

D-阿洛酮糖面包的制作工艺优化及其储藏特性分析

姚佳欣¹, 马宏旭¹, 刘世杰¹, 王雅诗¹, 李志江¹, 汤华成^{1,2}, 张洪微^{1*}

(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: 为开发控糖低热量的面包, 以 D-阿洛酮糖替代部分蔗糖, 优化其加工工艺并分析储藏特性。采用正交试验设计, 以感官评分为主要指标, 结合硬度、比容等质构特性优化工艺参数; 通过储藏期间硬度、失水量及热力学指标, 评价不同添加量 (0 wt.%、4 wt.%、8 wt.%、12 wt.%、16 wt.%) D-阿洛酮糖对面包老化的影响。研究表明: 最优工艺条件为 D-阿洛酮糖添加量 8%、和面时间 20 min、发酵温度 34 °C、发酵时间 90 min, 此条件下制得的面包硬度适中、弹性良好, 比容适宜、口感松软, 感官评分达 84.20 分。储藏试验显示, 随 D-阿洛酮糖添加量增加, 面包硬度增长倍数、失水率及淀粉回生焓值均降低。8%添加量在保持良好感官品质的基础上, 储藏第 7 d 硬度增长倍数优于对照组; 储藏期间 16%组面包硬度的增长幅度最低, 失水率较对照组减少 17.6%, 热焓值降低 30.86%, 抑制老化作用最为显著, 但初始硬度较高、感官品质较差。综合面包品质与延缓老化效果, 8%添加量能实现更好的平衡。为 D-阿洛酮糖在烘焙食品中的应用提供了工艺参考与数据支持。

关键词: D-阿洛酮糖; 面包; 工艺优化; 储藏特性; 抗老化

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.5.0431

Optimization of D-allulose Bread Processing and Analysis of Its Storage Characteristics

YAO Jiaxin¹, MA Hongda¹, LIU Shijie¹, WANG Yashi¹, LI Zhijiang¹, TANG Huacheng^{1,2}, ZHANG Hongwei^{1*}

(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 develop a low-calorie bread suitable for glycemic control, D-allulose was used as a partial replacement for sucrose. The processing technology was optimized and the storage characteristics were analyzed using an orthogonal experimental design. Sensory evaluation served as the primary response, while textural properties including hardness and specific volume were also considered. The anti-staling effects of D-allulose were assessed at addition levels of 0, 4, 8, 12, and 16 wt.% by monitoring hardness, water loss, and thermodynamic parameters (differential scanning calorimetry) during storage. The optimal processing conditions were determined as follows: D-allulose addition of 8%, mixing time of 20 min, proofing temperature of 34 °C, and proofing time of 90 min. Bread produced under these conditions exhibited moderate hardness, good springiness, appropriate specific volume, and a soft crumb texture, achieving a sensory score of 84.20. Storage tests revealed that the hardness increase multiple, water loss rate, and starch retrogradation enthalpy all decreased with increasing D-allulose levels. The 8% addition group maintained desirable sensory quality and showed a lower hardness increase multiple on day 7 compared with the control group. The 16% addition group showed the most significant anti-staling effect: it had the lowest increment in hardness, with the water loss rate reduced by 17.6% and the enthalpy value decreased by 30.86% compared with the control group. Nevertheless, bread in this group possessed higher initial hardness and inferior sensory quality. Considering both bread quality and anti-staling performance, the 8% addition level achieved the best balance. This study provides technical references and data support for the application of D-allulose in bakery products.

Key words: D-allulose; bread; process optimization; storage characteristics; anti-staling

蔗糖因其纯正的甜味、无不良后味以及烘焙中不可替代的功能性, 例如膨松性、保湿和着色, 成为食品工业的重要原料, 同时也是发酵过程中微生物的关键营养来源。然而, 蔗糖的高热量、高甜度与肥胖、龋齿、糖尿病

收稿日期: 2026-03-20; 修回日期: 2026-05-14; 接受日期: 2026-05-15

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

等代谢疾病相关联^[1], 不符合现代健康饮食需求。因此, 如何平衡降糖与产品质量, 是一个关键的问题。

D-阿洛酮糖是一种新型甜味剂, 因其热量低而具有良好的应用前景。该糖是一种与 D-果糖呈 C-3 差向异构关系的稀有酮己糖, 甜度约为蔗糖的 70%, 而能量值极低, 约 0.2 kcal g^{-1} ^[2], 且能够降低餐后血糖的升高速度和幅度^[3]。2025 年 6 月, D-阿洛酮糖已获中国国家卫健委批准为新食品原料, 为其在健康食品中的应用提供了法规依据^[4]。目前, 工业化生产主要通过特异性 D-塔格糖-3-差向异构酶催化 D-果糖实现^[5]。

现有研究表明, D-阿洛酮糖在烘焙体系中具有替代蔗糖的可行性, 但与替代比例密切相关。在面包中, 适当比例的替代可保持产品质构并改善色泽与风味, 但过量添加会导致硬度下降, 并引起口感、风味及外观品质变差^[6]; 在海绵蛋糕中, 当感官品质与物性指标均不低于全蔗糖对照组时, 最大替代比例为 50%^[7]; 在饼干中, 其效果低于蔗糖, 但优于果糖, 可作为替代品^[8]。然而, D-阿洛酮糖对酵母活性有一定抑制作用且膨松与着色能力不及蔗糖, 这可能导致面包质地变硬、比容下降和着色不足^[6-9], 但通过复配其他甜味剂或优化工艺参数, 可在一定程度上弥补缺陷^[10]。

在低糖消费需求日益增长的背景下, 以小麦粉为原料, 采用二次发酵工艺, 复配 D-阿洛酮糖与蔗糖进行面包配方优化。在单因素试验基础上, 结合正交试验设计, 系统考察了 D-阿洛酮糖添加量、和面时间、发酵温度及发酵时间对面包品质的影响, 确定了最佳工艺参数。采用质构分析 (TPA)、差示扫描量热法 (DSC) 及水分流失率测定等技术, 系统分析了 D-阿洛酮糖对面包质构特性、感官品质及储藏期间老化行为的影响规律, 为 D-阿洛酮糖在面包生产中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

