

# D-阿洛酮糖对面团特性及面包感官品质的影响

姚佳欣<sup>1</sup>, 马宏姮<sup>1</sup>, 刘世杰<sup>1</sup>, 王雅诗<sup>1</sup>, 李志江<sup>1</sup>, 汤华成<sup>1,2</sup>, 张洪微<sup>1\*</sup>, 王颖<sup>1,2</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319) (2. 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319)

**摘要:** 为探究 D-阿洛酮糖对面团特性及面包品质的影响规律, 以 0%、4%、8%、12%、16% (wt.%) 的 D-阿洛酮糖替代部分蔗糖制备面团与面包, 研究面团粉质特性、发酵特性、质构特性、微观结构、水分分布和面包感官品质的变化规律。结果表明: 随 D-阿洛酮糖添加量的增加, 面团吸水率升高, 形成时间逐渐缩短, 弱化度逐渐增大, 稳定时间呈现先升后降的趋势, 16% 的 D-阿洛酮糖不利于面团的形成和稳定; 适量添加 D-阿洛酮糖 (4%~8%) 可通过增强面筋网络有效防止气体逸失, 而高添加量 (12%~16%) 会抑制发酵并降低产气速率; 面团硬度、胶着性、咀嚼性随 D-阿洛酮糖的增加而增大, 弹性降低, 内聚性变化不显著, 16% 组面团硬度显著提高, 弹性较差; D-阿洛酮糖使面团面筋网络结构更加连续且紧密, 增强面团持水性。D-阿洛酮糖显著影响面包感官品质, 8% 的添加量改善了面包的烘焙色泽和烘烤风味, 内部结构更细腻, 16% 组面包感官品质显著降低。该研究为 D-阿洛酮糖在面包中的应用提供了理论基础。

**关键词:** D-阿洛酮糖; 面团; 面包; 品质特性; 感官品质

文章编号: 1673-9078(2026)3-233-241

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.0064

## Effects of D-allulose on Dough Properties and the Sensory Quality of Bread

YAO Jiaxin<sup>1</sup>, MA Hongda<sup>1</sup>, LIU Shijie<sup>1</sup>, WANG Yashi<sup>1</sup>, LI Zhijiang<sup>1</sup>, TANG Huacheng<sup>1,2</sup>,

ZHANG Hongwei<sup>1\*</sup>, WANG Ying<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

(2. National Engineering Research Center of Coarse Grains, Daqing 163319, China)

**Abstract:** To investigate the effects of D-allulose on dough properties and bread quality, dough and bread samples were prepared by partially replacing sucrose with D-allulose at concentrations of 0%, 4%, 8%, 12%, and 16% (wt.%). Variations in dough flour properties, fermentation behavior, textural attributes, microstructure, water distribution, and sensory quality of bread were systematically examined. Results demonstrated that as the concentration of D-allulose increased, the water absorption capacity of dough rose, the formation time gradually shortened, the weakening degree progressively increased, and the stability time exhibited a trend of initially increasing and subsequently decreasing. A D-allulose concentration of 16% was detrimental to dough formation and stability. Moderate incorporation of D-allulose (4%~8%) effectively enhanced the gluten network, thereby preventing gas loss during fermentation. In contrast, high concentrations of D-allulose (12%~16%) inhibited fermentation activity and reduced gas production rates. The hardness, adhesiveness, and chewiness of dough increased with higher D-allulose levels, whereas elasticity decreased and cohesiveness remained relatively unchanged. Notably, dough in the 16% group exhibited a significantly greater hardness and poorer elasticity. D-Allulose contributed to a more continuous and compact gluten network structure, improving the water-holding capacity of dough. Sensory evaluation revealed that an addition of 8% D-allulose enhanced the baking color, flavor, and internal texture of

引文格式:

姚佳欣, 马宏姮, 刘世杰, 等. D-阿洛酮糖对面团特性及面包感官品质的影响[J]. 现代食品科技, 2026, 42(3): 233-241.

YAO Jiaxin, MA Hongda, LIU Shijie, et al. Effects of D-allulose on dough properties and the sensory quality of bread [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 233-241.

收稿日期: 2025-01-13; 修回日期: 2025-04-12; 接受日期: 2025-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2100903); 中央引导地方项目 (ZY23QY16); 江淮杂粮产业工程技术研发创新基地项目 (2025024)

作者简介: 姚佳欣 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 493327069@qq.com

通讯作者: 张洪微 (1975-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: fcwei\_2004@126.com

bread. Conversely, the sensory quality of bread in the 16% group was markedly diminished. This study provides valuable insights into the application of D-allulose in bread formulation.

**Key words:** D-allulose; dough; bread; quality characteristics; sensory quality

D-阿洛酮糖 (D-allulose) 是一种天然但含量相对稀少的单糖, 与 D-果糖是 C-3 位的差向异构体<sup>[1]</sup>。D-阿洛酮糖在理化性质及加工性能上与蔗糖相近, 其甜度为蔗糖的 70%, 但热量仅为蔗糖的 10%<sup>[2]</sup>。研究表明, D-阿洛酮糖在食品中能有效降低水分活度与水分含量, 从而抑制微生物生长并延长食品保质期; 同时可促进淀粉糊化并抑制再结晶, 从而延缓淀粉老化<sup>[3-5]</sup>。此外, D-阿洛酮糖还具有潜在健康功效: 通过抑制脂肪酸合成与促进脂肪酸氧化预防肥胖<sup>[6]</sup>, 通过调控餐后血糖水平、抗炎及抗氧化作用降低糖尿病风险<sup>[7]</sup>。2020 年, 美国食品药品监督管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 将其列为普遍公认安全物质 (Generally Regarded As Safe, GRAS)<sup>[8]</sup>, 批准其作为甜味剂或风味改良剂用于烘焙食品、饮料等特定领域。目前, D-阿洛酮糖已能够实现大规模的工业化生产<sup>[9]</sup>。

