

# 六种膳食纤维的功能特性及其在面包中的应用

杨烁<sup>1</sup>, 赵秀杰<sup>1</sup>, 蔡勇建<sup>1</sup>, 邓欣伦<sup>2</sup>, 赵强忠<sup>1\*</sup>, 赵谋明<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 广东稳邦生物科技有限公司, 广东肇庆 526238)

**摘要:** 为探究膳食纤维对冷冻面团面包品质的影响, 对比分析了竹纤维、小麦纤维、甘蔗纤维、豌豆纤维、大豆纤维和可可纤维的理化和功能性质; 并测定了面包的烘焙特性, 分析纤维性质与面包烘焙特性间相关性。根据膳食纤维性质将其分为三类: 第一类为竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维, 其不溶性膳食纤维 (IDF) 和纤维素含量较高, 持水性、乳化性较强; 第二类为豌豆纤维和大豆纤维, 其半纤维素含量较高, 持水性、乳化性较弱; 第三类为可可纤维, 其木质素含量较高、但 IDF 含量低, 持水性、乳化性最弱。面包烘焙特性结果表明: 与空白对照组比较, 添加第一类纤维能明显提升面包烘焙特性, 其中添加甘蔗纤维的面包硬度降低 70.15 g, 感官评分提高 3.76, 面包品质改善效果最佳; 第二类纤维改良效果次之; 而添加第三类纤维后, 面包硬度提高 74.46 g, 感官评分降低 4.33, 对面包品质产生不利影响。相关性分析结果表明: 膳食纤维的 IDF 含量、持水性、乳化性与面包硬度、弹性和感官评分有显著相关性 ( $P < 0.05$ )。

**关键词:** 膳食纤维; 理化性质; 面包; 烘焙特性; 相关性分析

文章编号: 1673-9078(2024)06-189-197

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0633

## Functional Properties of Six Kinds of Dietary Fibers and Their Applications in Bread

YANG Shuo<sup>1</sup>, ZHAO Xiujie<sup>1</sup>, CAI Yongjian<sup>1</sup>, DENG Xinlun<sup>2</sup>, ZHAO Qiangzhong<sup>1\*</sup>, ZHAO Mouming<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Guangdong Wen Bang Biotechnology Co. Ltd., Zhaoqing 526238, China)

**Abstract:** The physiochemical and functional properties of bamboo fiber, wheat fiber, sugarcane fiber, pea fiber, soybean fiber, and cocoa fiber were compared and analyzed to investigate the effects of dietary fibers on the quality of frozen dough bread. The baking characteristics of frozen dough bread and its correlation with the properties of dietary fiber were determined. The dietary fibers were divided into three categories based on their properties. The first category included bamboo fiber, wheat fiber and sugarcane fiber, which had higher contents of insoluble dietary fiber (IDF) and cellulose, higher water-holding capacity and emulsifying capacity. The second category included pea fiber and soybean fiber, which had a higher hemicellulose content, and weaker water-holding and emulsifying capacities. The third category included cocoa fiber, which had a higher lignin content and lower IDF content while exhibiting the weakest water-holding and emulsifying capacities. The results of the baking characteristics showed that compared with the blank control group, the addition of a first-category

引文格式:

杨烁, 赵秀杰, 蔡勇建, 等. 六种膳食纤维的功能特性及其在面包中的应用[J]. 现代食品科技, 2024, 40(6): 189-197.

YANG Shuo, ZHAO Xiujie, CAI Yongjian, et al. Functional properties of six kinds of dietary fibers and their applications in bread [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 189-197.

收稿日期: 2023-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32072148; 32101866); 广东省重点领域研发计划项目 (2020B020226010)

作者简介: 杨烁 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品配料加工技术, E-mail: sureyang23@163.com

通讯作者: 赵强忠 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品配料加工技术, E-mail: qz Zhao@scut.edu.cn

fiber could significantly improve the bread baking quality, with the firmness of the sugarcane fiber-bread decreasing by 70.15 g, and the associated sensory score increasing by 3.76, indicating the greatest improvement of bread quality. The improvement induced by the second-category dietary fibers came second. After the third-category fiber was added, the firmness of the resulting bread increased by 74.46 g, and the associated sensory score decreased by 4.33, suggesting a negative effect on the bread quality. The correlation analysis results showed that the IDF content, water-holding capacity, and emulsifying capacity are all significantly correlated with bread's firmness, elasticity, and sensory score ( $P < 0.05$ ).

**Key words:** dietary fiber; physicochemical properties; bread; baking quality; correlation analysis

烘焙食品的保质期较短, 储存过程中易变质<sup>[1]</sup>。冷冻面团技术能有效延长烘焙食品储存期、降低成本, 是近年来食品工业领域的研究热点<sup>[2]</sup>。然而在实际生产过程中, 冷冻会使面包品质发生劣变, 存在面团发酵时间延长、面包比容减小及质地、口感变差等问题<sup>[3]</sup>。研究表明, 在冻藏过程中, 面团内水分遇冷形成冰晶, 冰晶的增长与重结晶会破坏面筋网络结构, 延长面包发酵时间、减小面包比容<sup>[4]</sup>。为了解决上述问题, 乳化剂、酶制剂和亲水胶体等改良剂被用于改善冷冻面团面包品质<sup>[5]</sup>。其中亲水胶体的水合能力较强, 能有效结合面团中的水分, 提高面团持气性, 从而增大面包比容、减小面包硬度、改善面包烘焙品质<sup>[6]</sup>。