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 $18.3 \text{ g}/100 \text{ g}$ 、灰分 $0.8 \text{ g}/100 \text{ g}$), 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; 蔗糖 (分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; 上述均为食品级。

1.2 主要仪器与设备

DLA-24 志高烤箱, 佛山市妙铨科技有限公司; KVL4100S 厨师机, 英国 Kenwood 公司; JW-LC36 冷藏发酵箱, 无锡联合纬创机械有限公司; TMS-PRO 质构仪, 美国 FTC 公司; Alpha1-4-LSCbasic 冻干机, 日本 Kubota 公司; 美国 TA 差示扫描量热仪 DSC25, 瑞科和利 (北京) 科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 面包制作工艺

采用二次发酵法制作面包, 面包的工艺流程见图 1。

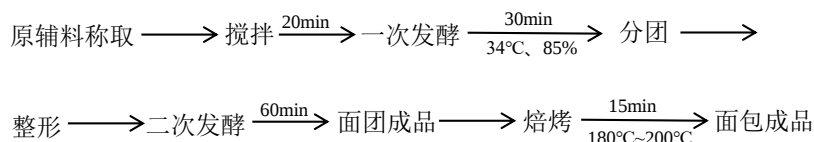


图 1 D-阿洛酮糖面包工艺流程图

Fig.1 D-allulose bread production process

- (1) 混合干料: 以 100 g 小麦面粉为基准, 称取食盐 1.5% 、酵母 1.4% 、D-阿洛酮糖和蔗糖。
- (2) 加水: 向混合粉中加入纯净水, 加水量为小麦粉吸水率的 80% 。
- (3) 搅拌: 先低速 (1 档) 搅打 2 min , 后高速 (3 档) 搅打 18 min 。
- (4) 一次发酵: 将面团置于发酵箱 (34°C , $85\% \text{ RH}$) 中发酵 30 min 。
- (5) 分割: 将面团分割为 $60 \text{ g}/\text{个}$ 。
- (6) 揉圆: 手动揉圆。

- (7) 二次发酵：置于发酵箱（34℃，85% RH）中发酵 60 min。
- (8) 烘烤：上火 200℃、下火 180℃，烘烤 15 min。
- (9) 冷却：面包置于网架上，室温下冷却 1 h。
- (10) 得到待测样品：冷却后的面包即为待测样品，密封保存备用。

1.3.2 面包的工艺优化试验设计

1.3.2.1 单因素试验

通过单因素试验优化 D-阿洛酮糖面包的工艺参数。参考王心乐^[11]的方法并稍作修改。基础配方以小麦粉质量为基准：酵母 1.4%、食盐 1.5%，加水量为小麦粉吸水率的 80%，甜味剂（D-阿洛酮糖+蔗糖）总量固定为 16%。试验设计见表 1，以面包的硬度、弹性、比容、高径比及感官评分作为评定指标，每个处理重复 3 次。考察某一因素时，其他因素固定如下：D-阿洛酮糖添加量 8%、蔗糖添加量 8%、发酵温度 34℃、发酵时间 90 min、和面时间 15 min。

表 1 单因素试验设计

Table 1 Design of single-factor experiment

水平	D-阿洛酮糖添加量/% (蔗糖添加量/%)	发酵温度/℃	发酵时间/min	和面时间/min
1	0 (16)	26	30	5
2	4 (12)	30	60	10
3	8 (8)	34	90	15
4	12 (4)	38	120	20
5	16 (0)	42	150	25

1.3.2.2 正交试验

在单因素试验的基础上，以发酵温度、发酵时间、和面时间、D-阿洛酮糖添加量这四个因素为自变量，以感官评分为评定指标，设计 $L_9(3^4)$ 正交试验表，确定面包的最佳工艺，试验结果用平均值表示，正交因素与水平设计见表 2。

表 2 正交因素与水平设计

Table 2 Orthogonal factors and horizontal design

水平	A 和面时间/min	B 发酵时间/min	C 发酵温度/℃	D D-阿洛酮糖添加量/%
1	15	60	30	4
2	20	90	34	8
3	25	120	38	12

1.3.3 面包储藏试验

采用 1.3.2 节单因素试验优化的最佳工艺参数制作 D-阿洛酮糖面包。面包储藏试验的 D-阿洛酮糖与蔗糖添加量见表 1。将制作好的面包在室温下密封保存，分别于第 1、3、5、7 d 进行测定，考察储藏期间面包品质的变化规律。

1.3.4 面包品质评定方法

1.3.4.1 面包感官评定

参照国家标准 GB/T20981-2021《面包质量通则》中 5.1 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，期间以纯净水漱口。具体评分标准见表 3。

表 3 感官评分表

Table 3 Sensory score comparison

项目	评分标准	分值
外观形态（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
	表面呈金黄色、无斑点	8~10

色泽 (10 分)	上色均匀、光泽稍暗	5~7
	无光泽、有较多斑点	<5
质地 (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 (25 分)	面包气孔致密分布, 气孔径壁呈海绵状	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 (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

1.3.4.2 面包高径比和面包比容的测定

使用游标卡尺测量面包的高度与直径, 记录数据并计算高径比。面包比容测定采用小米置换法, 该方法原理参照 GB/T21118-2007《小麦粉馒头》附录 A 规定的菜籽置换法, 以小米替代菜籽作为填充剂, 具体步骤如下: 将面包样品置于 500 mL 量筒中, 填入小米并摇晃以确保密实填充, 用刮板刮平筒口。随后取出面包, 读取量筒内剩余小米的体积。最后, 使用电子天平称量面包质量, 记为 m (g), 并按公式 (1) 计算面包比容。

$$P = \frac{V_1 - V_2}{m} \quad (1)$$

式中:

P ——面包比容, mL g⁻¹;

V_1 ——容器体积, mL;

V_2 ——小米体积, mL;

m ——面包质量, g。

1.3.4.3 面包质构特性测定

采用质构分析 (TPA) 法测定面包的硬度与弹性, 方法在陈永莹等^[12]的基础上进行了调整。取面包中心部位, 切制成体积为 2 cm×2 cm×2 cm 的立方体作为测试样品。使用质构仪配备 12.7 mm 直径的圆柱型探头, 测试前、中、后速度统一为 60 mm min⁻¹, 压缩比为 70%, 起始力为 0.10 N, 两次压缩间隔 5 s。每个样品平行测定 8 次, 结果以平均值表示。

新鲜面包冷却 1 h 后立即进行质构测定。储藏期间硬度测定: 将面包样品置于敞口塑料袋中, 室温储藏, 分别于储藏后的 1 d、3 d、5 d 及 7 d 按上述方法测定硬度指标。

1.3.4.4 面包失水量测定

采用称量法测定面包在储藏期间的失水量。将面包样品置于敞口塑料袋中, 并在室温环境下进行储藏, 于储藏后的 1、3、5 及 7 d, 分别称量面包重量, 以初始重量为基准, 根据公式 (2) 计算各时间点的累计失水量。

$$\Delta M = M_1 - M_2 \quad (2)$$

式中:

ΔM ——储藏失水量, g;

M_1 ——表示烘焙后面包原重量, g;

M_2 ——表示储藏后重量, g。

1.3.4.5 面包老化回生特性的测定

参考吴昊^[13]方法并修改, 具体操作步骤如下: 取常温储藏 1、3、5 及 7 d 的面包, 切除表皮后取面包芯部分并切块, 于 -80 °C 条件下冷冻过夜, 随后转移至冻干机中冷冻干燥 48 h。将冻干样品研磨成粉, 并过 80 目筛, 得到面包冻干粉。

精确称取上述面包冻干粉约 10 mg 置于离心管中, 加入 0.02 mL 蒸馏水, 密封后于室温下静置 12 h, 以确保糊化淀粉充分吸水回润。随后, 精确称取约 5 mg 水合后的湿样, 置于差示扫描量热仪 (DSC) 的样品坩埚中, 轻轻铺平, 加盖后使用压片机密封, 并标记编号。将所有密封好的样品在室温下平衡 15 min 后, 进行 DSC 测定。

DSC 测定参数设置如下: 升温范围 25~120 °C, 升温速率 5 °C min⁻¹, 氮气作为保护气, 流速为 20 mL min⁻¹。通过仪器软件分析热流曲线, 计算得到淀粉相变的起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、终止温度 (T_c) 及吸热焓值 (ΔH)。

1.4 数据处理

采用 IBMSPSSStatistics 27、GraphPadPrism 9 和 Origin 21 对数据进行处理、差异显著性分析及图表绘制, 结果以平均值±标准差表示 (统一保留两位小数), 以 $P<0.05$ 为判定标准, 表示组间差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 D-阿洛酮糖面包的工艺优化

2.1.1 D-阿洛酮糖添加量对面包品质的影响

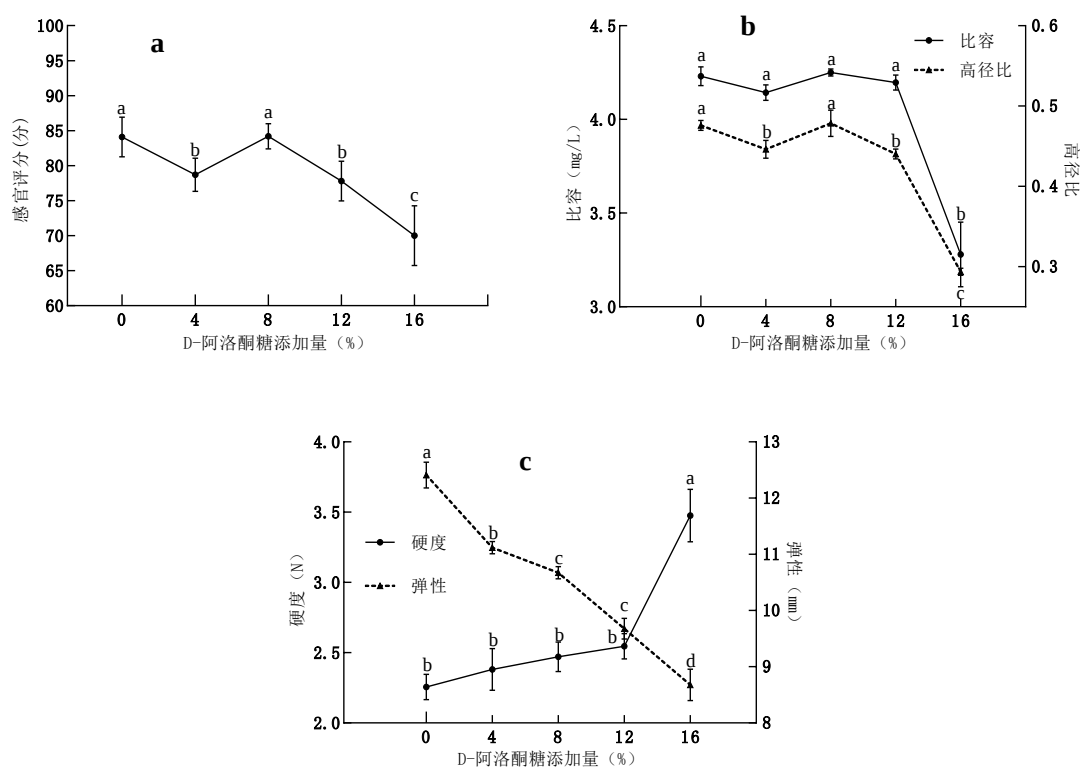


图 2 D-阿洛酮糖添加量对面包品质的影响

Fig.2 Effect of D-allulose addition level on bread quality

注: a 表示 D-阿洛酮糖添加量对面包感官评分的影响; b 表示 D-阿洛酮糖添加量对面包比容及高径比的影响; c 表示 D-阿洛酮糖添加量对面包硬度及弹性的影响。图中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下图同。

