

亚麻籽粕对小麦面团特性的影响

杨波¹, 王晓彤^{1,2}, 周盛敏², 杨光¹

(1. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 丰益(上海)生物技术研发中心有限公司, 上海 200137)

摘要: 为探究亚麻籽粕作为配料粉的加工适用性, 以丰富传统发酵面制品的种类, 将冷榨亚麻籽粕按不同比例(5%~50%)与小麦粉复配, 分析其对小麦面团的热机械学、热力学、流变学、面筋含量及微观结构的影响。结果表明: 随亚麻籽粕添加量的增大, 面团吸水率增大, 回生值和面团的形成时间降低; 复配粉的糊化温度升高; 面团发酵的最大高度和产 CO₂ 总量下降, 气体保留率升高; 弹性模量和粘性模量先增大后减小; 面筋含量减少且有序结构略有降低, 面团网络结构连续性变差。当亚麻籽粕添加量在 5%~25% 之间时, 对小麦面团特性的影响较小, 而当添加量超过 25% 时, 小麦面团的特性严重劣变。综上, 为了保持面制品感官品质, 提高亚麻籽粕的利用率和面制品的营养价值, 亚麻籽粕的添加量不宜超过 25%。

关键词: 亚麻籽粕; 面团; 回生值; 流变特性; 网络结构

中图分类号: TS 210 文献标志码: A

Effects of flaxseed meal on the characteristics of wheat dough

YANG Bo¹, WANG Xiaotong^{1,2}, ZHOU Shengmin², YANG Guang¹

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Wilmar (Shanghai) Biotechnology Research & Development Center Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: To explore the utilization of flaxseed meal in traditional fermented flour products, the effects of cold-pressed flaxseed meal on the characteristics of wheat dough were evaluated. Thermal mechanics, thermodynamics, rheology, gluten content and microstructure of the wheat dough mixed with cold-pressed flaxseed meal were analyzed. The results show that water absorption of the dough is increased with the addition of cold-pressed flaxseed meal. Retrogradation of the wheat dough mixed with cold-pressed flaxseed meal is retarded compared with the whole wheat dough. The addition of cold-pressed flaxseed meal can reduce the formation time of the dough. The addition of cold-pressed flaxseed meal can improve the gelatinization temperature of the whole wheat flour. The maximum fermentation height and total CO₂ production of the dough mixed with cold-pressed flaxseed meal are decreased, while the gas retention rate is increased. The elastic and the viscous modulus of the mixed dough show an increase and decrease pattern with the increment of cold-pressed flaxseed meal. The gluten content and the ordered structure decrease slightly, and the continuity of dough network structure becomes worse. When

the addition of flaxseed meal is within the range of 5%~25%, the influence of flaxseed meal on the characteristics of wheat dough is small. However, when the addition of flaxseed meal is above 25%, significant quality deterioration of the dough is observed. In conclusion, the addition of flaxseed meal should be kept below 25% to maintain the sensory quality, and improve the application of flaxseed meal and the nutritional value of wheat flour products.

Keywords: flaxseed meal; dough; setback; rheological properties; network structure

亚麻籽含有丰富的脂肪、膳食纤维和蛋白质，同时富含多种生物活性化合物，它们对癌症、糖尿病和心血管疾病有一些潜在的保护作用，被用作天然健康产品^[1]。但是亚麻籽中还含有一些抗营养因子，如生氰糖苷。根据 FAO/WHO 食品添加剂联合专家委员会(JECFA)制定的氰化物健康指导值，熟制亚麻籽中的氰化物对一般人群健康风险极低，而且加热、微波和煮等加工处理方式可降解亚麻籽及制品中生氰糖苷的含量，增加其安全性^[2]。所以近年亚麻籽相关研究及市面上相关产品逐渐增多，例如：Liu 等^[3]研究了亚麻籽粉对小麦面团及馒头品质的影响，发现亚麻籽的添加降低了面粉的最终黏度、崩解值和回生值，但对面团的流变学特性影响不大；Codin 等^[4]研究了金黄色和棕色亚麻籽对面团流变学特性的影响，发现两种亚麻籽都改变了面团的流变特性；Koneva 等^[5]研究了亚麻籽复配粉的面团流变和面包特性，发现亚麻籽粉最佳添加量为 7.5%~10%。

亚麻籽粕是亚麻籽经过加工并提取油脂后的副产物，其中膳食纤维、蛋白质和生物活性物质都得到了大幅度的提高。亚麻籽粕在提高食品的营养价值方面具有巨大的潜力，同时其纤维素和亚麻蛋白发挥着持水性、乳化性及增稠等功能^[6]。虽然生氰糖苷含量也会随着油脂的提取而增加，但是本文采用部分脱脂的亚麻籽粕作为原料，生氰糖苷含量未得到明显提升，而且在原料制备、储存和产品生产的一系列熟制过程中生氰糖苷会分解，因此部分脱脂的亚麻籽粕仍具有较大的食用价值。