膳食纤维作为人体的七大营养素之一, 人体摄入后可以降低患心血管疾病、直肠癌和糖尿病等疾病的风险<sup>[7]</sup>。根据溶解度不同, 膳食纤维可分为不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF) 和可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF), 其中 IDF 主要由纤维素、半纤维素和木质素等组成, 其结构中丰富的亲水基团使其具有较强的持水能力, 而 SDF 中果胶等物质赋予其较好的增稠性<sup>[8]</sup>。由于膳食纤维良好的水合特性和增稠性, 其被广泛应用于肉制品、面制品和乳制品等食品中<sup>[9]</sup>。膳食纤维具有一定的凝胶和乳化特性, 在面包中添加膳食纤维可改善产品的质构及感官特性, 提高产品的营养价值<sup>[10]</sup>。美合日班·马木提等<sup>[11]</sup>研究发现添加 4% 黑木耳不溶性膳食纤维后, 面包的感官品质、营养成分和质构特性均明显提高。

膳食纤维水合能力强、加工性能好, 添加适量纤维进入冷冻面团后, 可与水分作用, 减少冰晶对面团的冷冻损坏, 也可与面筋蛋白相互作用, 在面团中形成交织的网状结构, 增强面团稳定性, 过量纤维添加后, 会稀释面筋网络结构, 对面包烘焙品质产生负面影响<sup>[12]</sup>。Xie 等<sup>[13]</sup>研究发现添加 1% 桑叶多糖后, 冷冻面团面包比容明显增大。Adams

等<sup>[14]</sup>研究发现添加 15% 麦麸不溶性膳食纤维后, 冷冻面团面包硬度增大、比容减小。这些研究为膳食纤维在冷冻面制品中的应用奠定了基础。目前, 市售膳食纤维主要来源于谷物、豆类、果蔬等食品原料加工的副产物, 不同来源膳食纤维的纤维素组成、结晶度和微观结构等理化特性存在明显差异, 因而其持水持油性、吸附性等特性也明显不同, 而功能特性的改变会对产品品质产生直接影响<sup>[8]</sup>。研究表明, 谷物来源膳食纤维中富含纤维素、 $\beta$ -葡聚糖等成分, 纤维的溶胀度更大, 而果蔬膳食纤维含有较多半纤维素和果胶, 纤维凝胶性更强, 易被肠道菌群利用<sup>[15]</sup>。然而, 关于不同来源膳食纤维的功能特性与冷冻面团面包烘焙品质之间的研究仍非常有限。

因此, 本研究选取了六种来源于谷物、豆类、糖类和饮料作物的商业膳食纤维, 对比分析了其理化和功能性质, 并将其添加入冷冻面团中, 通过测定面包的比容、质构及感官性质优选出改良效果佳的膳食纤维, 结合相关性分析方法, 探究膳食纤维的功能特性与冷冻面团面包烘焙特性间的相关性, 为膳食纤维在冷冻面团面包中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

竹纤维、小麦纤维、甘蔗纤维、豌豆纤维和可可纤维, 广东华恭生物科技有限公司; 大豆纤维, 山东禹王生态食业有限公司; 高筋面粉, 河南新乡良润全谷物食品有限公司; 安佳黄油, 新西兰恒天然集团; 半干酵母, 湖北安琪酵母股份有限公司; 大豆油、食盐、白糖, 本地超市; 十二烷基磺酸钠 (Soudium Dodecyl Sulfate, SDS)、硫酸、盐酸和氢氧化钠 (均为分析纯), 广州精科玻仪器公司。

## 1.2 仪器与设备

KDN-103F 定氮仪, 上海纤检仪器有限公司; FO410C 马弗炉, 日本 Yamato 公司; X'pert Powder 多位自动进样 X 射线衍射仪, 英国 Malvern Panalytical 公司; MSX2-H 光学显微镜, 日本 Olympus 公司; SM-200T 和面机, 中国新麦机械有限公司; FJX-13 发酵箱, 广东德玛仕智能厨房设备有限公司; LC-KS101 烤箱, 广东乐创电器有限公司; TA-XT 物性测定仪, 英国 Stable Micro Systems 公司。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 膳食纤维理化性质测定

#### 1.3.1.1 膳食纤维的基本成分分析

参照 GB5009.88-2014《食品安全国家标准食品中膳食纤维的测定》, 采用酶-重量法测定总膳食纤维 (Total Dietary Fiber, TDF)、SDF、IDF 含量; 参照 GB5009.5-2016《食品安全国家标准》, 采用凯氏定氮法测定蛋白质含量; 参照 GB5009.4-2016《食品安全国家标准食品中灰分的测定》, 采用直接灰化法测定灰分含量; 参照李依娜等<sup>[16]</sup>的方法测定还原糖含量; 参照 Bartos 等<sup>[17]</sup>的方法采用范式洗涤法测定纤维素、半纤维素及木质素含量。

#### 1.3.1.2 X 射线衍射

参照杨艺等<sup>[18]</sup>的方法并稍作修改, 采用步进扫描法测定膳食纤维的 X 射线衍射图。测定参数为: Cu-K $\alpha$  靶; 扫描步长: 0.013°; 扫描速率: 12°/min; 扫描范围: 10°~40°; 工作电压: 40 kV; 工作电流: 40 mA, 进行数据采集。通过 Origin 分析 X 射线衍射图, 并根据公式 (1) 计算膳食纤维的结晶度:

$$D = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$D$ —膳食纤维的结晶度 (CD), %;

$S_1$ —结晶度面积 (SC);

$S_2$ —无定形区面积 (SA)。

#### 1.3.1.3 膳食纤维的微观形态

利用光学显微镜观察膳食纤维的微观形态。用去离子水将膳食纤维配制为 4.00 mg/mL 的分散液, 吸取 10  $\mu$ L 分散液置于载玻片上, 放大倍数 100 倍 (目镜 10 倍, 物镜 10 倍)。