D-阿洛酮糖添加量对面包品质的影响如图 2 所示。随着 D-阿洛酮糖添加量的增加, 面包的感官评分、比容及高径比、弹性均呈下降趋势, 而硬度则呈上升趋势。

由图 2a 可知, 对照组的面包感官评分为 84.1 分; 添加量为 8% 时, 感官评分为 84.2 分, 与对照组无显著差异, 此时面包的甜味略低于对照组、体积略高于对照组; 添加量为 16% 时, 感官评分进一步降至 70.0 分, 显著低于对照组 ($P<0.05$), 此添加量下面包外观体积小、不够饱满, 内部质地密实, 发酵风味也因发酵不足而减弱, 整体甜味也不足。

由图 2b 可知, 对照组面包比容为 4.52 mL g⁻¹, 高径比为 0.68; 添加量 8% 时, 比容和高径比分别降至 4.21 mL g⁻¹ 和 0.62; 添加量 16% 时, 比容和高径比进一步分别降至 3.68 mL g⁻¹ 和 0.51。这是由于酵母的主要能量来源是可发酵糖, 而 D-阿洛酮糖难以被酵母高效利用^[14]。随着 D-阿洛酮糖添加量增加, 蔗糖添加量相对减少, 导致酵母产

气能力下降,进而使面包在发酵与烘烤过程中的膨胀力下降,表现为比容减小、高径比降低,这直接关联了后续质构特性的变化。

由图2c可知,对照组面包硬度及弹性分别为2.26 N和12.41 mm;添加量8%时,硬度升至2.47 N,弹性降至10.67 mm;添加量16%时,硬度进一步升至3.48 N,弹性降至8.68 mm,显著低于其他组($P<0.05$)。这归因于以下机制,首先,酵母无法高效利用D-阿洛酮糖作为碳源,随添加量增加,可发酵糖减少,产气不足直接导致面团膨胀力减弱,因而比容减小、高径比降低(图2b)。其次,不同糖类对淀粉糊化和面筋蛋白水合的调节作用存在差异。一方面,D-阿洛酮糖对淀粉糊化的抑制作用弱于蔗糖^[15],随蔗糖含量降低,烘烤过程中淀粉糊化更为充分,冷却后形成更坚实的凝胶网络;另一方面,D-阿洛酮糖的反水化作用弱于蔗糖,使面筋蛋白能更充分地吸水,形成强度更高、更致密的面筋三维网络^[10]。这两种效应叠加,进一步强化了面包芯的坚实结构,从而表现为硬度上升和弹性下降。本研究结果与Sawettanun等^[16]趋势一致,即蔗糖替代比例超过75%(约添加12% D-阿洛酮糖)时面包比容和感官品质显著下降。但本研究中8%添加量(文献中替代50%)时感官评分仍与对照组无显著差异,优于文献中同比例下的结果,差异可能与原料、工艺或糖来源有关,表明工艺优化可提升D-阿洛酮糖在面包中的适用比例。

