛋白(SPI)蛋白质含量 92.00%: 山东谷神生物科技集团有限公司; 小麦粉蛋白质含量 12.60%: 自制。

1.2 主要仪器

D-37520 真空冷冻干燥机, 德国 Kendro 公司; 2300K 全自动凯氏定氮仪, 瑞典 FOSS TECATOR 公司; Farinograph-AT 型粉质仪、Extensograph-E 拉伸仪, 德国 Brabender 公司; RVA-3D 型快速黏度仪, 澳大利亚 Newport Scientific 公司; LGJ-18 型核磁共振分析仪, 上海纽迈电子科技有限公司; DDY-6D 型电泳仪, 北京市六一仪器厂。

1.3 试验方法

1.3.1 混合粉的制备

将 SPI 按照 3%、5%、7%、9% 的比例加入到小麦粉中, 混匀; 纯的小麦粉为空白样品。

1.3.2 混合粉面筋含量的测定

参照 38-12A (AACC, 2000), 采用面筋测定仪对混合粉湿面筋含量进行测定。

1.3.3 混合粉面团粉质、拉伸特性的测定

参照 GB/T 14614-2006, 采用 Brabender 粉质、拉伸仪对混合粉粉质、拉伸参数进行测定。

1.3.4 混合粉面团糊化特性的测定

按照 GB/T 24853-2010 的方法, 利用快速黏度分析仪(RVA)测定混合粉的糊化特性。

1.3.5 混合粉面团水分迁移特性的测定

分别称取各混合粉 10.0 g, 加入适量的水(按 85% 最佳吸水率计算), 分别按照各自粉质的最佳和面时间和面, 和面结束, 将适量样品置于直径为 15 mm 的 NMR 测试管底部, 利用 CPMG(Carr-Purcell-Meiboom-Gill)脉冲序列测定样品的横向弛豫时间(T_2)。NMR 分析条件参照高雪丽等方法^[13]。

1.3.6 混合粉面团中巯基(-SH)和二硫键(-S-S-)含量的测定

分别称取各混合粉 10.0 g, 加入适量的水(按 85% 最佳吸水率计算), 分别按照各自粉质的最佳和面时间和面, 和面结束取 10 g 面团, 立即放入冰箱, -75 °C 条件下冷冻保存。将样品冷冻干燥后用研钵磨成粉, 放入冰箱保存备用。-SH 和-S-S-含量的测定方法参照罗明江等方法^[14]。

1.3.7 十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)

分别称取各混合粉 10.0 g, 加入适量的水(按 85% 最佳吸水率计算), 分别按照各自粉质的最佳和面时间进行和面, 将面团冷冻干燥, 再用研钵磨成粉。称取 25 mg 面团干粉, 加入 1 mL 非还原、还原(含有巯基乙醇)缓冲溶液。将产生的悬浮液放入 30 °C 的水浴锅中静置 3 h。在 20 ± 2 °C、12000 g 的条件下离心 15 min, 取上清液煮沸 5 min。进样 12 μ L, 接通电泳仪, 调节电流至 24 mA, 开始电泳, 至溴酚蓝前沿进入分离胶, 电流调至 20 mA, 继续电泳直至溴酚蓝到达分离胶底部上方约 1 cm (约 2 h), 然后关闭电源, 取出插头。将凝胶放入固定液中 1 h, 取出, 放入染色液中染色 1.5 h; 再用脱色液脱色, 直到蛋白质区带清晰。采用凝胶分析软件进行分析(BandScan5.0)。

1.3.8 统计分析

所有试验均重复 3 次, 采用 SAS V8 分析系统对数据进行统计分析, 显著水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 SPI 对面团面筋特性的影响

添加 SPI 的混合粉面团的面筋特性见表 1。由表 1 可知,与空白相比,随着 SPI 添加量的增加,湿面筋含量呈下降趋势,面筋指数呈上升趋势,且各处理间的差异基本都达到显著水平 ($P<0.05$)。SPI 添加量