甜味剂在面包中的作用不可缺少, 出于人们对健康的追求日益递增, 用低卡路里的糖来代替蔗糖已成为重要研究方向。当前食品工业中广泛使用的化学合成的人工高倍甜味剂可能存在安全隐患, 长期或过量使用可能会对人体健康产生潜在危害, 部分研究表明, 其与中风、痴呆等风险存在相关性<sup>[10]</sup>, 因此寻找一种替代蔗糖的优质的天然甜味剂势在必行<sup>[11]</sup>。黄檀香等<sup>[12]</sup>和 Sun 等<sup>[13]</sup>发现当 D-阿洛酮糖与蔗糖以 12:19 (*m/m*) 的比例复配时, 可以改善饼干的质构特性, 使内部气孔更细密均匀, 提高饼干的滋味与口感, 同时增强饼干加工过程中的褐变反应与抗氧化活性, 从而延长货架期。Sawettn 等<sup>[14]</sup>和 Lee 等<sup>[15,16]</sup>研究发现, D-阿洛酮糖能显著增加松饼和磅饼的硬度并促进美拉德色泽形成。Pocan 等<sup>[17]</sup>和 O'charoen 等<sup>[18]</sup>研究发现, 添加 D-阿洛酮糖的明胶软糖热量显著降低且质地更脆。Sun 等<sup>[5]</sup>研究发现, 含 D-阿洛酮糖的蛋奶布丁较蔗糖产品具有更高的断裂强度与黏弹性。

D-阿洛酮糖对各类食品体系的作用存在差异性特征, Wang 等<sup>[19]</sup>研究显示, 相较于蔗糖、果糖、葡萄糖等小分子糖, D-阿洛酮糖对小麦淀粉体系的影响较弱, 其添加可同步实现三重效应: 提升淀粉凝胶硬度与黏弹性, 促进淀粉糊化进程, 同时通过增加体系微观结构密度抑制淀粉降解。基于该特性, 为了探究 D-阿洛酮糖对面团特性和面包感官品质的影响, 并确定适宜的 D-阿洛酮糖添加量, 以小麦粉为主要原料, 添加

不同比例 0%、4%、8%、12%、16% (wt.%) 的 D-阿洛酮糖替代部分蔗糖制备面团与面包, 分析 D-阿洛酮糖对面团的粉质特性、发酵特性、质构特性、微观结构、水分分布状态及面包感官品质的影响。旨在为 D-阿洛酮糖在面包生产中的应用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

D-阿洛酮糖 (D-allulose), 98%, 上海麦克林生化科技股份有限公司; 小麦面粉 (湿面筋 $\geq 30\%$ 、蛋白质 18.3 g/100 g、灰分 0.8 g/100 g), 山东鲁花 (延津) 面粉食品有限公司; 耐高糖高活性干酵母, 安琪酵母股份有限公司; 未加碘精制食用盐, 中国盐业股份有限公司; 无盐黄油, 中粮东海粮油工业 (张家港) 有限公司; 蔗糖, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 上述均为食品级。

TMS-PRO 质构仪, 美国 FTC 公司; KVL4100S 厨师机, 英国 Kenwood 公司; JW-LC36 冷藏发酵箱, 无锡联合伟创机械有限公司; Alpha1-4-LSCbasic 冻干机, 日本 Kubota 公司; Farinograph-E 粉质仪, 德国布拉本德集团; ApreoC 电子显微镜, 赛默飞世尔科技有限公司; NMI20-015V-I 核磁共振成像分析仪, 苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 D-阿洛酮糖面团和面包的制备

工艺流程参考二次发酵法并加以修改, 面团、面包的工艺流程图如图 1 所示。

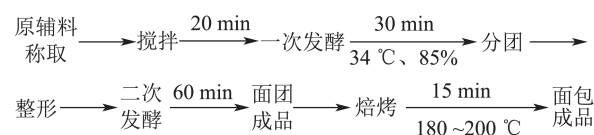


图 1 D-阿洛酮糖面团、面包工艺流程图

Fig.1 D-Allulose dough and bread processing flow chart

(1) 以 100 g 小麦面粉为基准, 按质量分数添加: 食盐 1.5%、酵母 1.4%、加水量为粉质仪测定吸水率的 80%。D-阿洛酮糖与蔗糖按表 1 比例进行等量替代。

(2) 使用厨师机先低速混合 2 min, 转高速搅拌 18 min, 至面团表面光滑、质地均匀且形成筋膜。

(3) 将面团置于醒发箱 (温度 34 °C、相对湿度

85%) 中醒发 30 min。

(4) 分割面团每块 60 g，手工揉圆并整形。

(5) 二次醒发 60 min，获得最终面团样品。

(6) 将面团置于烤箱（上火温度 200 ℃、下火温度 180 ℃）中烘烤 15 min。

(7) 面包出炉后室温冷却 1 h，制得成品

(8) 储存条件：面团以保鲜膜包裹，面包装入保鲜袋，4 ℃冷藏保存备用。

表 1 D-阿洛酮糖与蔗糖配比表

Table 1 The ratio of D-allulose to sucrose table

| 组别    | D-阿洛酮糖添加量/(wt.%) | 蔗糖添加量/(wt.%) |
|-------|------------------|--------------|
| 对照组   | 0                | 16           |
| 4% 组  | 4                | 12           |
| 8% 组  | 8                | 8            |
| 12% 组 | 12               | 4            |
| 16% 组 | 16               | 0            |

1.2.2 面团特性测定

1.2.2.1 面团粉质特性的测定

依据国家标准 GB/T 14614-2019《粮油检验 小麦粉面团流变学特性测试 粉质仪法》，测定步骤如下：准确称取 50 g 混合粉体（含配方规定比例的原料及辅料）于粉质仪揉面钵中，启动设备后按系统提示注入蒸馏水，调节加水量使峰值稠度稳定在 500±20 FU 范围内，持续揉面 20 min，记录吸水率（%）、面团形成时间（min）、面团稳定时间（min）、弱化度（FU）。平行实验设置：每组实验重复 3 次，数据取算术平均值。

1.2.2.2 面团发酵特性的测定

参照陈永莹等<sup>[20]</sup>的方法并优化，步骤如下：精确称取 20 g 未发酵面团，通过裱花袋转移至 100 mL 量筒底部（操作时避免引入气泡，确保初始体积测量准确），调整样品表面与量筒基准刻度齐平。将量筒置于恒温恒湿醒发箱（温度 38 ℃，相对湿度 85%），分别于 0、15、30、45、60、75、90 min 时记录面团体积膨胀值。读取体积时需垂直插入玻璃棒至接触面团最高点，视线与量筒刻度平行。每组实验重复 3 次，数据取算术平均值。

1.2.2.3 面团质构特性的测定

参照彭博<sup>[21]</sup>的方法并改进，步骤如下：取面团样品，使用定制模具（直径 20 mm× 高度 20 mm）切割为统一尺寸圆柱体。采用质构仪（配备 12.7 mm 圆柱形探头）进行 TPA 测试，模拟口腔咀嚼过程。参数设置：预压 / 压缩 / 回程速度 60 mm·min<sup>-1</sup>，压缩形变率 50%，触发力 0.10 N，间隔时间 5 s。每组实验重复 8 次，