### 1.3.2 膳食纤维功能性质测定

#### 1.3.2.1 持水性、持油性与溶胀度

参照王金鸽等<sup>[19]</sup>的方法并稍作修改, 测定膳食

纤维的持水性和持油性。称量 10 mL 离心管质量 ( $W_0$ ), 将 0.25 g 膳食纤维样品 ( $W_1$ ) 置于离心管中并加入 5 mL 去离子水或大豆油, 涡旋仪混合均匀后, 在室温条件下静置 1 h, 以 4 000 r/min 离心 20 min 后, 倒去上层清液或未吸附的大豆油, 称重记录质量 ( $W_2$ )。根据公式 (2) 计算膳食纤维的持水性、持油性:

$$H = \frac{W_2 - W_1 - W_0}{W_1} \quad (2)$$

式中:

$H$ —持水性 (WHC) 或持油性 (OHC), g/g;

$W_0$ —离心管质量, g;

$W_1$ —膳食纤维质量, g;

$W_2$ —倒去上层清液或未吸附的大豆油后离心管及膳食纤维质量, g。

#### 1.3.2.2 乳化性及乳化稳定性

参照王金鸽等<sup>[19]</sup>的方法并稍作修改, 测定膳食纤维的乳化性和乳化稳定性。将膳食纤维配制为 1.00 mg/mL 的分散液, 取 30 mL 分散液与 10 mL 大豆油在 10 000 r/min 下高速剪切 2 min, 立即取 200  $\mu$ L 底层乳状液体添加至 10 mL 的 0.10% ( $m/V$ ) 十二烷基硫酸钠溶液中, 混合均匀后, 用紫外分光光度计于 500 nm 处测定其吸光值  $A_0$  (0.10% SDS 溶液作为空白对照), 将乳状液静置 30 min 后重新取样, 测定其吸光值  $A_{30}$ 。根据公式 (3) 和公式 (4) 分别计算膳食纤维的乳化性、乳化稳定性:

$$E_1 = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{C \times \varphi \times 1000} \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{A_0 \times 30}{A_0 - A_{30}} \quad (4)$$

式中:

$E_1$ —乳化性 (EAI),  $m^2/g$ ;

$E_2$ —乳化稳定性 (ESI), min;

$N$ —稀释倍数, 200;

$A_0$ —乳状液放置 0 min 后在 500 nm 的吸光值;

$A_{30}$ —乳状液放置 30 min 后在 500 nm 的吸光值;

$C$ —膳食纤维分散液中的纤维浓度, 1.00 mg/mL;

$\varphi$ —乳状液中油相体积分数, 25%。

### 1.3.3 膳食纤维对冷冻面团面包烘焙特性的影响

#### 1.3.3.1 面包的制作配方及工艺

将 1 000 g 高筋面粉、180 g 糖、10 g 盐、10 g 酵母和 1 g 膳食纤维用和面机以 1 档速度均匀混合 1 min 后, 加入适量去离子水, 以 2 档速度混



合 2.2 min, 加入 60 g 软化好的黄油, 继续以 2 档速度搅打 2.4 min 后, 结束和面。面团在室温下松弛 7 min 后, 将其均匀分割为每个 140 g, 搓圆、整形后用保鲜膜包裹并立即置于 -18 °C 冰箱冷冻储存 0 d、60 d。冻藏后的面团置于长方体模具中 (15.1 cm×6.7 cm×6.6 cm), 于 4 °C 冰箱解冻 12 h, 放入发酵箱内醒发, 醒发温度为 35 °C, 相对湿度为 80%, 醒发至面团高度与模具平齐。将醒发好的面团置于已预热好的烤箱中, 上火 145 °C, 下火 170 °C, 烘烤 28 min 后趁热脱模、冷却、封装。

### 1.3.3.2 面包比容的测定

参照 GB/T 20981-2007 方法, 测定面包比容。称量面包质量  $M$  (g), 采用小米置换法读取小米体积  $V$  (mL), 根据公式 (5) 计算面包比容:

$$B = \frac{V}{M} \quad (5)$$

式中:

$B$ ——面包比容, g/mL;

$V$ ——面包体积, mL;

$M$ ——面包质量, g。

### 1.3.3.3 面包硬度、弹性的测定

参照赵强忠等<sup>[20]</sup>的方法并稍作修改, 测定面包的硬度和弹性。将面包切为 25 mm 厚的薄片, 采用 TPA 模式进行测定, 每个实验重复测定 6 次。测前速度为 1 mm/s, 测中、测后速度为 2 mm/s, 测定探头为 P 36/R, 测定模式为应变模式, 应变值为 50%。

### 1.3.3.4 面包的感官性质测定

参照 GB/T 20981-2007 方法, 由 10 名专业人士组成的感官评定小组对面包的感官性质进行评定。

## 1.4 数据的处理及分析

每个实验至少重复 3 次, 结果以“平均值 ± 标准偏差”表示。采用 IBM SPSS Statistics 26 对

实验数据进行单因素方差分析 ( $P < 0.05$ ), 采用 Pearson 相关系数进行相关性分析, 使用 Origin 2021 绘制图表。

## 2 结果与讨论

### 2.1 六种膳食纤维的理化性质

#### 2.1.1 六种膳食纤维的基本组成

六种膳食纤维的基本组成如表 1 所示。由表 1 可知, 竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维的 TDF 含量最高, 分别为 96.36%、95.45% 和 98.25%, 三种纤维内均未检出 SDF 和蛋白质, 其还原糖和灰分含量相对较少; 豌豆纤维和大豆纤维的 TDF 含量分别为 82.41% 和 73.91%, 大豆纤维的 SDF 含量较高为 3.34%, 两种纤维的蛋白质含量均较高, 分别为 4.53% 和 9.09%; 可可纤维与其它纤维的基本组成差异较大, 其 TDF 含量最低为 61.09%, SDF、蛋白质、还原糖及灰分含量分别为 12.94%、19.74%、7.05% 和 8.51%, 均显著高于其他纤维 ( $P < 0.05$ )。以上结果与杨艺等<sup>[17]</sup>报道的大豆纤维、豌豆纤维、小麦纤维和 Lecumberri 等<sup>[21]</sup>报道的可可纤维的基本组成一致。