表 1 SPI 对面团面筋特性的影响

Table 1 Effect of SPI on the properties of dough gluten

	空白	3%SPI	5%SPI	7%SPI	9%SPI
湿面筋含量/%	30.00±0.00 ^a	29.00±1.00 ^a	27.00±1.00 ^b	25.00±1.00 ^c	25.00±0.00 ^c
面筋指数/%	65.00±1.70 ^c	65.50±0.00 ^c	75.10±1.00 ^b	75.00±1.00 ^b	80.00±1.00 ^a

注:表中含有相同字母的表示差异不显著($P>0.05$)。

2.2 SPI 对面团粉质特性的影响

添加 SPI 的混合粉面团粉质特性见表 2。由表 2 可知,与空白相比,随着 SPI 添加量的增加,混合粉面团吸水率逐渐增加,从 56.70%增至 68.70%,升高了 12.00%;添加 3%SPI 混合粉面团的形成时间与空白相比稍有降低,之后,随着 SPI 添加量的增加,混合粉面团的形成时间逐渐增加,从 1.70 min 延长至 3.50 min,延长幅度 1.80 min,延长了 106.00%;混合粉面团的稳定时间逐渐增加,从 1.90 min 延长至 3.60 min,延长幅度 1.70 min,延长了 89.00%;混合粉面团的弱化度逐渐降低,从 140.00 FU 降至 119.00 FU,降低了 15.00%;混合粉的粉质指数逐渐上升,从 27.00 升至 49.00,增加了 81.50%。由表 2 也可以看出,随着 SPI 添加量的增加,混合粉面团的吸水率、形成时间、稳定时间和粉质指数增加幅度越来越小,当 SPI 的添加量为 7%时,趋于平缓;随着 SPI 添加量的增加,混合粉面团的弱化度逐渐减小,当 SPI 的添加量为 7%时,趋于平缓。

表 2 SPI 对面团粉质特性的影响

Table 2 Effect of SPI on the farinograph properties of dough

粉质特性	空白	3%SPI	5%SPI	7%SPI	9%SPI
吸水率/%	56.70±0.10 ^c	59.80±0.10 ^d	62.20±0.10 ^c	65.50±0.10 ^b	68.70±0.10 ^a
形成时间/min	1.70±0.10 ^d	1.20±0.10 ^e	2.00±0.30 ^c	2.70±0.10 ^b	3.50±0.10 ^a
稳定时间/min	1.90±0.10 ^e	2.10±0.10 ^d	2.80±0.10 ^c	3.30±0.10 ^b	3.60±0.10 ^a
弱化度(FU)	140.00±6.00 ^a	143.00±3.00 ^a	128.00±3.00 ^b	124.00±3.00 ^{bc}	119.00±2.00 ^c
粉质指数	27.00±2.00 ^d	26.00±2.00 ^d	38.00±2.00 ^c	45.00±2.00 ^b	49.00±2.00 ^a

注:表中含有相同字母的表示差异不显著($p>0.05$)。

2.3 SPI 对面团拉伸特性的影响

添加 SPI 的混合粉面团的拉伸特性见表 3。由表 3 可知,与空白相比,随着 SPI 添加量的增加,当试验分别进行至 45 min、90 min 时,混合粉面团的拉伸

增大时,大豆蛋白和面筋蛋白之间通过共价键和非共价键产生交联作用,形成蛋白复合体,进而阻碍了面团的面筋结构的形成,从而使湿面筋含量降低^[15]。但大豆蛋白和面筋蛋白之间形成大的聚合体^[16],使部分面筋蛋白通过筛网的能力下降,从而导致面筋指数增大。

李向阳等研究了添加大豆分离蛋白对面团特性及挂面品质的影响。结果表明,添加大豆分离蛋白可使面团的吸水率增加,面团的形成时间和稳定时间延长,粉质指数升高^[17]。而 Dhingra and Jood 报道,随着大豆粉加入量的增加,大豆-小麦复合面团的面筋含量,降落数值,吸水率,面团的稳定时间均降低^[18]。这可能是由于所加入的大豆分离蛋白或大豆粉所选用的大豆品种不同,不同品种的大豆蛋白功能性质不同,进而导致对面团粉质特性的影响不同。添加适量的大豆分离蛋白可以改善面团的流变学特性。随着 SPI 的加入,混合粉面团吸水率增加是由于大豆蛋白的吸水能力比面筋蛋白强,从而导致混合粉面团的吸水率增加。面筋是面团的骨架,由麦醇溶蛋白和麦谷蛋白质组成,加入 SPI 后, SPI 与面筋蛋白竞争性争夺水分,使面筋网络的形成时间延长。面筋充分吸水溶胀的时间延长,抗拉伸阻力增加,面团的耐揉性增强,面团的韧性增大,对剪切降解有好的抵抗力,形成时间越长,稳定时间也越长,弱化度越小。