目前国内外学者对于亚麻籽的研究已有少许，但是对于亚麻籽粕的研究甚少，对小麦面团的流变学特性及发酵面制品的影响也尚不清楚。因此本文将冷榨亚麻籽粕添加到小麦粉中，分析其对小麦面团流变学特性及结构的影响，了解亚麻籽粕复合粉加工特性，以期在亚麻籽粕在传统

发酵面制品上的应用提供理论指导，从而提高亚麻籽粕附加值。

1 材料与方法

1.1 材料

单杆螺旋压榨机：香格牌；蓝金山高筋粉：益海嘉里(昆山)食品工业有限公司；白砂糖：太古糖业有限公司；食用盐：中盐长江盐化有限公司；耐高糖酵母：安琪酵母股份有限公司；冷榨亚麻籽粕：由丰益(上海)生物技术研发中心实验室自制。

1.2 仪器

多功能小型粉碎机：华布斯；和面机：德国 Diosna；醒发箱、电烤炉：新麦机械有限公司；Mixolab2 混合实验仪、F4 流变发酵仪：法国肖邦公司；Q2000 差示扫描量热仪：美国 TA 仪器；MCR101 流变仪：安东帕商贸有限公司；Nicolet is5 傅里叶变换红外光谱仪：Thermo Scientific；Q150T 镀膜系列：英国 QUORUM 公司；FEI Quanta 450 型扫描电子显微镜：美国 FEI 公司。

1.3 方法

1.3.1 亚麻籽粕粉及其复配粉的制备

亚麻籽粕粉的制备：挑选出品质较好的亚麻籽，称取筛选、除杂后的亚麻籽 200 g 缓慢匀速地倒入螺杆压榨机的进料口进行压榨提油，收集所得固形物为亚麻籽粕。将亚麻籽粕进行粉碎，而后过 20 目筛，得到亚麻籽粕粉，随后密封冷藏，备用。(脂肪 24%、蛋白质 33%、纤维素 34%)

亚麻籽粕复配粉的制备：分别将亚麻籽粕粉以 0%，5%，15%，25%，35% 和 50% 的比例与小麦粉复配(以复合粉总质量计算)，密封冷藏，备用。并以不添加亚麻籽粕的小麦粉为对照。

1.3.2 热机械学性能的测定

利用 Mixolab 混合实验仪，使用“Chopin+”

协议测定复配粉热机械学性能^[7]。

1.3.3 热力学特性的测定

称取样品 3~5 mg, 样品与超纯水按质量比 1:2 加入 DSC 坩埚中, 压盖密封。升温速率为 5 ℃/min, 扫描温度范围 15~140 ℃。

1.3.4 发酵流变特性的测定

向复配粉中加入 1.2% 酵母、1% 食盐及 5% 白砂糖(以复配粉总质量计算), 一起放入和面机中搅拌 11 min(慢速 4 min, 快速 3 min, 慢速 4 min)和成面团(加水量参照 Mixolab 混合实验仪测定结果)。

参考王杰琼等^[8]的方法, 使用 F4 流变发酵仪测定面团的发酵流变学特性。

1.3.5 动态流变特性的测定

100 g 复配粉与水混合和成面团, 用于动态流变学测试(加水量参照 Mixolab 测定结果)。

参考王杰琼等^[8]的方法, 根据线性粘弹性区测试确定频率扫描条件: 平板间距 2 mm, 直径 20 mm, 温度 25 ℃, 应变力 0.2%, 扫描频率 0.1~50 Hz。

1.3.6 湿面筋的测定

参考 GB/T 5506.1—2008《小麦和小麦粉 面筋含量》手洗法测定湿面筋^[9]。称取 10 g 样品于烧杯中, 用移液管逐滴加入 20 g/L 氯化钠溶液 7 ml, 不断搅拌形成面团。用氯化钠溶液不断冲洗直至洗涤面团的水无淀粉检出, 排水后称重, 即为湿面筋质量。

1.3.7 二级结构的测定

按上述方法将制备好的面筋进行真空冷冻干燥、粉碎, 取 2 mg 样品加入 200 mg KBr 研磨, 压片制样, 使用傅里叶红外光谱仪进行 4000~400 cm⁻¹ 波段扫描, 扫描次数 32 次, 分辨率为 4 cm⁻¹。利用 OMNIC 和 Origin 2019b 软件对酰胺 I 带进行处理, 计算分离峰的面积确定面筋的二级结构。

1.3.8 微观结构的测定

将不同配粉面团在-80 ℃ 的超低温冰箱中预冻 24 h 后, 真空冷冻干燥 48 h, 将冻干的样品切成 5 mm³ 的小块放在贴有双面导电胶的金属圆盘上进行离子溅射仪喷金, 置于扫描电子显微镜内分别在 500 和 1000 倍下进行观察, 使用扫描电子显微镜对样品微观结构进行拍摄。