数据取算术平均值。

1.2.2.4 面团微观结构的测定

参照杨玉玲<sup>[22]</sup>的方法并调整，步骤如下：将新鲜面团置于 -80 ℃超低温冰箱预冻 12 h，转移至冷冻干燥机（冷阱温度 -55 ℃，真空度 10 Pa）冻干 48 h。取冻干样品以导电胶带固定于样品台，经铂金喷镀后，使用电子显微镜（加速电压 10 kV）拍摄放大 3 000 倍扫描电镜图。每组样品选取 3 个视野，取代表性图像分析。

1.2.2.5 面团水分分布的测定

参照吴诗敏<sup>[23]</sup>的方法并改进，步骤如下：精确称取 0.5 g 面团，手工成型为圆柱状，以三层复合防水膜包裹（隔绝水分交换），置于核磁共振专用试管中。核磁共振检测参数：共振频率 23.32 MHz，脉冲序列 CPMG，扫描次数 20 次，弛豫时间范围 0.01~1 000 ms。每组实验重复 3 次，数据取算术平均值。

1.2.3 面包感官品质的测定

依据国家标准 GB/T 20981-2007《面包》感官要求执行：取同一批次新鲜面包，室温冷却 1 h 后置于样品盘中。组建 10 人感官评价小组（含 5 名食品专业教师及 5 名经培训研究生，年龄 20~38 岁），样品评定间隔 2 min，期间以蒸馏水漱口。具体评分标准见表 2。

表 2 感官评分表

Table 2 Sensory score comparison table

| 项目             | 评分标准             | 分值    |
|----------------|------------------|-------|
| 外观形态<br>(30 分) | 表面光滑、丰满，体积大      | 25~30 |
|                | 表面有轻微褶皱，体积适中     | 19~24 |
|                | 表皮褶皱、体积小         | <19   |
| 色泽<br>(10 分)   | 表面呈金黄色、无斑点       | 8~10  |
|                | 上色均匀、光泽稍暗        | 5~7   |
|                | 无光泽、有较多斑点        | <5    |
| 质地<br>(15 分)   | 面包内部结构细腻、有弹性     | 13~15 |
|                | 面包内部较细腻，弹性一般     | 9~12  |
|                | 面包内部结构粗糙，没有弹性    | <9    |
| 纹理结构<br>(25 分) | 面包气孔致密分布，气孔壁呈海绵状 | 21~25 |
|                | 面包气孔分布不均，气孔壁稍厚   | 16~20 |
|                | 气孔大小不均匀          | <16   |
| 风味口感<br>(20 分) | 面包香味明显，口感细腻      | 17~20 |
|                | 轻微面包香，口感较细腻      | 12~16 |
|                | 无香味，颗粒感严重        | 12    |

1.3 数据处理

采用 Graphpad prism 9 和 Orign 2021 作图，IBM SPSS Statistics 27 统计实验数据，并进行单因素方差



分析,结果以平均值±标准差的形式表示,统一保留2位小数。 $P<0.05$ 表示差异显著, $P>0.05$ 表示差异不显著。

2 结果与分析

2.1 D-阿洛酮糖添加量对面团特性的影响

2.1.1 D-阿洛酮糖添加量对面团粉质特性的影响

表 3 D-阿洛酮糖添加量对面团粉质特性的影响

Table 3 Effect of D-allulose addition on flour properties of dough

| 阿洛酮糖添加量/% | 吸水率/%                   | 面团形成时间/min              | 面团稳定时间/min              | 弱化度/FU                 |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 0         | 66.63±0.15 <sup>d</sup> | 10.63±0.31 <sup>a</sup> | 13.00±0.10 <sup>d</sup> | 1.00±0.00 <sup>b</sup> |
| 4         | 67.93±0.21 <sup>c</sup> | 9.17±0.15 <sup>b</sup>  | 13.67±0.15 <sup>c</sup> | 1.00±0.00 <sup>b</sup> |
| 8         | 67.87±0.25 <sup>c</sup> | 8.47±0.31 <sup>c</sup>  | 14.33±0.25 <sup>b</sup> | 1.33±0.50 <sup>b</sup> |
| 12        | 68.67±0.15 <sup>b</sup> | 7.73±0.21 <sup>d</sup>  | 15.03±0.50 <sup>a</sup> | 1.33±0.50 <sup>b</sup> |
| 16        | 69.03±0.15 <sup>a</sup> | 6.67±0.15 <sup>e</sup>  | 12.20±0.30 <sup>e</sup> | 8.00±0.00 <sup>a</sup> |

注:同一列中标注不同字母上标的数据间存在显著性差异( $P<0.05$ )。下同。

粉质曲线是评估面粉加工性能的关键指标,可直观反映面团搅拌过程中的物理特性。面筋性质直接影响面团品质,通常吸水率越高、形成时间与稳定时间越长,表明面团抗机械搅拌能力及加工稳定性越强,面筋网络强度也越大。由表3可知,随D-阿洛酮糖添加量增加,面团吸水率呈上升趋势,形成时间逐渐缩短,稳定时间则呈现先升后降的规律。吸水率的提升与D-阿洛酮糖分子结构特性密切相关:相较于蔗糖,相同质量条件下D-阿洛酮糖含有更多的游离羟基,因此具有更强的吸水能力,有效提高了面团的水合能力<sup>[24]</sup>;同时,D-阿洛酮糖的游离羟基与面筋蛋白形成氢键,促进面筋网络快速交联。此外,D-阿洛酮糖较小的分子尺寸产生更高渗透压,进一步强化麦谷蛋白疏水相互作用,导致形成时间显著缩短。稳定时间变化表明,与对照组相比,4%~12%添加组的面团稳定时间逐渐延长,12%组的面团稳定时间达到峰值,较对照组(0%组)显著提高了15.6%( $P<0.05$ ),这可能是由于D-阿洛酮糖增强了蛋白质分子之间的交联作用<sup>[25]</sup>,使面筋蛋白网络结构更加稳定;然而,当添加量增至16%时,其强亲水性可能引发面筋蛋白竞争性水合不足,导致面筋蛋白网络无法连续形成;弱化度数据进一步印证,单独添加D-阿洛酮糖的面筋网络更易被机械力破坏(弱化度显著提高至8FU)。