综上所述,添加量在4%、8%、12%时的面包综合品质较为接近对照组,因此确定此三个水平作为后续正交试验的关键参数。

2.1.2 和面时间对D-阿洛酮糖面包品质的影响

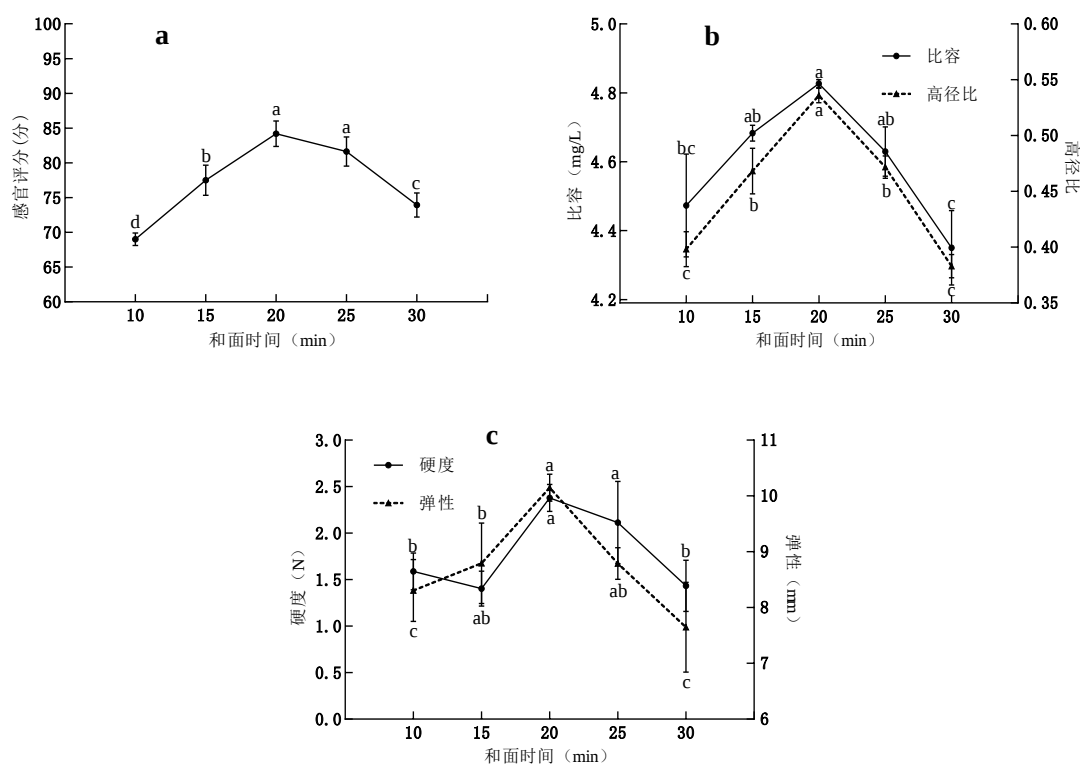


图3 和面时间对面包品质的影响

Fig.3 Effect of mixing time on bread quality

注: 图a表示和面时间对面包感官评分的影响; 图b表示和面时间对面包比容及高径比的影响; 图c表示和面时间对面包硬度及弹性的影响。

和面时间奠定了面包物理品质的基础,它能够决定面筋网络的初始强度与延展性,并最终影响面团的持气潜能与成品的口感质地。和面时间对面包品质的影响如图3所示。随着和面时间的增加,面包的感官评分、比容及高径比、硬度及弹性均呈先上升后下降的变化规律。

由图3a可知,和面时间10 min时,面包感官评分为69.00分;和面时间15 min时,感官评分升至77.50分;和面时间20 min时,感官评分达到峰值84.20分;和面时间25 min时,感官评分略有下降至81.60分,与20 min

时无显著差异；和面时间 30 min 时，感官评分降至 73.90 分。当和面时间较短（10 min）时，面筋蛋白未能充分展开与交联，网络结构强度不足，面团持气性差，烤出的面包内部气孔与色泽分布不均，外观不够饱满，整体品质较差。随着和面时间延长至 15~25 min，面筋网络逐渐达到最佳扩展状态，面包外观饱满、内部结构均匀细腻、口感松软，感官评分维持在较高水平。当和面时间过长（30 min）时，过度机械作用破坏已形成的面筋网络，可能与面筋蛋白的过度水合和断裂有关，导致面包出现塌陷、大气孔及组织粗糙化等问题，感官评分下降。

由图 3b 可知，和面时间 10 min 时，面包比容为 4.47 mL g^{-1} ，高径比为 0.398；和面时间 20 min 时，比容及高径比分别升至 4.83 mL g^{-1} 和 0.54；和面时间 30 min 时比容及高径比分别降至 4.35 mL g^{-1} 和 0.383。15 min、20 min 和 25 min 三组间的比容无显著差异，但均显著高于 30 min 组（ $P < 0.05$ ）。短时搅拌（10 min）导致面筋网络发育不足，面团持气性差，在发酵和烘烤过程中难以有效保留气体，导致面包体积偏小（比容下降）、向上隆起高度不足（高径比下降）。随着和面时间延长至 15~25 min，面筋网络充分扩展，持气能力增强，面包体积显著增大、形态饱满。搅拌过度（30 min）导致面筋网络被破坏，面团持气能力急剧下降，面包内部结构支撑力丧失，出现塌陷，比容与高径比随之降低，同时外观与内部质地的感官评价得分也降低^[17]。

由图 3c 可知，搅拌初期（10 min）时，面包硬度为 1.59 N，弹性为 8.31 mm，面筋网络未充分形成；和面 20 min 时，硬度及弹性分别升至 2.38 N 和 10.15 mm，面筋逐渐强韧；和面 30 min 时，硬度及弹性分别降至 1.43 N 和 7.65 mm，面筋断裂。在 15~25 min 时，三组弹性组间无显著差异。弹性随面筋网络从弱到强而上升，网络破坏后下降。硬度及弹性变化与比容及高径比密切相关：适度搅拌时面筋网络支撑体积膨发，赋予适宜质构；搅拌不足或过度则体积缩小或塌陷，质构劣变^[18]。