1.3.9 数据处理

本实验指标除发酵流变学实验设 2 组重复以外, 其余均设 3 组平行, 采用 SPSS 25 软件对数据进行统计学分析, Origin 2019b 软件作图, 数据均以平均值±标准偏差来表示。

2 结果与分析

2.1 亚麻籽粕粉对小麦面团热机械学性能的影响

亚麻籽粕粉对小麦面团热机械学性能的影响如表 1 所示。其中: *M* 为亚麻籽粕粉的添加量占比, *C1-C2* 为弱化度; *C3-C4* 为黏度崩解值; *C5-C4* 为回生值; 不同字母 a~f 表示差异显著 ($P < 0.05$)。由表 1 可知, 小麦粉的吸水率为 65.35%, 亚麻籽粕添加后面团吸水率逐渐增大, 且随着添加量的增大, 呈逐渐上升的趋势(增加了 4.3%~22.7%)。上升的原因是因为亚麻籽粕中含有较多的纤维, 其中含有很多羟基能够与水相互作用, 从而增加了复配粉的吸水率^[10-11]。Liu 等^[3]研究了亚麻籽粉对小麦粉糊化性能、热机械学及微观结构的影响, 指出随着亚麻籽粉添加量的增大, 吸水率呈下降趋势(从 58.5% 下降到 56.9%), 推测原因可能是由于亚麻籽粒径较大和脂肪含量较高导致的。本文中的吸水率结果与 Liu 等研究结果相反, 造成这种现象的原因可能是因为亚麻籽粕中油脂含量减少、膳食纤维含量的升高导致的。亚

表 1 亚麻籽粕对小麦面团热机械学性能的影响

Tab.1 Effects of flaxseed meal on thermal mechanical properties of wheat dough

<i>M</i>	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	<i>C1-C2</i> /(N·m)	<i>C3-C4</i> /(N·m)	<i>C5-C4</i> /(N·m)
0%	65.35±0.57 ^a	9.50±0.17 ^c	10.40±0.11 ^d	0.59±0.00 ^b	0.16±0.01 ^b	0.81±0.01 ^d
5%	68.15±0.16 ^b	6.06±0.37 ^b	8.41±0.04 ^c	0.61±0.01 ^b	0.13±0.01 ^a	0.75±0.03 ^c
15%	72.00±0.00 ^c	4.18±0.25 ^a	6.44±0.33 ^b	0.65±0.03 ^b	0.23±0.01 ^c	0.52±0.01 ^b
25%	74.10±0.42 ^d	3.77±0.09 ^a	5.39±0.16 ^a	0.62±0.04 ^b	0.26±0.01 ^d	0.43±0.02 ^a
35%	74.40±0.28 ^c	3.85±0.11 ^a	6.03±0.28 ^{ab}	0.58±0.00 ^b	0.29±0.01 ^c	0.43±0.01 ^a
50%	80.20±0.28 ^f	3.50±0.49 ^a	8.38±0.84 ^c	0.48±0.04 ^a	0.31±0.01 ^c	0.39±0.02 ^a

麻籽粕在油脂、蛋白及膳食纤维含量上与亚麻籽有较大差异,同时采用的小麦粉也可能不同(一般馒头制作采用中筋小麦粉,本文采用高筋小麦粉),因此可能会对复配粉的流变学性质带来较大差异。

面团形成时间是在 30 ℃ 恒温搅拌形成最大扭矩(稠度)所用的时间,反映面筋的强度,形成时间越长,面筋越强。与对照相比,添加亚麻籽粕后的面团形成时间显著降低(降低了 36.2%~63.3%)。可能是因为亚麻籽粕粉的增多使得复配粉中小麦面筋蛋白被稀释(小麦面筋蛋白中主要含有醇溶蛋白和谷蛋白,能够与水形成网络结构),面筋网络结构遭到破坏^[7,12]。当亚麻籽粕添加量达 15% 以上时,复合面团的形成时间基本上不再改变,可能的原因是添加量为 15% 时由于面团中的多糖增多已经使面团稠度达到了最大值,所以随着添加量的增大不会改变形成时间。稳定时间反映面团的耐揉性,与其关系成正比^[13]。随着亚麻籽粕的加入,稳定时间整体呈先下降再上升的趋势,在 25% 添加量时用时最短(较对照降低了 48.2%)。减小的原因可能是亚麻籽粕的增多使复配粉中面筋蛋白减少,面筋蛋白不能形成连续的面筋结构导致耐揉性差^[14]。增大的原因可能是随着亚麻籽粕的继续加入,可溶性膳食纤维含量也在增多,搅拌时使得面团的黏度增大,混合仪将搅拌时的这些力也当成了面团的稳定性,所以亚麻籽粕继续增多,使得面团达到最大稠度的时间延长,从而稳定时间增大^[8]。在 25% 添加量内,虽然稳定时间变小耐揉性变差,但是可以通过缩小揉面时间来解决,同时减少了能量损耗。