综上,D-阿洛酮糖部分替代蔗糖可以提高面团吸水率,有利于面团的形成,但全部替代蔗糖不利于面

团的稳定,使面团的筋力会显著下降,面筋质量较差。

2.1.2 D-阿洛酮糖添加量对面团发酵特性的影响

面团发酵性能由产气能力与持气能力共同决定,直观表现为面团发酵体积的变化。如图2所示,随着发酵时间的延长,各组面团发酵体积均呈上升趋势,并于75 min时达到峰值;随着D-阿洛酮糖添加量的增加,而随D-阿洛酮糖添加量增加,相同发酵时间下面团发酵体积逐渐减小,对照组在整个观察周期内均显著高于D-阿洛酮糖添加组( $P<0.05$ )。该现象与酵母代谢特性相关:相较于蔗糖,酵母对D-阿洛酮糖的利用率较低,导致二氧化碳(CO<sub>2</sub>)生成量随替代比例增加而减少,面团的发酵体积也随之减小。此外,面粉中所含的淀粉酶会作用于淀粉产生麦芽糖,从而促进发酵,但D-阿洛酮糖对淀粉酶具有一定的抑制作用<sup>[26]</sup>,阻碍淀粉向麦芽糖转化,进一步限制发酵动力,这也影响了发酵体积的增大。

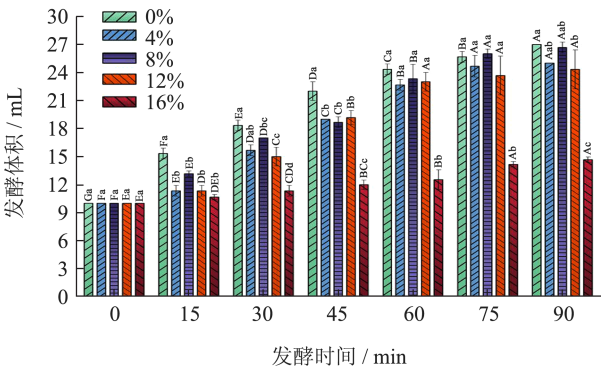


图 2 D-阿洛酮糖添加量对面团发酵体积的影响

Fig.2 Effect of D-allulose addition on dough fermentation volume

注:大写字母表示相同组别、不同时间的差异显著性;小写字母表示相同时间、不同组别的差异显著性。

整个发酵过程中,8%组的发酵体积高于4%组和12%组,但与这两组的差异不显著;发酵30 min后,8%组的发酵体积显著高于16%组( $P<0.05$ );发酵60 min后,8%组的发酵体积与对照组没有显著差异。发酵体积差异不仅受CO<sub>2</sub>产量的影响,还与面筋网络强度密切相关。面筋结构稳定,则持气能力强,发酵后的面团体积稳定。结合面团粉质特性分析发现,D-阿洛酮糖添加量为0%~12%时,面团弱化度没有显著差别( $P>0.05$ ),且面团稳定时间增加,因此发酵一定时间(60~75 min)后,面团发酵体积没有显著差别( $P>0.05$ )说明适度添加可通过增强面筋网络持气能力维持发酵体积;而16%组因弱化度显著升高、稳定时间缩短,导致体积增幅最小。Sawettanun等<sup>[27]</sup>研究表明,单独使用D-阿洛酮糖会降低发酵效率,但以

D-阿洛酮糖替代 75 wt.% 蔗糖时仍可实现有效发酵,表明部分替代策略具有可行性。

### 2.1.3 D-阿洛酮糖添加量对面团质构特性的影响

面团的质构特性反映其内部结构特征,主要由面筋蛋白网络与淀粉颗粒的相互作用决定。如表 4 所示,随着 D-阿洛酮糖添加量的增加,面团的硬度、咀嚼性和胶粘性逐渐增大,弹性先升高后降低,面团的内聚性变化不显著 ( $P>0.05$ )。硬度的增加与面筋蛋白网络的形成和致密程度有直接关系, D-阿洛酮糖分子结构中羟基与蛋白质形成更多氢键,加强了蛋白网络结构; D-阿洛酮糖分子结构中的酮基可能会与面筋蛋白中的赖氨酸残基发生反应,影响面筋蛋白的结构稳定性,从而形成更强的面筋网络<sup>[28,29]</sup>,导致面团的硬度增大。另外 D-阿洛酮糖的发酵能力较弱,发酵过程中产生的  $\text{CO}_2$  气体较少,导致面团膨胀不足,内部结构变得紧密致使面团硬度增大。咀嚼性通常表示咀嚼固体食物所需的能量,而胶粘性用于描述半固体食品的口感。由于这两个指标的变化趋势与硬度一致,因此它们随 D-阿洛酮糖添加量 (4%~12%) 的增加而增大,但与对照组无显著差异 ( $P>0.05$ )。然而,当 D-阿洛酮糖添加量达到 16% 时,面团的弹性显著下降 ( $P<0.05$ ),降幅为 15.8%,这种弹性的显著下降可能导致面团在加工过程中延展性变差;同时,咀嚼性和胶粘性显著高于对照组 ( $P<0.05$ ),分别提升了 8.59 mj 和 173.33 g。作为一种单糖, D-阿洛酮糖可能通过相变作用延长蛋白质的变性时间。这种相变可能导致淀粉过度膨胀和直链淀粉浸出,同时抑制面筋蛋白与淀粉复合结构的形成<sup>[30]</sup>。因此,与对照组相比,添加 16% D-阿洛酮糖的面团硬度更高,弹性更低。结合面团发酵特性分析, D-阿洛酮糖添加量为 16% 时,面团发酵体积显著低于其他组 ( $P<0.05$ ),且增幅最小,面团产气量低、持气能力差,致使面团弹性降低<sup>[31]</sup>。

综上, D-阿洛酮糖添加量通过影响面筋蛋白的结构稳定性、发酵气体的产生及蛋白质与淀粉的相互作用,显著改变面团的质构特性。低添加量 (4%~12%) 对面团质构影响可控,而高添加量 (16%) 会导致硬度异常升高、弹性显著下降及咀嚼性增强,这可能制约面团加工适性。