能量和延伸度逐渐降低,拉伸阻力和拉伸比值逐渐增大。当试验进行至 45min 时,拉伸能量可由 36.00 cm² 降低至 27.00 cm²,降低了 25.00%;延伸度从 187.00 mm 降至 104.00 mm,降低了 44.40%;拉伸阻力从 126.00 增加到 194.00,增强了 53.40%;拉伸比值从

0.70 增至 1.50, 增大了 114.00%。当试验进行至 90 min 时, 拉伸能量可由 42.00 cm² 降至 29.00 cm², 降低了 40.00%; 延伸度从 190.00 mm 降至 119.00 mm, 降低了 37.40%; 拉伸阻力从 140.00 增加到 224.00, 增强了 60.00%; 拉伸比值从 0.70 增至 1.90, 增大了 171.00%。当试验进行至 135 min 时, 拉伸能量有了少量增加, 可由 43.00 cm² 增加至 46.00 cm², 增加了 7.00%; 延伸度从 173.00 mm 降至 116.00 mm, 降低了 32.90%; 拉伸阻力从 154.00 EU 增加到 254.00 EU, 增强了 64.90%; 拉伸比值从 0.90 增至 2.20, 增大了 144.00%。

何雅蕾等研究表明将大豆分离蛋白粉作为一种食品添加剂添加到小麦粉中可以明显地改善面团的稳定时间以及拉伸曲线面积和拉伸阻力^[19]。Doxastakis *et*

al. 采用拉伸仪对大豆-小麦复合面团的拉伸特性进行测定, 结果表明, 随着大豆粉添加量的增加和试验的进行 (45-135 min), 混合面团的延展性降低, 拉伸比随着大豆粉添加量的增加而增加^[20]。崔丽琴等人将豆渣粉加入到小麦粉中也得到了类似的研究结果^[21]。由于 SPI 对面筋蛋白的稀释作用, 阻碍了面筋网络的形成, 导致面筋蛋白延展性下降, 延伸度下降, 拉伸能量降低, 拉伸阻力和拉伸比值增大。随着试验的进行, 当试验进行至 135 min 时, 拉伸能量反而有了少量增加, 可能是由于随着试验的进行, 在试验条件下, 加入 SPI 的与小麦面筋蛋白产生了交联, 生成大的聚集体, 导致面团的弹性增强, 韧性增大, 面筋筋力增强, 从而使拉伸阻力增大, 拉伸能量增大。

表 3 SPI 对面团拉伸特性的影响

Table 3 Effect of SPI on the tensile properties of dough

时间	拉伸特性	空白	3% SPI	5% SPI	7% SPI	9% SPI
拉伸能量/cm ²	45 min	36	28	30	27	31
	90 min	42	29	36	33	41
	135 min	43	34	44	44	46
延伸度/mm	45 min	187	144	116	104	112
	90 min	190	120	127	106	119
	135 min	173	123	136	132	116
拉伸阻力/EU	45 min	126	121	162	160	194
	90 min	140	150	184	192	224
	135 min	154	174	208	217	254
拉伸比值	45 min	0.7	0.9	1.4	1.5	1.5
	90 min	0.7	1.2	1.5	1.9	1.9
	135 min	0.9	1.4	1.5	1.7	2.2

2.4 SPI 对面团糊化特性的影响

添加 SPI 对面团糊化特性的影响见表 4。由表 4 可知, 随着 SPI 的添加, 糊化最高黏度、回升值与空白相比均降低, 且随着 SPI 添加量的增加, 依次降低。王春娥等报道, 最高黏度值越低, 会使面条发黏、

混汤、易断, 所以, 为保证面条的品质, 峰值黏度的最低值应在 2000.00 cp 为宜^[22]。另外, 最高黏度降低, 表示 α-淀粉酶活性升高, 面制品不易老化^[23-24]。最高粘度降低可能是 SPI 与水结合, 影响了淀粉与水分子间氢键的形成, 导致峰值黏度下降, 最高粘度与产品的品质相关。添加 SPI 可一定程度减缓面制品的老化。