进一步对不溶性膳食纤维组成进行测定, 如图 1 所示。由图 1 可知, 除可可纤维外, 其余五种膳食纤维的主要纤维组成均为纤维素和半纤维素, 其中, 竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维的纤维组成较为相似, 纤维素和半纤维素含量相近, 分别为 81.58%~82.89% 和 13.53%~17.11%。豌豆纤维和大豆纤维的半纤维素含量相对较高, 分别为 46.84% 和 36.51%。木质素仅在可可纤维内被检出, 含量为 20.13%。可可纤维的纤维素、半纤维素含量均显著低于其他纤维 ( $P < 0.05$ ), 分别为 19.34% 和 6.58%。

表 1 六种膳食纤维的基本组成 (%)

Table 1 Chemical composition of six dietary fibers

膳食纤维种类	TDF	IDF	SDF	蛋白质	还原糖	总灰分
竹纤维	96.36 ± 1.80 <sup>a</sup>	96.36 ± 1.80 <sup>a</sup>	—	—	2.43 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.13 ± 0.15 <sup>d</sup>
小麦纤维	95.45 ± 1.44 <sup>a</sup>	95.45 ± 1.44 <sup>ab</sup>	—	—	3.09 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.18 ± 0.03 <sup>d</sup>
甘蔗纤维	98.25 ± 1.00 <sup>a</sup>	98.25 ± 1.00 <sup>a</sup>	—	—	3.33 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.04 <sup>d</sup>
豌豆纤维	82.41 ± 1.05 <sup>b</sup>	82.41 ± 1.05 <sup>b</sup>	—	4.53 ± 0.03 <sup>c</sup>	2.19 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.91 ± 0.08 <sup>c</sup>
大豆纤维	73.91 ± 1.81 <sup>c</sup>	70.57 ± 1.77 <sup>c</sup>	3.34 ± 0.04 <sup>b</sup>	9.09 ± 0.12 <sup>b</sup>	2.33 ± 0.02 <sup>b</sup>	3.49 ± 0.06 <sup>b</sup>
可可纤维	61.09 ± 2.62 <sup>d</sup>	48.15 ± 2.20 <sup>d</sup>	12.94 ± 0.42 <sup>a</sup>	19.74 ± 1.85 <sup>a</sup>	7.05 ± 0.01 <sup>c</sup>	8.51 ± 0.03 <sup>a</sup>

注: 同列右肩不同的小写字母表示不同样品具有显著差异 ( $P < 0.05$ ); —代表未检出。

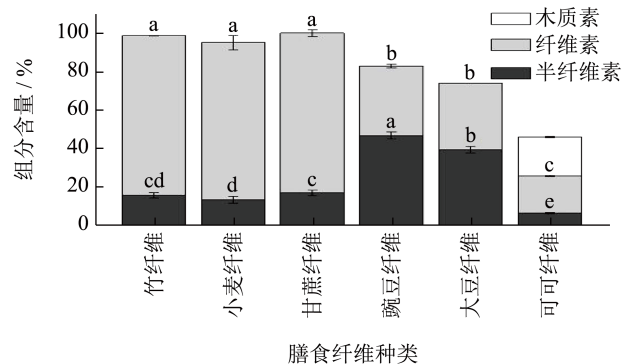


图1 不溶性膳食纤维组成

Fig.1 Composition of insoluble dietary fiber

注：不同的小写字母表示不同样品具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

### 2.1.2 六种膳食纤维的结晶构型分析

图2为不同膳食纤维的X射线衍射图谱及结晶度。由图2可知，六种纤维在 $2\theta$ 为 $16.0^\circ$ 和 $22.4^\circ$ 左右处有明显的结晶衍射峰，同时在 $34.6^\circ$ 左右处出现较弱的衍射峰，属于典型的纤维素I型晶体构型。其中，竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维显示出相对更尖锐的强衍射结晶峰，在 $2\theta$ 为 $22.4^\circ$ 处的衍射峰值明显高于在 $16.0^\circ$ 处的衍射峰值；而豌豆纤维、大豆纤维和可可纤维的衍射峰型相对平缓、峰宽更大，衍射峰值相对较低。对比分析不同纤维结晶度发现，竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维的结晶度相对较高，分别为62.53%、60.87%和58.20%，而豌豆纤维和大豆纤维的结晶度则明显较低，为28.15%和25.80%，可可纤维的结晶度最低为23.57%。

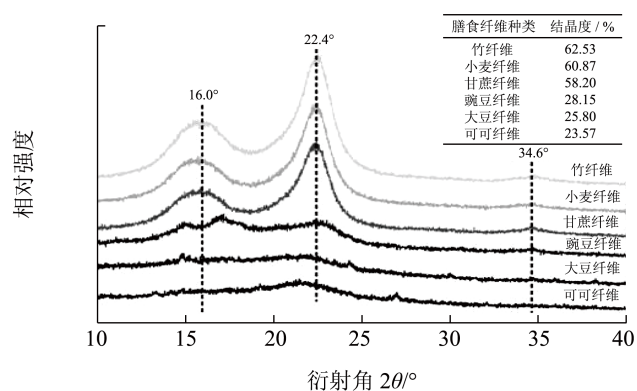


图2 六种膳食纤维的X射线衍射图谱及结晶度

Fig.2 XRD patterns and crystallinities of six dietary fibers

### 2.1.3 六种膳食纤维的微观形态

图3为不同膳食纤维的微观形态。由图3可知，六种膳食纤维的微观形态存在明显差异，其中，竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维的形态较为相似，均为