综上所述，和面时间在 15、20、25 min 时，面包综合品质较为优异，因此确定此三个水平作为后续正交试验的关键参数。

2.1.3 发酵温度对 D-阿洛酮糖面包品质的影响

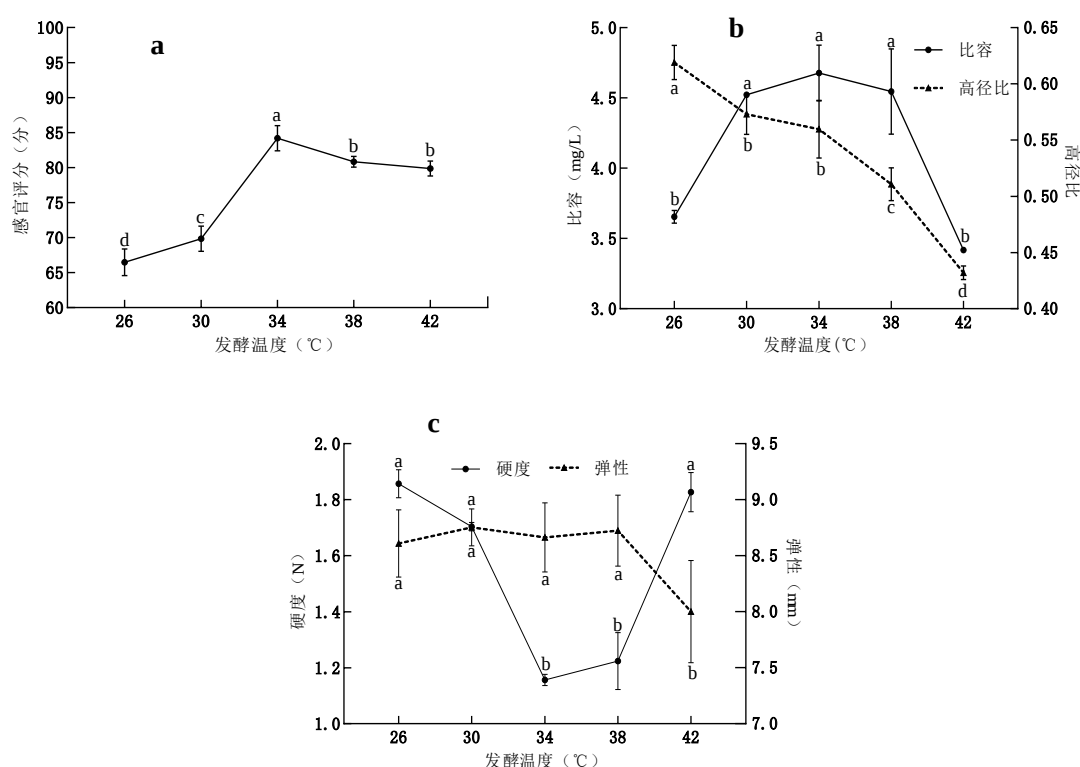


图 4 发酵温度对面包品质的影响

Fig.4 Effect of dough proofing temperature on bread quality

注：图 a 表示发酵温度对面包感官评分的影响；图 b 表示发酵温度对面包比容及高径比的影响；图 c 表示发酵温度对面包硬度及弹性的影响。

发酵温度奠定了面包风味与质地的发酵基础，它直接决定了酵母的产气能力和面团持气能力，并最终影响面

筋网络结构的形成与面包的整体质量^[19]。发酵温度对面包品质的影响如图4所示。随着发酵温度的升高,面包的感官评分和硬度均呈先上升后下降的趋势,弹性先下降后上升,比容先增大后减小,而高径比则持续下降。

由图4a可知,发酵温度26℃时,面包感官评分为66.5分,此时酵母活性不足,发酵不充分,面包体积小、结构紧实,品质较差;30℃时升至69.8分,酵母活性略有增强但仍偏低;34℃时达到峰值84.2分,此温度下酵母产气与面筋持气达到最佳平衡,面包外形饱满、气孔细密、香气良好,感官评分显著高于其他各组($P<0.05$);38℃时降至80.8分,42℃时进一步降至79.9分。温度过高导致酵母产气过快、面筋网络过度拉伸甚至断裂,发酵过度,面包塌陷、组织粗糙,感官评分下降。

由图4b可知,发酵温度26℃时,面包比容及高径比分别为3.65 mL g⁻¹和0.62,此时温度较低,产气不足,所以比容偏小;34℃时,比容升至4.68 mL g⁻¹,此时产气旺盛且面筋扩展适度,比容达峰值,但高径比降至0.56;42℃时,比容降至3.42 mL g⁻¹,温度较高导致面筋软化或断裂,气体逸散,比容减小,随之高径比降至0.43,面包呈扁平状,外观评分因此降低。比容和高径比共同决定了面包的外观形态。随着温度升高,面筋蛋白逐渐软化、流动性增强,面团更容易向四周摊展而非向上膨胀,导致高径比持续下降。

由图4c可知,发酵温度26℃时,面包硬度及弹性分别为1.86 N和8.61 mm,低温导致发酵不足,结构偏松散,所以硬度较低;34℃时,硬度进一步降至1.16 N,此时面团充分膨胀,面包更蓬松,弹性也略升至8.66 mm;42℃时,硬度回升至1.83 N,高温导致面团过度发酵或面筋变性,组织变粗糙,弹性降至8.00 mm。26~38℃弹性组间无显著差异,弹性的变化与面筋网络状态有关,低温下面筋形成不充分但未过度伸展,弹性尚可,而42℃时弹性显著降至8.00 mm($P<0.05$),这是由于温度过高导致面筋蛋白部分变性,网络结构被破坏。硬度及弹性与比容及高径比关系密切,适宜温度下,体积膨胀支撑了均匀的内部结构,赋予面包适中的硬度和弹性,温度不当则导致质构劣变^[20]。