表 4 SPI 对面团糊化特性的影响

Table 4 Effect of SPI on the pasting properties of dough

糊化特性	空白	3% SPI	5% SPI	7% SPI	9% SPI
最高粘度/cp	2595.00±22.00 ^a	2561.00±19.00 ^b	2538.00±11.00 ^{bc}	2525.00±6.00 ^c	2382.00±20.00 ^d
最低粘度/cp	1405.00±7 ^d	1432.00±7.00 ^c	1507.00±4.00 ^a	1384.00±5.00 ^e	1443.00±6.00 ^b
衰减/cp	2675.00±9.00 ^b	2687.00±8.00 ^b	2722.00±13.00 ^a	2590.00±12.00 ^d	2641.00±21.00 ^c
最终粘度/cp	1190.00±6.00 ^a	1129.00±20.00 ^b	1031.00±14.00 ^c	1141.00±14.00 ^b	939.00±9.00 ^d
回生值/cp	1270.00±8.00 ^a	1255.00±6.00 ^b	1215.00±3.00 ^c	1206.00±6.00 ^{cd}	1198.00±7.00 ^d

注: 表中含有相同字母的表示差异不显著 (p > 0.05)。

2.5 SPI 对面团水分迁移特性的影响

2.5.1 空白粉面团的 T₂ 波谱图

空白粉面团在不同放置时间下的 T₂ 分布曲线如图 1, 曲线可以分成两个部分: 第一部分 T₂ (1), 它的 T₂ 值约为 2ms, 这是与蛋白质和淀粉内部结合的水质子, 称为深层结合水; 第二部分 T₂ (2), 它的 T₂ 值约为 10 ms, 这也是与蛋白质和淀粉结合的水质子, 但其活性更高, 应该是结合在蛋白质与淀粉之间的水质子, 称为半结合水^[25~26]。

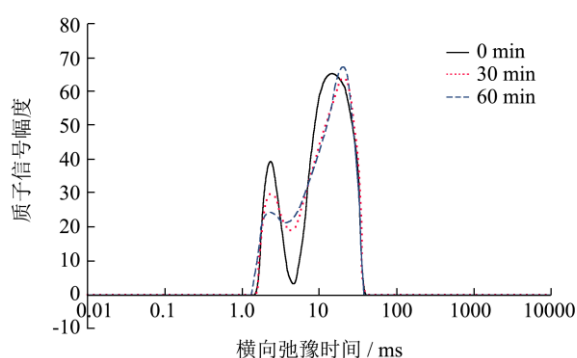


图 1 空白粉面团不同放置时间下的 T₂ 分布曲线

Fig.1 T₂ distribution curve of dough after different storage times

由图 1 可以看出, 随着放置时间的延长, T₂ (1) 质子信号幅度依次减小, 且 0~30 min 内质子信号大幅度减小, 30~60 min 内质子信号小幅度减小; T₂ (2) 质子信号幅度依次增大。这说明随着空白面团放置时间的延长, 蛋白质和淀粉内部结合的水质子越来越少而蛋白质与淀粉之间的水质子 (也就是更活泼的水质子) 越来越多。也说明随着时间的延长, 面团中的水分在向更容易失去的方向迁移, 面团中的水分在逐渐的散失。

2.5.2 SPI 对质子信号幅度的影响

SPI 对总质子信号、T₂ (1) 质子信号、T₂ (2) 质子信号幅度的影响如图 2a、b、c。由图 2a 可知, 添加 SPI 可以使总质子信号幅度明显增大, 且随着面团放置时间的延长, 各条曲线无明显变化趋势。总质子信号幅度明显增大是因为 SPI 具有非常强的吸水性, 本文粉质试验结果也表明, 随着面团中 SPI 含量的增加, 面团的吸水率大幅度上升。

由图 2b 可知, 添加 SPI 可以使面团 T₂ (1) 质子信号幅度增大, T₂ (1) 表示的是蛋白质和淀粉内部结合的水质子, 这部分水流动性较低, 不容易失去, 被称为深层结合水, 说明添加 SPI 的添加促进了水分与蛋白质-淀粉内部网络结构的结合, 面团中深层结合水的含量增多, 减缓面团中水分的迁移。随着面团放置