弱化度 C1-C2 表示面团的耐破坏程度,弱化度大,面筋强度差,面团易流散,操作过程中不易成型^[15]。当亚麻籽粕添加量为 5%~35% 时,与对照相比,弱化度未出现显著性差异。当添加量达 50% 时,亚麻籽粕面团弱化度显著性降低,表明此添加量下的面团稳定性好。此结果与 Liu 等^[3]研究的结果不一致,这可能是因为 Liu 等使用的是亚麻籽,而本文使用的是经过部分脱脂后的亚麻籽粕。与亚麻籽相比,亚麻籽粕中油脂含量较低,可溶性膳食纤维含量更高,因此能够吸收更多的水分,使面团更紧实、不易被破坏。另一个原因可能是在含油较低的情况下,亚麻籽粕中的可溶性纤维更易与小麦中的面筋网络进行联结,

对面筋网络起到一定的修复作用,因此,在一定添加范围内面团的耐破坏程度没有显著性差异。

黏度崩解值 C3-C4 表示淀粉糊化热稳定性,其值越小,稳定性越强。与对照相比,随着亚麻籽粕添加量的增加,黏度崩解值呈先减小后上升的趋势。当添加量为 5% 时,面团黏度崩解值低于对照,说明少量添加亚麻籽粕对面团的热稳定性有利,超过一定添加量对热稳定性有不利影响。

回生值 C5-C4 反映产品的老化程度和货架期,其值越大,越容易老化^[7,10]。与对照相比,添加亚麻籽粕,回生值显著减小。亚麻籽粕含较多亚麻胶,能够较快与大量的自由水结合,使水分流动性减小,水分迁移速度慢从而降低回生值。同时亚麻籽粕中还含有许多不溶性纤维又能以非水合状态填补在淀粉粒四周,起到阻挡作用,抑制了淀粉的不可逆吸水又使淀粉重结晶能力减弱^[16]。当添加量大于 25% 时,继续增大添加量,回生值并未出现显著性变化。此结果可以用来预测亚麻籽粕能够延长相关面制品的货架期。

2.2 亚麻籽粕对小麦粉热力学特性的影响

亚麻籽粕的添加量对小麦粉热力学特性的影响如图 1 和表 2 所示。图 1 为小麦粉及亚麻籽粕复配粉的 DSC 曲线。第一个吸热峰出现在 57~77 ℃,主要由小麦淀粉糊化引起的;第二个吸热峰出现在 86~117 ℃,主要由淀粉-脂质复合物引起的^[17]。随着亚麻籽粕的加入,两个吸热峰都向右发生了偏移,说明糊化温度有升高趋势。

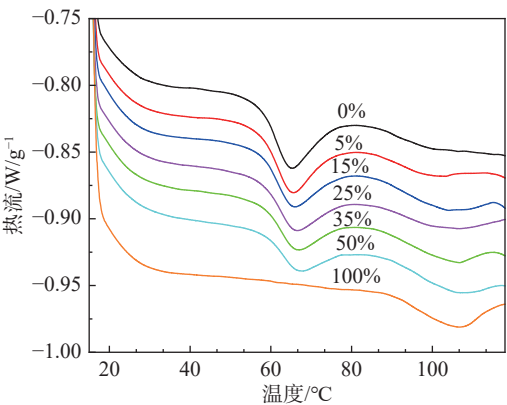


图 1 小麦粉及复配粉 DSC 曲线
Fig.1 DSC curves of wheat flour and mixed flour

由表 2 可知,小麦粉的第一个峰的起始糊化温度、峰值糊化温度、终止糊化温度和糊化焓值分别为 57.42, 65.11, 75.11 ℃ 和 5.878 J/g。亚麻籽粕的加入使复配粉的起始糊化温度、峰值糊化

表 2 亚麻籽粕对小麦粉热力学特性的影响

Tab.2 Effects of flaxseed meal on thermodynamic characteristics of wheat flour

	<i>M</i>	起始温度/ ℃	峰值温度/ ℃	终止温度/ ℃	热焓值/ (J·g ⁻¹)
峰 I	0%	57.42±0.40 ^a	65.11±0.17 ^a	75.11±0.18 ^a	5.878±0.013 ^f
	5%	57.50±0.20 ^a	65.43±0.26 ^{ab}	75.33±0.14 ^a	5.462±0.009 ^e
	15%	58.01±0.16 ^{ab}	65.94±0.09 ^{bc}	76.44±0.12 ^b	4.805±0.006 ^d
	25%	58.52±0.23 ^{bc}	66.23±0.33 ^{cd}	76.61±0.10 ^b	4.196±0.014 ^c
	35%	59.12±0.16 ^c	66.62±0.16 ^d	76.66±0.02 ^b	3.854±0.006 ^b
	50%	58.88±0.21 ^c	67.27±0.37 ^e	76.54±0.14 ^b	2.887±0.014 ^a
	100%				
峰 II	0%	86.68±0.03 ^a	97.83±0.16 ^a	108.58±0.12 ^a	0.778±0.008 ^a
	5%	86.46±0.16 ^a	98.16±0.11 ^b	112.81±0.12 ^b	1.061±0.004 ^b
	15%	87.01±0.06 ^b	103.70±0.04 ^c	115.47±0.10 ^d	2.265±0.004 ^c
	25%	87.88±0.19 ^c	103.76±0.06 ^c	117.23±0.06 ^e	2.658±0.009 ^f
	35%	88.28±0.01 ^d	105.75±0.23 ^d	114.38±0.11 ^c	2.301±0.017 ^d
	50%	89.55±0.13 ^e	105.66±0.15 ^d	117.04±0.06 ^e	2.496±0.024 ^e
	100%	90.97±0.23 ^f	106.08±0.08 ^e	117.09±0.04 ^e	4.274±0.012 ^g