长而纤细的丝状结构，部分纤维丝紧密缠绕在一起，纤维的长径比较高。而豌豆纤维和 大豆纤维均为不规则块状结构，颗粒较大，表面结构疏松、粗糙。可可纤维的颗粒最小，呈不规则的碎块状。除可可纤维外，其它几种膳食纤维在显微镜下均透明无色，而可可纤维呈棕褐色碎块状结构。

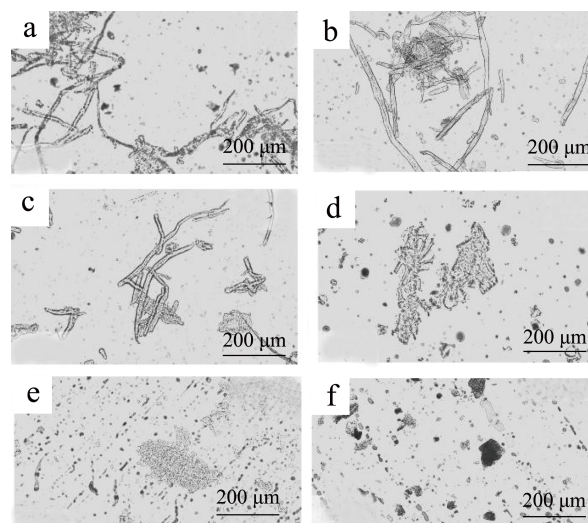


图3 六种膳食纤维的微观形态

Fig.3 Micromorphology of six dietary fibers

注：a~f分别代表竹纤维、小麦纤维、甘蔗纤维、豌豆纤维、大豆纤维和可可纤维。

综上所述，竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维的不溶性膳食纤维、纤维素含量较高，纤维结晶度较高，且纤维长径比较高；豌豆纤维和 大豆纤维的不溶性膳食纤维含量较低、半纤维素含量较高、结晶度较低，纤维呈不规则的块状结构；可可纤维的可溶性膳食纤维和木质素含量较高、结晶度最低，纤维颗粒较小，呈不规则碎块状。具有不同理化特性的膳食纤维对其功能性质有重要影响，因此进一步对六种膳食纤维的持水/持油性和乳化性等进行研究。

### 2.2 六种膳食纤维的功能性质

表2为六种膳食纤维的功能性质。由表2可知，竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维的持水性和持油性均较高，分别为9.93~13.23 g/g和8.50~15.90 g/g，三种纤维的溶胀度较大，为4.57~6.67 mL/g，乳化性和乳化稳定性较强，分别为201.8~219.7 m<sup>2</sup>/g和158.0~219.8 min；豌豆纤维和 大豆纤维的持水/持油性相对较低，乳化性和乳化稳定性相对较弱；而可可纤维的持水/持油性和溶胀度均最低，分别为5.00 g/g、4.13 g/g和2.67 mL/g，乳化性和乳化稳定性最弱，分别为125.7 m<sup>2</sup>/g和124.4 min。

综合对比六种膳食纤维的理化、功能性质,可大致将其分为三类:竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维为第一类,豌豆纤维和大豆纤维为第二类,可可纤维为第三类。

第一类纤维持水/持油性较高、溶胀度大,这主要归因于其较高的纤维素含量,赋予其丰富的亲水基团;同时由于其长径比较高、结构疏松多孔,有利于羟基基团的充分暴露、以及对水分和油脂的吸附和截留<sup>[22-25]</sup>;此外,此类纤维结晶度较高,纤维素链的结晶结构赋予其疏水性边缘平面,从而提高了纤维与油脂的相互作用<sup>[26,27]</sup>;此类纤维的乳化性和乳化稳定性较强,可能与其较高的持水/持油性有关,纤维对油滴较强的束缚能力可有效防止油滴聚结、提高乳化稳定性<sup>[28]</sup>。第二类纤维持水/持油性、溶胀度相对较低,相应地,其乳化性和乳化稳定性均较弱。第三类纤维持水/持油性

均最低、溶胀度最小,这可能与其最低的结晶度和纤维素含量有关,同时纤维结构紧密,形态呈碎块状,不利于其对水分和油脂的吸附,相应地,其乳化性和乳化稳定性最弱。膳食纤维的理化、功能性质可能影响其在冷冻面团体系中的相互作用,因此,进一步对比分析不同膳食纤维对新鲜和冷冻面团面包烘焙特性的影响。

### 2.3 六种膳食纤维对冷冻面团面包烘焙特性的影响

表3为六种膳食纤维对冷冻面团面包烘焙特性的影响。由表3可知,冻藏60 d后,空白对照组面包硬度由398.81 g增大至819.33 g,面包的弹性由0.94下降至0.88,比容由4.41 mL/g减小至3.94 mL/g,感官评分由81.03下降至64.39,这说明冻藏处理对面包的烘焙特性产生了不利影响。

表2 六种膳食纤维的功能性质  
Table 2 Functional properties of six dietary fibers

膳食纤维种类	持水性/(g/g)	持油性/(g/g)	溶胀度/(mL/g)	乳化性/(m <sup>2</sup> /g)	乳化稳定性/min
竹纤维	11.67 ± 0.17 <sup>b</sup>	13.07 ± 0.12 <sup>b</sup>	4.57 ± 0.17 <sup>c</sup>	208.8 ± 0.4 <sup>b</sup>	185.5 ± 3.8 <sup>b</sup>
小麦纤维	9.93 ± 1.10 <sup>c</sup>	8.50 ± 1.22 <sup>c</sup>	4.60 ± 0.14 <sup>c</sup>	201.8 ± 4.9 <sup>c</sup>	158.0 ± 1.0 <sup>c</sup>
甘蔗纤维	13.23 ± 0.17 <sup>a</sup>	15.90 ± 0.70 <sup>a</sup>	6.67 ± 0.34 <sup>a</sup>	219.7 ± 0.6 <sup>a</sup>	219.8 ± 7.8 <sup>a</sup>
豌豆纤维	7.63 ± 0.24 <sup>d</sup>	4.37 ± 0.61 <sup>d</sup>	4.00 ± 0.12 <sup>d</sup>	167.4 ± 0.6 <sup>c</sup>	146.2 ± 2.1 <sup>d</sup>
大豆纤维	7.23 ± 0.30 <sup>d</sup>	8.50 ± 0.15 <sup>c</sup>	5.53 ± 0.94 <sup>b</sup>	176.5 ± 3.6 <sup>d</sup>	132.8 ± 6.8 <sup>c</sup>
可可纤维	5.00 ± 0.08 <sup>c</sup>	4.13 ± 0.21 <sup>d</sup>	2.67 ± 0.50 <sup>c</sup>	125.7 ± 5.8 <sup>f</sup>	124.4 ± 6.3 <sup>f</sup>