### 2.1.4 D-阿洛酮糖添加量对面团微观结构的影响

面团的微观结构主要由淀粉颗粒与面筋蛋白 (麦

谷蛋白、醇溶蛋白) 组成的复合基质支撑。在搅拌过程中,面筋蛋白吸水膨胀并通过二硫键与非共价键交联,形成稳定的三维网络结构,包裹淀粉颗粒以维持体系稳定性<sup>[32]</sup>从图 3 可以明显观察到,随 D-阿洛酮糖添加量增加,淀粉颗粒逐渐被包裹,内部气孔分布越来越均匀,孔洞逐渐减少,面筋网络结构的连续性和致密性持续提升。在对照组面团 (图 3a) 中,可以清晰地观察到面筋蛋白和淀粉颗粒,许多淀粉颗粒未被面筋基质包裹,网络结构相对松散,其连续性较其他组别显著降低; D-阿洛酮糖添加量为 4% 时 (图 3b),面团的网络结构比对照组略微紧密,孔洞数量显著减少,淀粉颗粒被面筋蛋白包裹的比例明显提高; 8% 组和 12% 组 (图 3c、3d) 面团的蛋白网络结构明显比对照组和 4% 组更加紧密,且气孔分布更具有规律性,淀粉颗粒被面筋蛋白覆盖的更完全,面筋空间网络结构得到了有效的增强; 16% 组 (图 3e) 与其他组相比,面团表面平整度和连续性最佳,但网络结构过度致密化,淀粉-面筋复合基质呈现刚性特征。

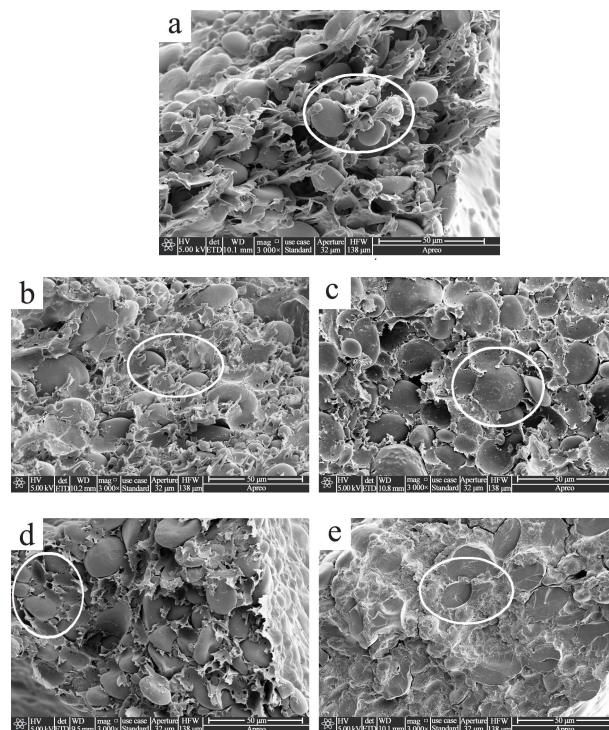


图 3 不同 D-阿洛酮糖添加下面团的扫描电镜图 ( $\times 3000$ )

Fig.3 Scanning electron microscope ( $\times 3000$ ) images of dough with different D-allulose addition levels

注: a 为 D-阿洛酮糖 0% 对照组, b 为 D-阿洛酮糖添加量 4% 组, c 为 D-阿洛酮糖添加量 8% 组, d 为 D-阿洛酮糖添加量 12% 组, e 为 D-阿洛酮糖添加量 16% 组。图 4 同。



表 4 D-阿洛酮糖添加量对面团质构特性的影响  
Table 4 Effect of D-allulose addition on dough texture characteristics

| 阿洛酮糖添加量/% | 硬度/g                        | 内聚性                      | 弹性                       | 咀嚼性/mj                    | 胶粘性/g                       |
|-----------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 0         | 347.33 ± 7.62 <sup>d</sup>  | 0.43 ± 0.01 <sup>a</sup> | 4.60 ± 0.03 <sup>a</sup> | 6.78 ± 0.26 <sup>b</sup>  | 147.67 ± 1.11 <sup>d</sup>  |
| 4         | 407.67 ± 2.31 <sup>c</sup>  | 0.43 ± 0.01 <sup>a</sup> | 4.78 ± 0.18 <sup>a</sup> | 6.60 ± 0.43 <sup>b</sup>  | 174.67 ± 2.89 <sup>c</sup>  |
| 8         | 424.67 ± 6.07 <sup>c</sup>  | 0.43 ± 0.02 <sup>a</sup> | 4.74 ± 0.04 <sup>a</sup> | 7.14 ± 0.36 <sup>b</sup>  | 185.00 ± 4.58 <sup>c</sup>  |
| 12        | 476.67 ± 10.97 <sup>b</sup> | 0.46 ± 0.01 <sup>a</sup> | 4.59 ± 0.02 <sup>a</sup> | 10.14 ± 0.41 <sup>b</sup> | 221.00 ± 8.93 <sup>b</sup>  |
| 16        | 695.33 ± 8.14 <sup>a</sup>  | 0.46 ± 0.04 <sup>a</sup> | 3.87 ± 0.11 <sup>b</sup> | 15.37 ± 0.49 <sup>a</sup> | 321.00 ± 15.07 <sup>a</sup> |

表 5 D-阿洛酮糖添加量对面团水分分布的变化  
Table 5 Changes in the amount of D-allulose added to the dough moisture distribution

| 阿洛酮糖添加量/% | $T_{21}$ /ms             | $T_{22}$ /ms             | $T_{23}$ /ms               | $A_{21}$ /%                | $A_{22}$ /%               | $A_{23}$ /%              |
|-----------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0         | 0.67 ± 0.15 <sup>a</sup> | 4.24 ± 0.35 <sup>a</sup> | 46.05 ± 10.08 <sup>a</sup> | 27.79 ± 4.54 <sup>a</sup>  | 61.45 ± 4.38 <sup>a</sup> | 4.1 ± 0.59 <sup>a</sup>  |
| 4         | 0.83 ± 0.07 <sup>a</sup> | 4.64 ± 0.01 <sup>a</sup> | 39.53 ± 3.26 <sup>a</sup>  | 28.34 ± 0.95 <sup>a</sup>  | 57.57 ± 1.59 <sup>a</sup> | 4.78 ± 0.36 <sup>a</sup> |
| 8         | 0.79 ± 0.07 <sup>a</sup> | 4.26 ± 0.65 <sup>a</sup> | 39.53 ± 3.26 <sup>a</sup>  | 25.57 ± 3.91 <sup>ab</sup> | 62.35 ± 4.4 <sup>a</sup>  | 5.19 ± 0.19 <sup>a</sup> |
| 12        | 0.79 ± 0.07 <sup>a</sup> | 3.36 ± 0.26 <sup>b</sup> | 34.59 ± 5.29 <sup>a</sup>  | 18.58 ± 1.98 <sup>b</sup>  | 64.45 ± 2.63 <sup>a</sup> | 4.05 ± 0.42 <sup>a</sup> |
| 16        | 0.72 ± 0.06 <sup>a</sup> | 4.24 ± 0.35 <sup>a</sup> | 40.06 ± 8.76 <sup>a</sup>  | 22.12 ± 1.26 <sup>ab</sup> | 65.43 ± 2.63 <sup>a</sup> | 4.84 ± 1.01 <sup>a</sup> |