温度和终止糊化温度升高,热焓值降低,可能是因为淀粉与可溶性纤维之间的氢键相互作用,降低淀粉分子链的移动性,从而导致淀粉糊化温度增加,延缓了糊化发生^[18];另一个原因可能是亚麻籽粕的加入使复配粉中亚麻蛋白质含量增加,此蛋白质易于包裹在淀粉颗粒表面,使淀粉糊化难度增加,糊化温度升高。此外,亚麻籽粕中的膳食纤维会与淀粉争夺水分,使淀粉与水的结合能力降低,导致热焓值降低^[19]。第二个吸热峰是淀粉-脂质复合物的解离峰,随着亚麻籽粕添加量的增大,起始糊化温度、峰值糊化温度、终止糊化温度均呈增大的趋势,且热焓值增加。这说明随着亚麻籽粕添加量的增大,破坏淀粉-脂质复合物需要更多的能量,复合物也更稳定^[17]。这可能是因为与小麦粉相比,亚麻籽粕中含有较多的脂肪,从而更易与小麦粉中的淀粉形成稳定的复合物。

2.3 亚麻籽粕对面团发酵流变学特性的影响

发酵过程中面团的最高高度 H_m 与面包的体积直接相关,它是评价面团样品烘焙性能的重要参数之一。亚麻籽粕对面团发酵流变学特性的影响如表 3 所示。由表 3 可知,添加亚麻籽粕后, H_m 整体呈减小趋势。与对照组相比,当添加量为

5% 时, H_m 与对照无显著差异,但添加量达 15% 及以上时, H_m 显著降低(降低了 26.3%~65.2%),可能是因为亚麻籽粕中含有大量膳食纤维与面筋蛋白竞争水,导致面筋蛋白中水分减少,面筋网络塌陷或者破坏面筋网络形成,从而导致 H_m 的下降^[12]。

表 3 亚麻籽粕对小麦面团发酵流变学特性的影响

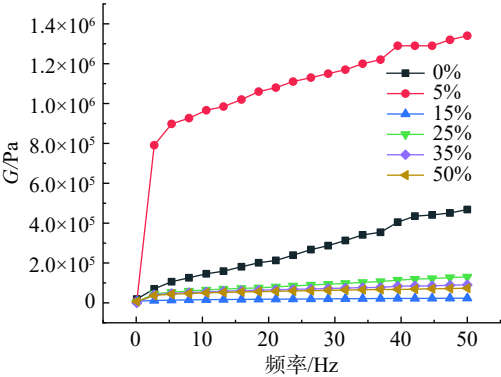
Tab.3 Effects of flaxseed meal on the rheological properties of wheat dough during fermentation

	<i>M</i>	H_m /mm	V_t /mL	V_f /mL	R /%
	0%	68.9±0.70 ^e	1 660±6.36 ^b	1 348±4.95 ^c	81.20±0.57 ^a
	5%	69.7±1.13 ^c	1 674±94.75 ^b	1 364±48.08 ^c	81.55±1.77 ^a
	15%	60.45±0.49 ^c	1 143±10.07 ^a	1 120±14.85 ^b	97.98±0.35 ^d
	25%	50.75±1.20 ^d	1 161±27.58 ^a	1 138±22.63 ^b	98.01±0.71 ^d
	35%	40.15±0.21 ^b	986±7.78 ^a	937±5.66 ^a	95.05±0.61 ^c
	50%	24.00±0.85 ^a	1 049±27.58 ^a	944±14.85 ^a	90.00±0.99 ^b