时间的延长, 各条曲线有一定程度的波动, 在放置时间 60 min 时, 添加 SPI 质后的面团 T₂ (1) 质子信号幅度随着 SPI 添加量的增大而逐渐增大, 添加 9%SPI 面团质子信号幅度最大, 且明显高于其它几组。

由图 2c 可知, 添加 SPI 可以使面团 T₂ (2) 质子信号幅度增大, 随着面团放置时间的延长, 各条曲线有一定程度的波动, 在放置时间 60 min 时, 添加 SPI 后的面团 T₂ (2) 质子信号幅度随着 SPI 添加量的增大而逐渐增大, 添加 9%SPI 面团质子信号幅度最大, 且明显高于其它几组。总的来说, 添加 SPI 可以增加面团中的水分含量, 且延缓面团中水分向更容易失去的方向迁移, 从一定程度上延缓面制食品的老化, 这与糊化试验结果一致。

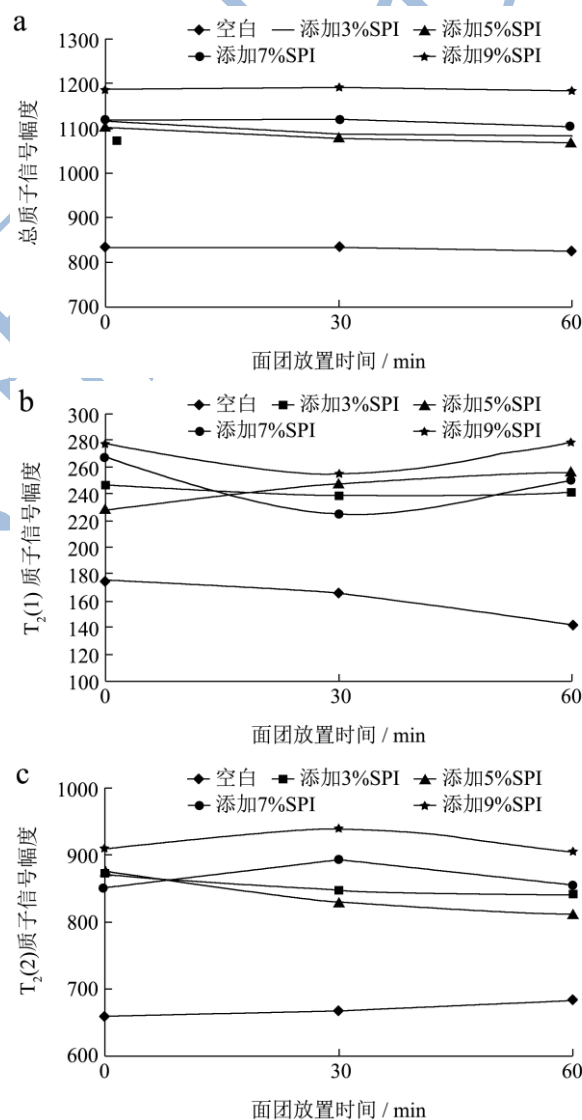


图 2 SPI 对 T₂ 质子信号幅度的影响

Fig.2 Effect of SPI on T₂ proton signal amplitude

2.6 SPI 对面团中-SH 和-S-S-含量的影响

由表 5 可知, 随着 SPI 添加量的增加, 巯基含量

呈上升趋势,二硫键含量呈下降趋势,且均高于空白。随着 SPI 添加量的增加,巯基含量呈上升趋势,这可能是由于 SPI 本身含有巯基,巯基含量的增加与整体组分中巯基含量的增多有关。一般来说,二硫键的形成可使蛋白质肽链的空间结构更加紧密,二硫键相互结合形成的大分子纤维状聚合体即为面团的“骨架”,因此随着 SPI 添加量的增加,二硫键含量呈下降趋势,说明 SPI 影响了面筋蛋白的网络结构。陈义勇等曾提到大豆蛋白能与麦醇溶性蛋白疏水结合,与麦谷性蛋白亲水结合,从而破坏面筋网络脂-蛋白-淀粉复合物的结构,导致面筋含量减少^[27]。有研究者也曾指出非面筋蛋白的互换会对二硫键造成破坏^[28]。