注:同列右肩不同的小写字母表示不同样品具有显著差异( $P < 0.05$ )。

表3 六种膳食纤维对冷冻面团面包烘焙特性的影响

Table 3 Effects of six dietary fibers on the baking quality of frozen dough bread

冻藏时间/d	膳食纤维种类	硬度/g	弹性	比容/(mL/g)	感官评分/分
0	空白对照	398.81 ± 8.13 <sup>b</sup>	0.94 ± 0.00 <sup>b</sup>	4.41 ± 0.12 <sup>c</sup>	81.03 ± 0.14 <sup>d</sup>
	竹纤维	372.04 ± 20.02 <sup>bc</sup>	0.95 ± 0.01 <sup>ab</sup>	4.68 ± 0.01 <sup>b</sup>	82.77 ± 0.28 <sup>b</sup>
	小麦纤维	397.53 ± 23.01 <sup>b</sup>	0.95 ± 0.01 <sup>ab</sup>	4.43 ± 0.05 <sup>c</sup>	82.32 ± 0.30 <sup>b</sup>
	甘蔗纤维	353.02 ± 27.74 <sup>c</sup>	0.96 ± 0.00 <sup>a</sup>	4.84 ± 0.04 <sup>a</sup>	83.53 ± 0.33 <sup>a</sup>
	豌豆纤维	399.69 ± 29.01 <sup>b</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>b</sup>	4.42 ± 0.10 <sup>c</sup>	81.73 ± 0.09 <sup>c</sup>
	大豆纤维	408.32 ± 20.37 <sup>b</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>b</sup>	4.41 ± 0.02 <sup>c</sup>	81.53 ± 0.22 <sup>cd</sup>
	可可纤维	568.61 ± 24.88 <sup>a</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>c</sup>	4.23 ± 0.05 <sup>d</sup>	74.25 ± 1.70 <sup>e</sup>
60	空白对照	819.33 ± 3.30 <sup>b</sup>	0.88 ± 0.01 <sup>b</sup>	3.94 ± 0.01 <sup>e</sup>	64.39 ± 0.14 <sup>e</sup>
	竹纤维	775.43 ± 1.06 <sup>f</sup>	0.90 ± 0.01 <sup>a</sup>	4.10 ± 0.03 <sup>b</sup>	66.22 ± 0.10 <sup>b</sup>
	小麦纤维	784.95 ± 4.40 <sup>c</sup>	0.89 ± 0.01 <sup>ab</sup>	4.03 ± 0.05 <sup>c</sup>	65.80 ± 0.08 <sup>c</sup>
	甘蔗纤维	749.18 ± 3.21 <sup>e</sup>	0.91 ± 0.00 <sup>a</sup>	4.18 ± 0.02 <sup>a</sup>	68.15 ± 0.14 <sup>a</sup>
	豌豆纤维	795.19 ± 4.60 <sup>d</sup>	0.89 ± 0.01 <sup>ab</sup>	3.99 ± 0.09 <sup>d</sup>	65.38 ± 0.12 <sup>d</sup>
	大豆纤维	805.95 ± 3.94 <sup>c</sup>	0.88 ± 0.01 <sup>b</sup>	3.98 ± 0.02 <sup>d</sup>	65.39 ± 0.04 <sup>d</sup>
	可可纤维	893.79 ± 1.87 <sup>a</sup>	0.86 ± 0.02 <sup>c</sup>	3.82 ± 0.05 <sup>f</sup>	60.06 ± 0.16 <sup>f</sup>

注:同列右肩不同的小写字母表示同一冻藏时间下不同样品具有显著差异( $P < 0.05$ )。



对比上述三类膳食纤维对新鲜面包及冷冻面团面包烘焙特性的影响。在新鲜面包中,与空白对照组比较,添加第一类纤维后,竹纤维和小麦纤维对面包的比容、弹性、硬度和感官评分均无明显影响,而添加甘蔗纤维后,面包硬度显著减小了 11.48%、比容和感官评分分别增大了 9.75% 和 7.83% ( $P<0.05$ ); 添加第二类纤维后,面包的各项烘焙特性无明显变化; 添加第三类纤维后,面包硬度显著增大了 42.58%、比容显著减小了 4.08%、感官评分显著降低了 8.37% ( $P<0.05$ ), 对面包的烘焙品质产生了不利影响。

冻藏 60 d 后,与空白对照组比较,添加第一类纤维的面包硬度显著减小了 4.20%~8.56% ( $P<0.05$ ), 比容增大了 2.28%~6.09%, 面包的弹性、感官评分均有所提高; 添加第二类纤维后,面包硬度显著减小 ( $P<0.05$ ); 而添加第三类纤维后,面包硬度相较于空白对照组显著增大了 9.09%、感官评分显著降低了 6.72% ( $P<0.05$ )。