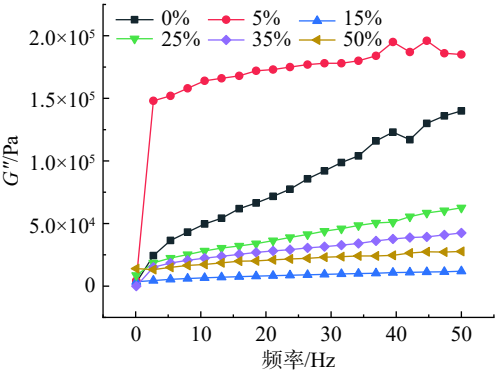
CO₂ 产气总量 V_t 直接反应酵母在面团中的产气能力。由表 3 可以看出,添加量达 15% 及以上时, V_t 显著低于对照组,并且随着添加量的增大, V_t 没有显著差异。这可能是亚麻籽粕中酵母能够利用的单糖较少,从而导致产气量减少^[20]。CO₂ 保留量 V_f 随着添加量的增加呈降低趋势,其中添加 25% 时较对照仅下降了 15.6%,当添加量为 35% 时, V_f 大幅度下降,下降了 30.4%。气体保留率 R 随着亚麻籽粕的添加呈先增大再减小的趋势,添加亚麻籽粕后, R 显著大于对照,当添加量为 25% 时, R 最大。王杰琼等^[8]指出面团中包裹气体的液膜破裂导致面团发酵后期气体的泄露,而不是淀粉-面筋基质的破裂导致的气体损失,亚麻籽粕中含有的一些蛋白、多糖和脂质可以稳定液膜,助于在气液表面形成一层脂质单膜,从而使持气性更好。虽然加了亚麻籽粕的面团发酵高度减小,但是持气性较好,烘焙时气体更不易溢出,从而可以推测最终产品的体积及比容与小麦产品相差较小。

2.4 亚麻籽粕对面团动态流变学特性的影响

面团的动态流变学特性与产品的加工特性、工艺及最终产品的品质等有关。弹性模量 G' 反映物质类固体性质,表征物料弹性;粘性模量 G'' 反映类液体性质,表征物料粘性。由图 2 可知,所有面团样品的 G' 与 G'' 均随频率增加而增加,且 $G'>G''$,说明所有复配面团的弹性特征比粘性特征



(a) 亚麻籽粕对 G' 的影响



(b) 亚麻籽粕对 G'' 的影响

图2 亚麻籽粕对小麦面团动态流变学特性的影响

Fig.2 Effects of flaxseed meal on dynamic rheological properties of wheat dough

突出，面团呈现弹性流体的性质^[8]。

与对照相比，添加量为5%时，面团 G' 和 G'' 都有显著增加。这可能是由于亚麻籽粕中多糖物质具有很强的结合能力，导致小麦面筋蛋白的聚集和巯基/二硫键交换，以及水胶体引起的新氢键的形成，从而最终增加了面筋网络的强度和混合面团的粘弹性^[18]。然而，较高的亚麻籽粕添加量对混合面团的粘弹性有负面影响。当添加量为15%及以上时， G' 和 G'' 也都较对照明显下降。可能由于不溶性纤维素、多糖及亚麻蛋白和面筋蛋白之间对水的竞争，导致延迟蛋白质水合和干扰三维网络的发展，有助于降低混合面团样品中的 G' 和 G'' ^[21-22]。

2.5 亚麻籽粕对面团湿面筋含量的影响

面筋是由麦谷蛋白和醇溶蛋白以一定比例经水合后形成的具有粘弹性的胶质。传统白面包的制作离不开面筋，一般高筋粉（湿面筋含量 $\geq 30\%$ ）用于制作面包^[23]。亚麻籽粕添加量对面团中湿面筋含量的影响如图3所示。随着亚麻籽粕添加量的增大，面团湿面筋的含量逐渐下降，说明亚麻籽粕粉对小麦粉中湿面筋有稀释作用，这与 Liu 等^[3]

的研究结果相似，亚麻籽粕的加入会降低湿面筋含量。亚麻籽粕粉中包含膳食纤维、油脂和亚麻蛋白等，其中不溶性纤维素会破坏面筋结构，而亚麻籽蛋白主要由球蛋白（58%~66%）和白蛋白（20%~42%）组成，醇溶蛋白和谷蛋白含量相对较低^[24]，进而导致湿面筋含量下降。与小麦粉湿面筋含量相比（37.85%），当添加量在15%时湿面筋含量为31.65%，较之下降了16.4%。当添加量在25%时，湿面筋含量为19.75%，与对照相比湿面筋含量大幅度下降，下降了47.8%。当亚麻籽粕添加量为35%时，其湿面筋含量仅为9%，此添加量下的混合粉已严重破坏面筋，不适用于面包的生产制作。