表 5 SPI 对面团中巯基和二硫键的影响

Table 5 Effect of SPI on the sulfhydryl and disulfide bonds of dough

样品	-SH含量/($\mu\text{m/g}$)	-S-S-含量/($\mu\text{m/g}$)
空白	3.02 \pm 0.02 ^e	5.46 \pm 0.10 ^e
3% SPI	3.15 \pm 0.05 ^d	6.12 \pm 0.09 ^a
5% SPI	3.32 \pm 0.03 ^c	5.83 \pm 0.045 ^b
7% SPI	3.57 \pm 0.02 ^b	5.72 \pm 0.06 ^{cd}
9% SPI	3.64 \pm 0.02 ^a	5.64 \pm 0.00 ^d

注:表中含有相同字母的表示差异不显著 ($P > 0.05$)

2.7 SDS-PAGE 分析 SPI 与小麦蛋白的交联作用

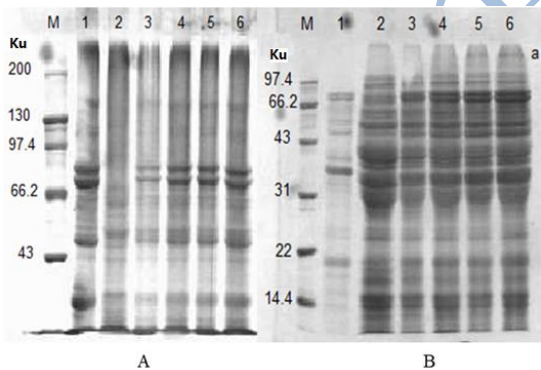


图 3 非还原(凝胶 A)和还原(凝胶 B)条件下的 SPI-小麦蛋白质电泳图

Fig.3 Electrophoresis gel image of SPI-wheat protein under non-reducing (gel A) and reducing (gel B) conditions

注: M 为标准分子量。SPI (泳道 1), 小麦面筋蛋白 (泳道 2), 3% SPI-小麦蛋白 (泳道 3), 5% SPI-小麦面筋蛋白 (泳道 4), 7% SPI-小麦面筋蛋白 (泳道 5), 9% SPI-小麦面筋蛋白 (泳道 6)。

SDS-PAGE 分析 SPI 与小麦蛋白的交联作用结果见图 3A、B。由图 3A、B 可以看出 SPI-小麦蛋白和

小麦蛋白的电泳图都有拖尾现象,这是由于面团形成过程中蛋白质发生交联产生了聚合物。图 3A 为非还原条件下 SPI-小麦面筋蛋白与小麦面筋蛋白的电泳图。SPI-小麦蛋白(泳道 3-8)上部的拖尾现象比小麦蛋白(泳道 2)更明显,这表明 SPI-小麦蛋白样品中含有一部分 SDS 可溶蛋白质聚合物。图 3B 为还原条件下 SPI-小麦蛋白与小麦蛋白的电泳图。在 3%、5%、7%和 9%SPI-小麦蛋白(泳道 2-6)中都有一条分子量在 97 ku 以上的条带(用字母 a 表示),但是在小麦面筋蛋白和 SPI 中并没有该条带,且随着 SPI 添加量的增加该条带越明显。通过非还原和还原条件下的电泳图,可以看出 SPI 与小麦蛋白之间确实发生了交联,且 SPI 与小麦蛋白之间除形成二硫键外,还形成其它共价键。