注：A 为各峰面积与总积分面积的比。

在面团中，淀粉颗粒嵌入面筋蛋白网络中，形成一种复合基质，过高的 D-阿洛酮糖添加量（16% 组）可能会导致分子间的交联作用过强，出现了面筋网络过于紧密的现象，这种过度致密化可能对面团加工特性产生负面影响。通过面团发酵特性分析发现，16% 组面团的发酵体积显著低于其他组（ $P<0.05$ ），产气量不足，气室结构未能充分形成，面筋网络未被充分拉伸和扩展，加剧结构密实化。另外有研究表明，面团网络结构的紧密性也可能是由于面筋网络在受力时表现出的抵抗变形的能力较低、结构刚度不足，而引发气泡形态畸变和聚并的现象<sup>[33]</sup>。Wang 等<sup>[19]</sup>研究也表明，D-阿洛酮糖的加入增强了小麦淀粉体系的结构密度。电镜分析结果进一步证实，4%~12% D-阿洛酮糖可以帮助面筋形成连续且致密的网络结构，增强面团结构的稳定性和连续性，而 16% 添加组虽未破坏网络连续性，但导致非功能性致密化，可能制约面团加工适性。

2.1.5 D-阿洛酮糖添加量对面团水分分布的影响

低场核磁共振（LF-NMR）技术可表征面团中水分的存在状态与面团内部水分含量，这些水分与面筋蛋白相互作用对面团加工性能与终产品品质至关重要。其中  $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{23}$  数值大小表示水分的流动性强弱（ $T$  值越小，水分束缚越强），分别对应深层结合水、弱结合水和自由水；而三个区域的峰面积（ $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 、 $A_{23}$ ）表征不同形态水分的含量。

由表 5 可知，随 D-阿洛酮糖添加量增加， $T_{21}$  和  $T_{22}$  呈现先升高后降低趋势，而  $T_{23}$  呈下降趋势且与对照组无显著性差异（ $P>0.05$ ）。这表明 D-阿洛酮糖对深层结合水和自由水的流动性无显著影响（ $P>0.05$ ）。当添加量为 12% 时， $T_{22}$  值显著低于对照组（ $P<0.05$ ），表明该组面团中弱结合水的水分流动性最弱，水分与其他组分的结合更为紧密，面团持水性显著增强，这可能与 D-阿洛酮糖增强了水分与面团基质（如蛋白质、淀粉）的结合能力有关。随着 D-阿洛酮糖添加量的增加， $A_{21}$  先升高后降低， $A_{22}$  先降低后升高，说明 D-阿洛酮糖影响了深层结合水和弱结合水的分布，部分深层结合水向弱结合水转移。 $A_{22}$  的占比至少在 57.57%， $A_{23}$  的占比最高达 5.19%，说明面团中的水分主要以弱结合水形式存在，自由水占比相对较低，D-阿洛酮糖添加量对自由水的含量无显著影响（ $P>0.05$ ）。添加量为 12% 时， $A_{21}$  较对照组显著降低 51.7%（ $P<0.05$ ）， $A_{22}$  则升高 4.8%。这是由于 D-阿洛酮糖分子中的酮基和羟基均属于极性基团，既能通过氢键固定水分子，又具备良好的水相溶解特性，因此在该添加量下表现出更强的水分子亲和能力。适量添加时，D-阿洛酮糖通过削弱水分子与面筋蛋白、淀粉颗粒的结合强度，促使水分从面筋区向淀粉区迁移，最终形成与糖分子的紧密结合，从而改变水分分布状态并提升面团的持水能力<sup>[34-36]</sup>。Ilhan 等<sup>[37]</sup>也表明，在糖果制作中，D-阿洛酮糖与蔗糖相比，可以在凝胶网络中保持更多的

水，且 D-阿洛酮糖与蔗糖的混合使用可以提高产品的吸湿性和质构特性，这可能与 D-阿洛酮糖和蔗糖复配能够发生协同效应有关。

2.2 D-阿洛酮糖添加量对面包感官品质的影响

由面包感官品质评价表（见表 6）可知，随 D-阿洛酮糖添加量增加，面包感官评价的各项指标与总评分皆呈先升高后下降趋势，D-阿洛酮糖添加量为 8% 时，综合感官评分最高，品质达最优。当添加量在 0%~8% 时，面包外观评分组间未呈现显著差异 ( $P>0.05$ )。0%~12% 组的面包体积差异不明显，面包的体积在 8% 时略大，但 16% 组面包体积明显缩小，但表面褶皱相对减少且表皮光滑度略微提升。面包色泽随 D-阿洛酮糖添加量的增加逐渐加深（见图 4），8% 与 12% 添加量组色泽得分显著高于其它组 ( $P<0.05$ )，这是由于 D-阿洛酮糖为还原糖<sup>[38]</sup>，较蔗糖更易发生美拉德反应，而使焙烤颜色加深，但 16% 组颜色过深使其可接受性降低。面包质地的感官评分在 0%~12% 添加量组间无显著差异 ( $P>0.05$ )，16% 组显著低于其它组 ( $P<0.05$ )，说明 D-阿洛酮糖的添加可使面包内部结构逐渐变得细腻，但过高的 D-阿洛酮糖会导致面包质地坚硬、弹性差。这可能由于 D-阿洛酮糖的添加降低了小麦粉的糊化温度，使面团粘度增加加剧，限制了气泡的膨胀，从而使面包体积变小、质地变硬<sup>[39]</sup>。4%~12% 组面包纹理结构得分显著高于对照组 ( $P<0.05$ )，添加 D-阿洛酮糖的面包孔隙细小且分布均匀，呈海绵状，显著减少了大孔洞和气泡缺陷。16% 组面包纹理结构得分最低，过高的添加量不利于面团发酵，进而使面包内部气孔过于致密且气孔较小。0%~12% 组面包风味口感得分组间无显著差异 ( $P>0.05$ )，而 16% 组显著低于对照组 ( $P<0.05$ )。D-阿洛酮糖促进了美拉德反应，产生更多令人愉悦的香气，蔗糖的存在也增加了面包焦糖风味，使风味更加丰富；16%D-阿洛酮糖的添加可能会导致美拉德反应（非酶促褐变）产生的高浓度己醛和苯甲醛对面