#### 2.4 膳食纤维性质与冷冻面团面包烘焙特性的相关性分析

为了进一步明晰膳食纤维性质与冷冻面团面包烘焙特性间的关系,因此,对膳食纤维功能特性与冻藏 60 d 后冷冻面团面包烘焙特性进行相关性分析,结果如表 4 所示。由表 4 可知,面包的硬度与膳食纤维的 TDF、IDF 含量、持水性、乳化性明显负相关,与 SDF、还原糖、木质素和蛋白质含量明显正相关,说明 TDF 和 IDF 含量较高、水合和乳化能力较强的纤维添加后,更有利于降低包硬度。面包比容与膳食纤维的 TDF、IDF 和纤维素含量、持水性、持油性、乳化性和乳化稳定性明显正相关,与 SDF、木质素、蛋白质和灰分含量明显负相关。面包的感官评分与膳食纤维的 TDF 和 IDF 含量、持水性和乳化性显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与 SDF、木质素、蛋白质和灰分含量极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 与还原糖含量显著负相关 ( $P<0.05$ ), 这表明添加 IDF 含量高、可溶性成分少的膳食纤维更有利于改善冷冻面团烘烤面包的感官性质。

分析上述三类膳食纤维性质与冷冻面团面包烘焙特性间的相关性。第一类纤维添加后,面包的硬度减小、比容增大、感官评分上升,这与其较高的持水性和较强的乳化性有关,此类纤维的水合能力较强,可协同淀粉吸附水分,促进淀粉在烘焙过程中充分糊化,进而延缓淀粉的老化回生、降低面包

硬度; 其次,持水性高的纤维可限制冷冻面团内水分迁移、减少冰晶对面筋蛋白基质的损害,增强面团的持气性,进而增大面包比容<sup>[29,30]</sup>; 此外,由于纤维的乳化性强,添加入面团后能与水分、油脂充分相互作用,有效填充在面筋基质中并增强面筋筋力,有利于改善面包品质<sup>[31,32]</sup>。第二类纤维对面包的品质改善效果较弱,主要归因于其较低的持水性及较弱的乳化性。第三类纤维添加入面团后,面包的硬度增加、比容减小、感官评分降低,与其较高的木质素含量、以及最低的持水性和最弱的乳化性有关,由于木质素的结构复杂、分子量大、化学键较为无序,添加入面团后,可通过共价键与半纤维素结合形成空间屏障,阻碍面筋网络结构的形成,导致面团内水分流失、持气性下降,进而导致面包硬度增大、比容减小<sup>[33,34]</sup>。

表 4 膳食纤维性质与冻藏 60 d 冷冻面团面包烘焙特性间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis among the properties of dietary fibers and baking quality of frozen dough bread after 60-day storage

测定指标	硬度	弹性	比容	感官评分
TDF	-0.853*	0.886*	0.813*	-0.853*
IDF	-0.938**	0.944**	0.917*	-0.938**
SDF	0.951**	-0.896*	-0.932**	0.951**
还原糖	0.877*	-0.797	-0.882*	0.877*
纤维素	-0.775	0.817*	0.725	-0.775
半纤维素	-0.283	0.173	0.328	-0.283
木质素	0.920**	-0.857*	-0.925**	0.920**
蛋白质	0.956**	-0.926**	-0.920**	0.956**
总灰分	0.964**	-0.935**	-0.934**	0.964**
结晶度	-0.710	0.736	0.728	-0.710
持水性	-0.890*	0.943**	0.864*	-0.890*
持油性	-0.759	0.851*	0.763	-0.759
溶胀度	-0.720	0.725	0.786	-0.720
乳化性	-0.888*	0.915*	0.844*	-0.888*

注: \*\* 表示不同样品在 0.01 水平下具有显著差异 ( $P<0.01$ ); \* 表示在 0.05 水平下具有显著差异 ( $P<0.05$ )。

### 3 结论

本研究对比分析了六种膳食纤维的功能特性,并将其分为三类,探究纤维性质对冷冻面团面包烘焙特性的影响。第一类纤维为竹纤维、小麦纤维和甘蔗纤维,其总膳食纤维、纤维素含量较高,晶体

结构更强。丰富的亲水基团和高长径比赋予其较高的持水性、溶胀度和乳化性,因此其添加入冷冻面团后,有效降低面包硬度、增加弹性、提高面包感官评分。第二类纤维为豌豆纤维和大豆纤维,其总膳食纤维含量相对较低,半纤维素和蛋白质含量相对较高,纤维颗粒呈不规则块状,持水/持油性较低、乳化性较弱。相应地,第二类纤维对面包品质改良效果次之。第三类为可可纤维,其木质素、还原糖含量高,晶体结构相对最弱,持水/持油性相对最低、乳化性最弱,添加入冷冻面团后,面包硬度明显增加、弹性下降,对面包品质产生不利影响。六种膳食纤维中,甘蔗纤维对冷冻面团烘焙品质的改良效果最佳。总体而言,不溶性纤维含量高、持水性高、乳化性强的膳食纤维更有利于冷冻面团面包质地柔软、比容增大、感官性质良好。膳食纤维的功能性质可作为重要指标,以评估其作为冷冻面团改良剂的应用潜力。本研究为膳食纤维在冷冻面团面包体系的应用提供了理论依据。