3 结论

3.1 将大豆分离蛋白应用于面制食品中,不仅提高了蛋白质含量,而且根据氨基酸互补原则,提高了蛋白质营养质量。因此,将大豆分离蛋白产品添加到面制品中是今后的发展趋势。随着 SPI 添加量的增加,湿面筋含量呈下降趋势,面筋指数呈上升趋势,且各处理间的差异基本都达到显著水平。SPI-小麦面团的吸水率、形成时间、稳定时间和粉质指数随着 SPI 添加量的增加逐渐增加,而弱化度逐渐减小,且增加、减小幅度越来越小,当 SPI 的添加量为 7%时,趋于平缓。随着 SPI 添加量的增加,混合粉面团的拉伸能量和延伸度逐渐降低,拉伸阻力和拉伸比值逐渐增大。糊化最高黏度、回升值与空白相比均降低,且随着 SPI 添加量的增加,依次降低。SPI-小麦面团总质子信号幅度、 $T_2(1)$ 质子信号幅度、 $T_2(2)$ 质子信号幅度均随着 SPI 添加量的增大而逐渐增大。巯基含量呈上升趋势,二硫键含量呈下降趋势,且当 SPI 添加量为 7%时,二硫键含量仍高于空白。综合考虑, SPI 在面制品中的添加量应低于 7%,可以增加面制品的营养价值,且一定程度减缓面制品的老化。通过非还原和还原条件下的电泳图,可以看出 SPI 与小麦蛋白之间确实发生了交联,且 SPI 与小麦蛋白之间除形成二硫键外,还形成其它共价键。

3.2 总的来说,添加 SPI 对面团特性的影响规律,是由于 SPI 与小麦蛋白之间形成的二硫键和其它共价键造成的。本研究为大豆分离蛋白在面制品中的应用提供理论基础,对改善面制食品的营养、加工品质、扩大大豆蛋白在面制食品加工中的应用范围等都有较大意义,因而具有重要的理论意义和应用价值。

参考文献

- [1] Martinez-Villaluenga C, Torres A, Frias J, et al. Semolina supplementation with processed lupin and pigeon pea flours improve protein quality of pasta [J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2010, 43(4): 617-622
- [2] Roccia P, Ribotta P D, Perez G T, et al. Influence of soy protein on rheological properties and water retention capacity of wheat gluten [J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2009, 42(1): 358-362
- [3] Wilson T A, Orthoefer F, Nicolosi R J. Soy protein concentrate lowers serum high-density lipoprotein cholesterol concentrations compared with casein in ovariectomized rats fed a low-fat, cholesterol-free diet [J]. *Nutrition Research*, 2007, 27(7): 417-422
- [4] Veraverbeke W S, Delcour J A. Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality [J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2002, 42(3): 179-208
- [5] Shewry P R, Halford N G, Belton P S, et al. The structure and properties of gluten: an elastic protein from wheat grain [J]. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 2002, 357(1418): 133-42
- [6] Hayta M, Alpaslan M. Effects of processing on biochemical and rheological properties of wheat gluten proteins [J]. *Die Nahrung*, 2001, 45(5): 304-8
- [7] Gupta M, Bawa A S., Semwal A D. Effect of barley flour blending on functional, baking and organoleptic characteristics of high-fiber rusks [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2011, 35(1): 46-63
- [8] Mohammed I, Ahmed A R, Senge B. Effects of chickpea flour on wheat pasting properties and bread making quality [J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2014, 51(9): 1902-1910
- [9] Ribotta P D, Amulphi S A, Leon A E, et al. Effect of soybean addition on the rheological properties and breadmaking quality of wheat flour [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2005a, 85(11): 1889-1896
- [10] Ryan K J, Homco-Ryan C L, Jenson J, et al. Lipid extraction process on texturized soy flour and wheat gluten protein-protein interactions in a dough matrix [J]. *Cereal Chemistry*, 2002, 79(3): 434-438
- [11] Don C, Lichtendonk W J, Plijter J J, et al. The effect of mixing on glutenin particle properties: aggregation factors that affect gluten function in dough [J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 41(1): 69-83
- [12] Ribotta P D, Leon A E, Perez G T, et al. Electrophoresis studies for determining wheat-soy protein interactions in dough and bread [J]. *European Food Research and Technology*, 2005b, 221(1-2): 48-53
- [13] 高雪丽,陈复生,张丽芬,等.大豆 7S 和 11S 球蛋白对面团特性及馒头品质的影响[J].*现代食品科技*,2014,10:13-18
GAO Xue-li, CHEN Fu-sheng, ZHANG Li-fen, et al. Effects of 7S and 11S soy protein on the qualities of dough and chinese steamed bread [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 10: 13-18
- [14] 罗明江,罗春霞,吴赣香. Ellman's 试剂比色法测定食品中蛋白质的巯基和二硫键[J].*郑州粮食学院学报*,1986,01: 92-95.
LUO Jiang-ming, LUO Chun-xia, WU Gan-xiang. Determination of sulfhydryl group and disulfuric chain of protein in food by ellman's reagent colorimetric method [J]. *Journal of Zhengzhou Grain College*, 1986, 01: 92-95
- [15] Dhingra S, Jood S. Effect of flour blending on functional, baking and organoleptic characteristics of bread [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2004, 39: 213-222
- [16] Maforimbo E, Skurray G, Uthayakumaran S, et al. Improved functional properties for soy-wheat doughs due to modification of the size distribution of polymeric proteins [J]. *Journal of Cereal Science*, 2006, 43(2): 223-229
- [17] 李向阳,刘传富,刁恩杰,等.大豆分离蛋白对面团特性及挂面品质的影响研究[J].*中国粮油学报*,2009,09:19-22
LI Xiang-yang, LIU Chuan-fu, DIAO En-jie, et al. Effects of soybean protein isolate on dough characteristics and dried noodle quality [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*,2009,09:19-22
- [18] Dhingra, S., Jood, S. Organoleptic and nutritional evaluation of wheat breads supplemented with soybean and barley flour [J]. *Food Chemistry*, 2002, 77(4): 479-488
- [19] 何雅蕾,白建民,王凤成,等.大豆分离蛋白粉对面团流变学特性和馒头品质的影响研究[J].*食品科技*,2010,3:144-148,163
HE Ya-qiang, BAI Jian-min, WANG Feng-cheng, et al. Study on the effects of soy protein isolate farina on physicochemical property of wheat flour dough and steamed bread [J]. *Food Science and Technology*, 2010, 3: 144-148,163
- [20] Doxastakis G, Zafiriadis I, Irakli M, et al. Lupin, soya and triticale addition to wheat flour doughs and their effect on rheological properties [J].*Food Chemistry*, 2002, 77: 219-227