综上所述,发酵温度在30、34、38℃时,面包综合品质较为优异,因此确定此三个水平作为后续正交试验的关键参数。

2.1.4 发酵时间对D-阿洛酮糖面包品质的影响

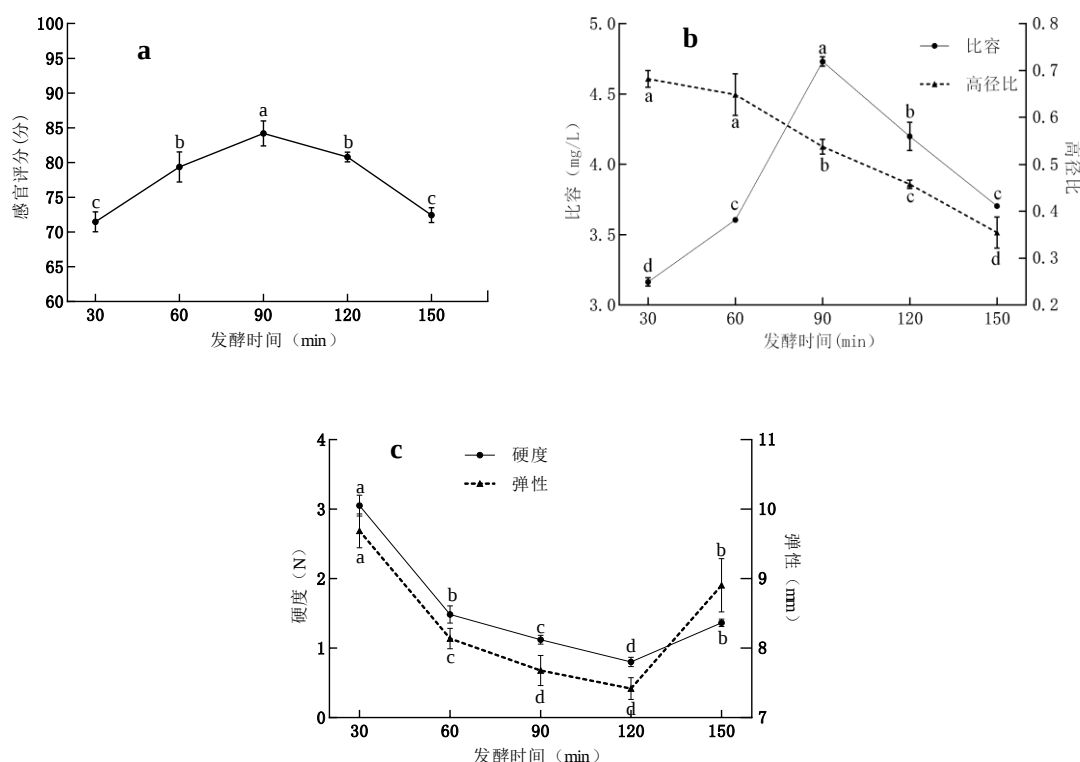


图5 发酵时间对面包品质的影响

Fig.5 Effect of dough fermentation time on bread quality

注: 图a表示发酵时间对面包感官评分的影响; 图b表示发酵时间对面包比容及高径比的影响; 图c表示发酵时间对面包硬度

及弹性的影响。

发酵时间奠定了面筋网络与发酵风味形成的基础，它决定了面筋网络与发酵风味的熟成程度，并影响面包的组织质地与整体体积^[21]。发酵时间对面包品质的影响如图 5 所示。随着发酵时间的延长，面包的感官评分和比容均呈先上升后下降的趋势，高径比逐渐降低，硬度和弹性呈先下降后上升的趋势。

由图 5a 可知，发酵 30 min 时，面包的感官评分为 71.50 分；60 min 升至 79.40 分；90 min 时最高（84.20 分），显著高于其他组（ $P<0.05$ ），此时面包表皮金黄完整，无褶皱斑点，内部组织细腻平滑，口感最佳。到 120 min 时评分降至 80.80 分，150 min 进一步掉到 72.40 分，这是由于发酵时间过长，酵母产气能力衰退，面筋网络因过度延伸而弱化，面包塌陷，内部孔洞也变得混乱。

由图 5b 可知，发酵时间 30 min 时，面包比容及高径比分别为 3.16 mL g^{-1} 和 0.68，此时酵母产气量有限，面团膨胀不足；90 min 时，比容升至 4.73 mL g^{-1} ，显著高于其余组别（ $P<0.05$ ），高径比降至 0.54，此时酵母产气量与面筋网络持气能力达到良好平衡，面团充分膨胀；150 min 时，比容及高径比分别降至 3.70 mL g^{-1} 和 0.35，发酵时间过长导致面筋网络弱化，持气能力下降，气体逸散。高径比的持续降低是由于面筋蛋白在长时间发酵过程中逐渐软化，面团流动性增强，更易向四周摊展而非向上膨胀，这与前述发酵温度的影响规律类似，酵母在适宜的时间条件下才能充分发挥活性。

由图 5c 可知，发酵 30 min 时，面包硬度及弹性分别为 3.05 N 和 9.69 mm，这个阶段发酵时间短，面团尚未充分扩展，结构偏紧实，所以硬度较高。发酵 90 min 时，硬度降至 1.12 N，面团充分膨胀，内部结构均匀致密，弹性反而降到 7.68 mm。发酵 120 min 时，硬度及弹性持续降至 0.80 N 和 7.42 mm，均显著低于其他组（ $P<0.05$ ）。150 min 时，硬度及弹性均回升至 1.37 N 和 8.90 mm，发酵时间太长，面筋被过度拉伸而变弱，组织变粗糙。整体来看，硬度和弹性随着发酵时间延长都是先降后升，这正好反映了面筋网络从逐渐形成到过度延伸的动态过程^[22]。

综上所述，发酵时间在 60、90、120 min 时，面包综合品质较为优异，因此确定此三个水平作为后续正交试验的关键参数。

2.1.5 正交试验结果与分析

正交试验结果见表 4，最优工艺验证试验结果见图 6。

表 4 正交试验结果与分析

Table 4 Orthogonal experimental results and analysis

编号	因素与水平				感官评分/分
	A 和面时间/min	B 发酵时间/min	C 发酵温度/℃	D D-阿洛酮糖添加量/%	
1	1	1	1	1	73.06±0.60
2	1	2	2	2	82.08±0.78
3	1	3	3	3	70.02±0.65
4	2	1	2	3	73.43±0.55
5	2	2	3	1	78.74±0.74
6	2	3	1	2	79.35±0.64
7	3	1	3	2	70.42±0.67
8	3	2	1	3	76.81±0.57
9	3	3	2	1	77.92±0.76
K ₁	225.16	216.91	229.22	229.72	
K ₂	231.52	237.63	233.43	231.85	
K ₃	225.15	227.29	219.18	220.26	
k ₁	75.05	72.30	76.41	76.57	
k ₂	77.17	79.21	77.81	77.28	
k ₃	75.05	75.76	73.06	73.42	
R	2.12	6.91	4.75	3.86	

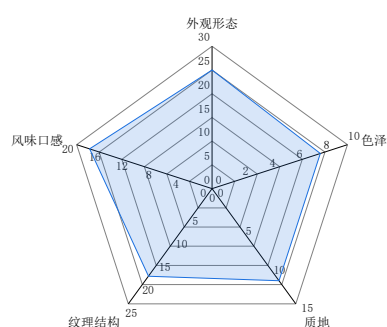


图6 最优工艺验证试验面包感官评分图

Fig.6 Sensory Score Chart of Bread from Optimal Process Validation Experiments

经极差分析得结果，影响面包品质的因素主次顺序为 B（发酵时间）>C（发酵温度）>D（D-阿洛酮糖添加量）>A（和面时间），最优工艺组合为 $A_2B_2C_2D_2$ ，即和面时间 20 min、发酵时间 90 min、发酵温度 34 ℃、D-阿洛酮糖添加量 8%。在此条件下进行验证试验（见图 6），感官评分三次重复试验的平均值为 84.20 ± 0.82 ，高于正交试验中各组的最高分（82.08 分），制得的面包外观饱满、体积适中、表皮呈金黄色泽、内部组织细腻均匀、孔隙细密、口感松软且富有弹性，具有典型的烘烤香气，可作为后续生产的最佳工艺参数。