### 参考文献

- [1] SELOMULYO V O, ZHOU W B. Frozen bread dough: Effects of freezing storage and dough improvers [J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 45(1): 1-17.
- [2] OMEDI J O, HUANG W N, ZHANG B L, et al. Advances in present-day frozen dough technology and its improver and novel biotech ingredients development trends-A review [J]. *Cereal Chemistry*, 2019, 96(1): 34-56.
- [3] 邹奇波,袁永利,黄卫宁.食品添加剂对面团动态流变学及冷冻面团烘焙特性的影响研究[J].*食品科学*,2006, 27(11):35-40.
- [4] WANG P, JINZ Y, XU X M. Physicochemical alterations of wheat gluten proteins upon dough formation and frozen storage—A review from gluten, glutenin and gliadin perspectives [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 46(2): 189-198.
- [5] FENG W J, MAS, WANG X X. Recent advances in quality deterioration and improvement of starch in frozen dough [J]. *Grain & Oil Science and Technology*, 2020, 3(4): 154-163.
- [6] GHARAIE Z, AZIZI M H, BARZEGAR M, et al. Effects of hydrocolloids on the rheological characteristics of dough and the quality of bread made from frozen dough [J]. *Journal of Texture Studies*, 2015, 46(5): 365-373.
- [7] NEPALIP, SURESH S, PIKALE G, et al. Hypertension and the role of dietary fiber [J]. *Current Problems in Cardiology*, 2022, 47(7): 101203.
- [8] 胡筱,潘浪,朱平平,等.超声波改性对葵花粕膳食纤维性质与结构的影响[J].*中国食品学报*,2019,19(11):88-99.
- [9] 陈贵婷,胡坦,徐阳,等.柑橘膳食纤维理化性质、生理功能及其在食品中的应用研究进展 [J]. *食品科学*,2022, 43(23):336-345.
- [10] 王红娜,曹欣然,黄莲燕,等.膳食纤维与阿魏酸复配对面团和面筋蛋白性质的影响[J].*食品科学*,2019,40(12):62-69.
- [11] 美合日班·马木提,刘亚青,孔维涵,等.黑木耳不溶性膳食纤维对面包品质的影响[J].*食品工业*,2023,44(6):51-56.
- [12] ALMEIDA E L, CHANG Y K, STEEL C J. Dietary fibre sources in frozen part-baked bread: Influence on technological quality [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 53(1): 262-270.
- [13] XIE Q R, LIU X R, XIAO S S, et al. Effect of mulberry leaf polysaccharides on the baking and staling properties of frozen dough bread [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(13): 6071-6079.
- [14] ADAMS V, RAGAEI S, ABDEL-AAL E M. Impacts of wheat fiber on frozen dough shelf life and bread quality [J]. *Cereal Chemistry*, 2015, 4(92): 370-377.
- [15] DEEPAK M, SHEWETA B. Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 61: 1-6.
- [16] 李依娜,余元善,李璐,等.不同脱糖方式下荔枝果渣膳食纤维的理化特性比较[J].*现代食品科技*,2022,38(2):94-103.
- [17] BARTOSA, ANGGONO J, FARKAS Á E, et al. Alkali treatment of lignocellulosic fibers extracted from sugarcane bagasse: Composition, structure, properties [J]. *Polymer Testing*, 2020, 88: 106549.
- [18] 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.
- [19] 王金鸽,蔡勇建,刘俊梅,等.均质联合酶解对大豆蛋白纳米颗粒结构与功能特性的影响[J].*食品工业科技*,2023, 44(13):85-93.
- [20] 赵强忠,杜翠,蔡勇建,等.HPMC和GOD对冷冻面团及其烘烤面包品质的影响[J].*华南理工大学学报(自然科学版)*,2019,47(8):38-47.
- [21] LECUMBERRI E, MATEOS R, IZUIERDO P M, et al. Dietary fibre composition, antioxidant capacity and physicochemical properties of a fibre-rich product from cocoa (*Theobroma cacao* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(3): 948-954.
- [22] 杨靖.研磨对胡萝卜渣理化性质及部分功能特性的影响[D].太原:山西师范大学,2021.
- [23] FENG X Y, YU B, REGENSTEIN J M, et al. Effect of particle size on composition, physicochemical, functional, and structural properties of insoluble dietary fiber concentrate from citrus peel [J]. *Food Science and Technology International*, 2022, 29(3): 5-8.



- [24] 池玉闽,董怡,何强,等.油橄榄果肉和核壳中膳食纤维的功能特性分析[J].现代食品科技,2023,39(5):1-7.
- [25] BOUAZIZ M A, AMARA W B, ATTIA H, et al. Effect of the addition of defatted date seeds on wheat dough performance and bread quality [J]. *Journal of Texture Studies*, 2010, 41: 511-531.
- [26] KALASHNIKOVA I, BIZOT H, CATHALA B, et al. Modulation of cellulose nanocrystals amphiphilic properties to stabilize oil/water interface [J]. *Biomacromolecules*, 2012, 13(1): 267-275.
- [27] ZHAO X J, CHEN B F, SUN Z H, et al. A novel preparation strategy of emulsion gel solely stabilized by alkaline assisted steam-cooking treated insoluble soybean fiber [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107646.
- [28] HUANG L, LIU J, DING B, et al. Physicochemical and emulsifying properties of orange fibers stabilized oil-in-water emulsions [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 133: 110054.
- [29] WANG C C, YANGZ, XING J J, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the rheological properties of dough [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 121: 107008.
- [30] LEIM X, HUANG J H, TIAN X L, et al. Effects of insoluble dietary fiber from wheat bran on noodle quality [J]. *Grain & Oil Science and Technology*, 2021, 4(1): 1-9.
- [31] BOUAZIZ F, ABDEDDAYEM A B, KOUBAA M, et al. Date seeds as a natural source of dietary fibers to improve texture and sensory properties of wheat bread [J]. *Foods*, 2020, 9(6): 737.
- [32] PLAZZOTTA S, NICOLI M C, MANZOCCO L. Upcycling soy processing waste (okara) into structured emulsions for fat replacement in sweet bread [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103: 4025-4033.
- [33] LI L, WANG Z, LI L, et al. Effects of fermented wheat bran on flour, dough, and steamed bread characteristics [J]. *Journal of Chemistry*, 2018, 2018: 1597308.
- [34] POLAKI A, XASAPIS P, FASSEASC, et al. Fiber and hydrocolloid content affect the microstructural and sensory characteristics of fresh and frozen stored bread [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(1): 1-7.