包香气产生负面影响<sup>[40]</sup>，口感变差。Xiao 等<sup>[41]</sup>研究表明，适量的 D-阿洛酮糖替代蔗糖会使面包结构均匀，外壳颜色与全糖面包相似，同时促进挥发性化合物的产生，增加醛类、酯类及杂环化合物的丰度，丰富水果和烘焙香气。

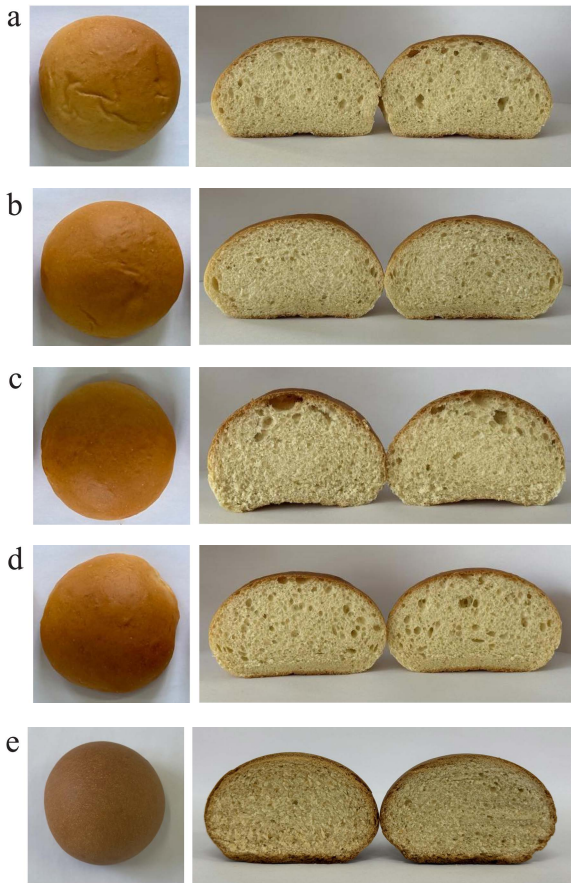


图 4 不同添加量的 D-阿洛酮糖面包外观及内部结构图片  
Fig.4 Diagram of the appearance and internal structure of different levels of D-allulose bread

D-阿洛酮糖与蔗糖复配可以改善面包的色泽和纹理结构，具有和蔗糖面包相当的外观和质地，提升面包风味；单独使用 D-阿洛酮糖使面包的颜色过深，质地过于细腻，口感偏硬不松软，适口性下降。

表 6 D-阿洛酮糖添加量对面包感官评分的影响

Table 6 Changes in the amount of D-allulose added to the dough moisture distribution

| 阿洛酮糖<br>添加量/% | 外观形态（30 分）                | 色泽（10 分）                 | 质地（15 分）                  | 纹理结构（25 分）                | 风味口感（20 分）                | 总得分（100 分）                |
|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0             | 29.5 ± 0.76 <sup>a</sup>  | 7.94 ± 0.32 <sup>b</sup> | 13.63 ± 0.35 <sup>a</sup> | 21.19 ± 0.26 <sup>b</sup> | 18.69 ± 0.65 <sup>a</sup> | 90.63 ± 1.06 <sup>b</sup> |
| 4             | 29.38 ± 0.74 <sup>a</sup> | 7.88 ± 0.44 <sup>b</sup> | 13.31 ± 0.46 <sup>a</sup> | 22.25 ± 1.58 <sup>a</sup> | 18.63 ± 0.44 <sup>a</sup> | 91.38 ± 2.22 <sup>b</sup> |
| 8             | 29.63 ± 0.52 <sup>a</sup> | 8.38 ± 0.52 <sup>a</sup> | 13.94 ± 0.42 <sup>a</sup> | 23.13 ± 0.79 <sup>a</sup> | 18.75 ± 0.53 <sup>a</sup> | 93.81 ± 1.41 <sup>a</sup> |
| 12            | 28.38 ± 1.06 <sup>b</sup> | 8.44 ± 0.42 <sup>a</sup> | 13.63 ± 0.58 <sup>a</sup> | 22.88 ± 1.25 <sup>a</sup> | 18.44 ± 0.56 <sup>a</sup> | 91.75 ± 1.39 <sup>b</sup> |
| 16            | 24.75 ± 0.89 <sup>c</sup> | 6.69 ± 0.53 <sup>c</sup> | 10.19 ± 0.88 <sup>b</sup> | 19.69 ± 0.46 <sup>c</sup> | 17.38 ± 0.44 <sup>b</sup> | 81.00 ± 1.51 <sup>c</sup> |