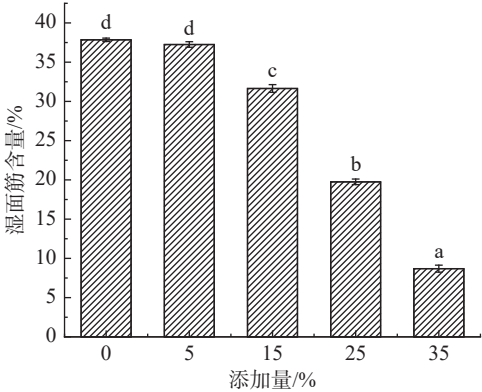


图3 亚麻籽粕对湿面筋含量的影响

Fig.3 Effects of flaxseed meal on wet gluten content

2.6 亚麻籽粕对面筋二级结构的影响

面团中面筋蛋白的二级结构反映小麦蛋白分子间的相互作用，它影响着面团的黏弹性，其中 α -螺旋和 β -折叠是面筋蛋白的有序二级结构，且 β -折叠被认为是最稳定的， β -转角和无规则卷曲是无序二级结构^[25]。其中酰胺 I 带中蛋白质二级结构有不同的吸收波数谱峰： β -折叠（1600~1640 cm^{-1} ）， α -螺旋（1650-1670 cm^{-1} ），无规则卷曲（1640-1650 cm^{-1} ）， β -转角（1670~1700 cm^{-1} ）^[26]。由图4可知， α -螺旋和 β -折叠有序结构在二阶结构中占比为47.7%~54.4%。与对照相比（53.3%），添加量在25%时，有序结构含量仅下降了6.9%；当添加量在35%时，较对照下降了10.5%。小麦蛋白二级结构中 α -螺旋结构是一个稳定牢固的弹性结构，主要影响面筋的弹性和硬度^[27]。所有面团面筋蛋白的 α -螺旋和无规则卷曲结构的含量随着添加量的增大而升高，其中 α -螺旋与对照相比（13.0%），增加率为11.9%~30.8%，说明亚麻籽粕

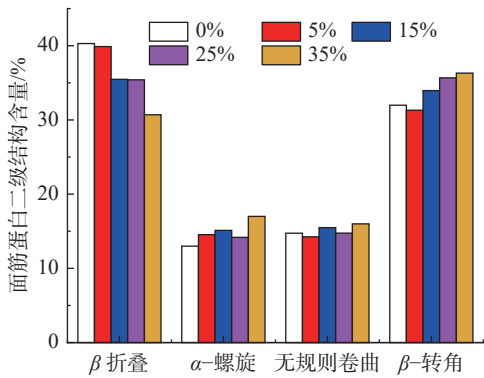


图 4 亚麻籽粕对面筋蛋白二级结构的影响

Fig. 4 Effects of flaxseed meal on secondary structure of gluten protein

的加入会增加面团的弹性和硬度。 β -折叠与面筋蛋白的黏性有关^[25]，与对照组相比， β -折叠结构含量随着添加量的增大呈逐渐减小的趋势。当添加量 15% 时， β -折叠结构含量与对照相比下降了 12.0%；添加量为 35% 时， β -折叠结构含量较对照下降了 23.8%。Wang 等^[27]认为面团中较强的氢键和弱的疏水作用力会使 β -折叠含量降低。随着亚麻籽粕添加量的增大，膳食纤维增加，对水更具亲和力，面筋蛋白可利用的水分减少，这有助于面筋蛋白亚基间形成氢键，从而使 β -折叠含量降低转化为 β -转角结构。 β -转角含量随着添加量的增大逐渐呈增大趋势，添加量为 35% 时， β -转角含量比对照增加了 13.5%。整体而言，亚麻籽粕粉的添加虽然稀释了面筋，但面筋的有序结构含量仅小幅度减小，对蛋白质质量影响较小。

2.7 亚麻籽粕对面团微观结构的影响

由图 5(a) 和图 5(c) 可知，小麦面团形成了连续的网络结构，具有明显的面筋骨架，小麦淀粉

颗粒包裹在其中，暴露在外面的淀粉颗粒很少，有利于形成连续的面筋网络。由图 5(b) 和图 5(d) 可知，添加亚麻籽粕后，面团面筋网络结构逐渐被破坏，面筋的连续性较差，原因可能是亚麻籽粕的添加阻碍了淀粉颗粒与小麦蛋白的融合，其填充到面筋网络中使结构变得疏松不连续，出现蛋白拉丝状和联结物。此现象与刘婷婷^[28]的亚麻籽-小麦混粉面团的微观结构中结果相似。虽然添加亚麻籽粕会导致面筋蛋白含量及面筋网络连续性下降，但是在 25% 添加量下仍能形成完整的网络结构。

3 结 论

亚麻籽粕的加入可以改变小麦粉的流变学性质及最终产品的品质，当亚麻籽粕加入量在 25% 以内时，对小麦面团的流变学特性影响较小，在较高添加量下 (25% 以上)，将对面团的流变学特性产生较大影响。当添加量为 25% 时，虽然流变学性质有所下降、筋力下降，但是仍能形成面筋网络，面筋蛋白二级结构质量与小麦面筋相当，面团持气性最好，回生值最低。综合考虑，25% 添加量不仅会增加产品的营养价值还会延长货架期，其仍具有加工适用性；当亚麻籽粕添加量超出 25% 时，面团特性严重劣变，不适于作为传统发酵面制品的配料粉。

参考文献：

[1] 祁惠芳, 程子良, 孔维宝, 等. 亚麻籽有效成分的提取及其综合利用研究进展 [J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 102–107.

[2] FAO, WHO. Safety evaluation of certain food additives and contaminants[R]. Geneva: WHO, 2012.