- [21] 崔丽琴,崔素萍,马平,等.豆渣粉对面团特性及面团微观结构的影响[J].食品工业科技,2014,5:75-78,82
CUI Li-qin, CUI Su-ping, MA Ping, et al. Influence of soybean dregs powder to characteristics and microstructure of dough [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 5: 75-78,82
- [22] 王春娥,刘丽,韩婵娟.面粉黏度特性对面条品质的影响研究[A].第十四届国际谷物科技与面包大会暨国际油料与油脂发展论坛. 2012,3:513-515
WAN Chun-e, LIU Li, HAN Chan-juan. Book of Abstracts of 14th ICC Cereal and Bread Congress and Forum on Fats and Oils[C]. 2012, 3: 513-515
- [23] 孙旸,孙春玉,陈光.大豆蛋白与大豆肽对淀粉糊性能的影响[J].安徽农业科学,2010,17:9161-9162,9177
SUN Yang, SUN Chun-guang, CHEN Guang. Effect of Soybean Protein and Soybean Peptide on the Paste Property of Starch [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 17: 9161-9162,9177
- [24] 崔会娟,王璐,郭兴凤.大豆蛋白酶水解产物对面粉糊化特性的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2015,1: 40-44
CUI Hui-juan, WANG Lu, GUO Xing-feng. Effect of soy protein enzymatic hydrolyzates on the pasting properties of wheat flour [J]. Journal of Henan University of Technology(natural science edition), 2015, 1: 40-44
- [25] Assifaoui A, Champion D, Chiotelli E, et al. Characterization of water mobility in biscuit dough using a low-field ^1H NMR technique [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64(2): 197-204
- [26] Doona C J, Moo-Yeol Baik. Molecular mobility in model dough systems studied by time-domain nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(3): 257-262
- [27] 陈义勇,谢岩黎,王伟.大豆分离蛋白的添加对面团形成及稳定特性的影响[J].粮食加工,2007,1:66-68
CHEN Yi-yong, XIE Yan-li, WANG Wei. Application of granular cold-water swelling starch in microwave food [J]. Food Processing, 2007, 1: 66-68
- [28] Lamacchia C, Baiano A, Lamparelli S, et al. Study on the interactions between soy and semolina proteins during pasta making [J]. Food Research International, 2010, 43(4): 1049-1056