### 3 结论

D-阿洛酮糖对面团特性有显著影响, 4%~12% 的 D-阿洛酮糖添加量可显著改善面团粉质特性, 提高面团吸水率, 有利于面团的形成; D-阿洛酮糖不利于面团的发酵, 使面团发酵体积减小, 发酵时间延长, 8% 添加量时发酵 75 min 面团发酵体积才能达到与对照组无显著差别; D-阿洛酮糖可帮助面筋网络的形成, 使面筋网络结构更加致密, 增大了面团的硬度和胶粘性, 降低面团弹性; 12% 的 D-阿洛酮糖添加量显著影响面团中结合水与不易流动水的水的分布, 其中不易流动水的流动性最差。适量添加 D-阿洛酮糖替代部分蔗糖有利有面包感官品质的改善与保持, 全替代蔗糖则会引起面包的质地变硬, 缺乏弹性, 色泽过深等不利结果。在实际应用中, D-阿洛酮糖需严格控量(推荐 $\leq 8\%$ )并与蔗糖复配使用, 避免单独过量添加导致的发酵抑制与质构劣化。本研究为 D-阿洛酮糖在发酵及烘焙食品中的应用提供了理论参考依据, 但关于 D-阿洛酮糖与淀粉和蛋白的互作机理以及面包的血糖生成指数有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 吕彦茹.D-阿洛酮糖产生菌的筛选及其发酵条件的优化[D].南宁:广西大学,2012.
- [2] IIDA T, HAYASHI N, YAMADA T, et al. Failure of D-psicose absorbed in the small intestine to metabolize into energy and its low large intestinal fermentability in humans [J]. *Metabolism*, 2010, 59(2): 206-214.
- [3] ILHAN E, POCAN P, OGAWA M, et al. Role of 'D-allulose' in a starch based composite gel matrix [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 228: 115373.
- [4] IKEDA S, FURUTA C, FUJITA Y, et al. Effects of D-psicose on gelatinization and retrogradation of rice flour [J]. *Starch - Stärke*, 2014, 66(9-10): 773-779.
- [5] SUN Y, HAYAKAWA S, OGAWA M, et al. Antioxidant properties of custard pudding dessert containing rare hexose, D-psicose [J]. *Food Control*, 2007, 18(3): 220-227.
- [6] CHUNG MINYU C M, OH DEOKKUN O D, LEE KIWON L K. Hypoglycemic health benefits of D-psicose [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(4): 863-869.
- [7] RAKHAT Y, KANEKO K, WANG L, et al. D-allulose inhibits ghrelin-responsive, glucose-sensitive and neuropeptide Y neurons in the arcuate nucleus and central injection suppresses appetite-associated food intake in mice [J]. *Nutrients*, 2022, 14(15): 3117.
- [8] 徐康,隋松森,郭传庄,等.D-阿洛酮糖的生理功能及应用研究进展[J].*食品研究与开发*,2023,44(22):163-167.
- [9] 沈竞凯.一种D-阿洛酮糖的生产方法:中国,CN119019470A [P].2024-11-26.
- [10] 班清风.罗汉果共生酸奶降糖作用及机制研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
- [11] HONORIO A R, SOARES A F, DE LIMA D C N, et al. Passion fruit nectar sweetened with stevia and sucralose: Is perception affected by the regular consumption of sweeteners or diabetes [J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2021, 25: 100404.
- [12] 黄檀香,陈锦炫,李欣,等.D-阿洛酮糖曲奇饼干工艺优化及品质分析[J].*粮食科技与经济*,2024,49(1):97-101.
- [13] SUN Y, HAYAKAWA S, OGAWA M, et al. Influence of a rare sugar, D-psicose, on the physicochemical and functional properties of an aerated food system containing egg albumen [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(12): 4789-4796.
- [14] SAWETTANUN S. Effect of D-allulose on fermentation of bread dough, and physicochemical, and organoleptic properties of bread [D]. Ehime Prefecture: Ehime University, 2023.
- [15] LEE E J, MOON Y, KWEON M. Processing suitability of healthful carbohydrates for potential sucrose replacement to produce muffins with staling retardation [J]. *LWT*, 2020, 131: 109565.
- [16] LEE P, OH H, KIM S Y, et al. Effects of D-allulose as a sucrose substitute on the physicochemical, textural, and sensorial properties of pound cakes [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(6): e14472.
- [17] POCAN P, ILHAN E, OZTOP M H. Effect of D-psicose substitution on gelatin based soft candies: A TD - NMR study [J]. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 2019, 57(9): 661-673.
- [18] O'CHAROEN S, HAYAKAWA S, MATSUMOTO Y, et al. Effect of D-psicose used as sucrose replacer on the characteristics of meringue [J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(12): E2463-E2469.
- [19] WANG Z, LV J, XIE D, et al. The effects of D-allulose on the gelatinization and gelling properties of wheat starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 282: 137326.
- [20] 陈永莹,曹家宝,王霞,等.甘油二酯对面团特性及面包品质的影响[J].*食品与发酵工业*,2024,50(18):107-14.
- [21] 彭博.糖醇类物质对面团特性及面包品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [22] 杨玉玲.作用力方式和醒发过程对面团特性及面条品质影响机理研究[D].郑州:河南工业大学,2022.
- [23] 吴诗敏.甘油二酯基人造奶油的制备及其在烘焙食品中的应用研究[D].广州:华南理工大学,2022.
- [24] 申慧珊.面团加工过程中小麦A、B淀粉影响面筋蛋白结构转变的机制研究[D].无锡:江南大学,2023.
- [25] MORRIS C, MORRIS G A. The effect of inulin and fructo-oligosaccharide supplementation on the textural, rheological and sensory properties of bread and their role in weight management: A review [J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(2): 237-248.
- [26] 雷雅男,谢东东,谢岩黎.不同糖源对酵母生长及糖利用的影响[J].*河南工业大学学报(自然科学版)*,2020,41(1):65-71.
- [27] SAWETTANUN S, OGAWA M. Influences of rare sugar D-allulose on the fermentation ability of baker's yeast and the physical properties of bread [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(9): 6004-6015.
- [28] SAWETTANUN S, OGAWA M. Physicochemical parameters, volatile compounds and organoleptic properties of bread prepared with



- substituted sucrose with rare sugar D-allulose [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(9): 5931-5942.
- [29] WALL JS, FRIEDMAN M, KRULL LH, et al. Chemical modification of wheat gluten proteins and related model systems [J]. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1968, 24(1): 147-161.
- [30] BOLGER A M, RASTALL R A, ORUNA-CONCHA M J, et al. Effect of D-allulose, in comparison to sucrose and D-fructose, on the physical properties of cupcakes [J]. *LWT*, 2021, 150: 111989.
- [31] RAYMENT I. Reductive alkylation of lysine residues to alter crystallization properties of proteins [J]. *Methods Enzymol*, 1997, 276: 171-179.
- [32] 索文静.甘薯生浆对面团加工特性及面包品质的影响研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
- [33] ORTOLAN F, STEEL C J. Protein characteristics that affect the quality of vital wheat gluten to be used in baking: A review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017, 16(3): 369-381.
- [34] 盛益凡,马志敏,蔡克周,等.水溶性半纤维素抑制馒头中淀粉消化与提升质构品质[J].*食品研究与开发*,2024,45(24):13-19.
- [35] CURTI E, BUBICI S, CARINI E, et al. Water molecular dynamics during bread staling by nuclear magnetic resonance [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(4): 854-859.
- [36] ZHU F. NMR spectroscopy of starch systems [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 611-624.
- [37] İLHAN E. Formulation and characterization of starch and soy protein containing low calorie soft candy [D]. Middle East Technical University (Turkey), 2019.
- [38] HU M, LI M, JIANG B, et al. Bioproduction of D-allulose: Properties, applications, purification, and future perspectives [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(6): 6012-6026.
- [39] LAMOTHE L M, LÊ K-A, SAMRA R A, et al. The scientific basis for healthful carbohydrate profile [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(7): 1058-1070.
- [40] MARTÍNEZ-ANAYA M A. Enzymes and bread flavor[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(9): 2469-2480.
- [41] XIAO Z, WU S, LIANG H, et al. Effects of oligosaccharides, sodium carboxymethyl cellulose and D-allulose as a compound improver on the quality of sugar-reduced bread [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, 208: 116163.