[3] LIU T T, DUAN H P, MAO X H, et al. Influence of flaxseed flour as a partial replacement for wheat flour on the characteristics of Chinese steamed bread[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(47): 28114–28120.

[4] CODINĂ G G, ARGHIRE C, RUSU M, et al. Influence of two varieties of flaxseed flour addition on wheat flour dough rheological properties[J]. *Annals of the University Dunarea de Jos of Galati*, 2017, 41(2): 115–126.

[5] KONEVA S, EGOROVA E, KOZUBAEVA L, et al. The effect of flaxseed flour on the rheological properties of dough made of flaxseed and wheat flour and bread quality[J]. *Food Processing: Techniques and Technology*,

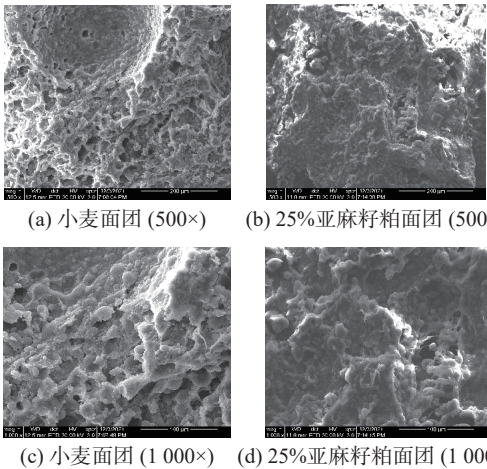


图 5 亚麻籽粕对面团微观结构的扫描电镜图

Fig. 5 SEM of flaxseed meal on the microstructure of dough

2019, 49(1): 85–96.

[6] WIRKIJOWSKA A, ZARZYCKI A, SOBOTA A, et al. The possibility of using by-products from the flaxseed industry for functional bread production[J]. *LWT*, 2020, 118: 108860.

[7] 郑万琴, 魏泉, 谢勇, 等. 超微粉碎薯渣纤维对小麦面团流变特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(8): 192–198.

[8] 王杰琼, 钱海峰, 王立, 等. 燕麦全粉对面团特性及馒头品质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(3): 42–49.

[9] GB/T 5506.1–2008 小麦和小麦粉 面筋含量 第 1 部分: 手洗法测定湿面筋 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[10] 罗登林, 赵影, 徐宝成, 等. 天然菊粉对面团发酵流变学和面包品质的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(6): 26–31.

[11] 尹旭敏, 刘月如, 杨茂, 等. 微细化薯渣粉对小麦面团特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(13): 190–195.

[12] HAN L H, ZHANG J J, CAO X H. Effects of orange peel powder on rheological properties of wheat dough and bread aging[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(2): 1061–1069.

[13] CODINĂ G G, ISTRATE A M, GONTARIU I, et al. Rheological properties of wheat–flaxseed composite flours assessed by Mixolab and their relation to quality features[J]. *Foods*, 2019, 8(8): 333.

[14] KOCA A F, ANIL M. Short communication: effect of flaxseed and wheat flour blends on dough rheology and bread quality[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(6): 1172–1175.

[15] 丁俊豪. 油莎豆粉对面团及馒头品质特性的影响研究 [D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2019: 21–35.

[16] 周韵, 高冉, 李建婷, 等. 苹果全粉对小麦粉加工性能及吐司面包品质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 161–167.

[17] 童姝. 糯米淀粉-脂质复合物的制备、结构表征及消化特性研究 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020.

[18] 黄鸿杰. 水胶体对馒头品质的影响及其相关机制的研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2019: 23–50.

[19] 张剑, 张杰, 李梦琴, 等. 绿豆配粉对面团特性及面条品质的影响 [J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(6): 10–15.

[20] 杨艺. 不溶性膳食纤维的添加对面包品质影响机制的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2019: 10–38.

[21] JIA F Y, MA Z, HU X Z. Controlling dough rheology and structural characteristics of chickpea-wheat composite flour-based noodles with different levels of *Artemisia sphaerocephala* Krasch. gum addition[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 150: 605–616.

[22] JIA F Y, MA Z, WANG X L, et al. Effect of Kansui addition on dough rheology and quality characteristics of chickpea-wheat composite flour-based noodles and the underlying mechanism[J]. *Food Chemistry*, 2019, 298: 125081.

[23] 徐小娟. 营养面包的开发及其品质提升的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

[24] 孙旦. 水相体系中亚麻籽蛋白质制备的机理、工艺及改性的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2020.

[25] 陈金凤, 张盛贵, 马云翔, 等. 马铃薯淀粉对低筋粉面团特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(10): 66–71.

[26] 岳苗. 马铃薯浆-小麦面粉复配面团特性及面条品质研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.

[27] WANG Q, LI Y, SUN F S, et al. Tannins improve dough mixing properties through affecting physicochemical and structural properties of wheat gluten proteins[J]. *Food Research International*, 2015, 69: 64–71.

[28] 刘婷婷. 亚麻籽馒头研制及其特性分析 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.

(编辑: 董 伟)