2.2 储藏期间 D-阿洛酮糖添加量对面包品质的影响

2.2.1 储藏期间 D-阿洛酮糖添加量对面包硬度的影响

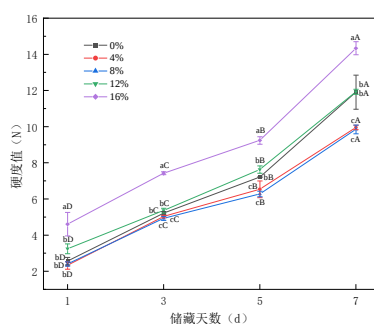


图7 储藏期间 D-阿洛酮糖添加量对面包硬度的影响

Fig.7 Effect of D-allulose Addition Level on Bread Hardness During Storage

注：小写字母表示同一储藏时间不同添加量之间差异显著（ $P < 0.05$ ）；大写字母表示同一添加量不同储藏时间之间差异显著（ $P < 0.05$ ）。

面包的硬度不仅是评判面包品质优劣的重要指标之一，也是反映面包老化程度的重要参数^[23]。贮藏期间淀粉回生与水分迁移会加速面包品质下降，表现为硬度上升的典型老化特征。

由图 7 可知，各组面包硬度随储藏时间和 D-阿洛酮糖添加量的变化呈现不同规律。从储藏时间维度看（同一添加量下）：各组面包硬度均随储藏时间延长而逐渐上升，且后期（5~7 d）增幅明显增大。储藏至第 3~7 d 时，各组硬度较第 1 d 均显著增加（ $P < 0.05$ ）。从添加量维度看（同一储藏时间下）：第 1 d 时，面包硬度随 D-阿洛酮糖添加量增加而逐渐上升，其中 4%~12% 组与对照组无显著差异，而 16% 组（ 4.61 ± 0.65 N）显著高于对照组（ $P < 0.05$ ）。第 3 d~7 d 时，面包硬度随添加量增加呈先降低后升高的规律：4% 和 8% 组始终显著低于对照组（ $P < 0.05$ ），12% 组与对照组无显著差异，16% 组（ 7.43 ± 0.08 N）则始终显著高于对照组（ $P < 0.05$ ）。整个储藏周期中，各组面包第 7 d 的硬度分别为第 1 d 的 4.7 倍（对照组）、4.27 倍（4% 组）、4.08 倍（8% 组）、3.67 倍（12% 组）和 3.11 倍（16% 组）。这表明，添加 D-阿洛酮糖的各组合硬化程度均低于对照组，且随着 D-阿洛酮糖替代比例的提高，延缓硬化的效果逐渐增强，呈现明显的剂量-效应关系。

D-阿洛酮糖对面包硬化的抑制作用主要归因于以下两方面：首先，D-阿洛酮糖具有较强的亲水性与持水能力，在面团中会与淀粉竞争水分，从而减少淀粉糊化所需的自由水，抑制淀粉分子链的重排与结晶^[24]；其次，D-阿洛酮糖作为一种小分子增塑剂，能够降低淀粉-蛋白质体系的玻璃化转变温度，使面包在储藏温度下更长时间维持在柔软的橡胶态，而非转变为坚硬的玻璃态^[25,26]。因此，在面包中添加 D-阿洛酮糖会显著降低储藏期的硬化速率，对保持面包新鲜口感、延长货架期具有积极影响。尽管单独使用 D-阿洛酮糖导致面包储藏前期硬度显著升高，但其能够抑制储藏期的质构劣变，未来可以考虑作为功能性添加剂，用来提高烘焙产品的储藏稳定性。本研究中，8%组在储藏第 7 d 的硬度增长倍数显著低于对照组 ($P<0.05$)，与 Hu 等^[10]在无糖面包中的研究结果相近。后者报道添加 7.5% D-阿洛酮糖可使 7 d 储藏期硬度增长倍数由 4.92 降至 4.21。而本研究 16%组表现出更强的抑制效果 (3.11 倍)，而文献中未对超过 10% 的添加量进行考察。

2.2.2 储藏期间 D-阿洛酮糖添加量对面包保水性的影响

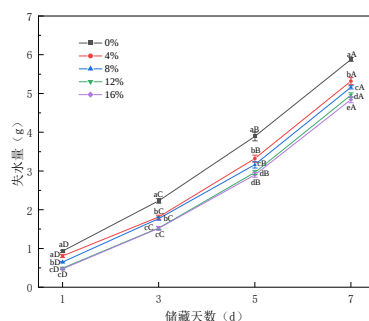


图 8 储藏期间 D-阿洛酮糖添加量对面包失水量的影响

Fig.8 Effect of D-allulose Addition Amount on Water Loss of Bread During Storage

注：小写字母表示同一储藏时间不同添加量之间差异显著 ($P<0.05$)；大写字母表示同一添加量不同储藏时间之间差异显著 ($P<0.05$)

水分保持能力是抑制面包品质劣变的关键因素，其含量变化会引发面包外观形态与质构特征的改变。由图 8 可知，从添加量维度看（同一储藏时间下），面包的失水量随着 D-阿洛酮糖添加量的增加逐渐降低，呈现剂量依赖性；从储藏时间维度看（同一添加量下），面包的失水量随着储藏时间的增加呈显著上升趋势 ($P<0.05$)。在储藏第 1~5 d 时，12%组与 16%组之间失水量差异不显著；储藏第 7 d 时，对照组失水量升至 5.88 g，显著高于 4%~16% 组 ($P<0.05$)。其中，16%组的失水量较对照组减少了 17.6%，且显著低于其他各添加组 ($P<0.05$)。在储藏初期 (1~3 d)，对照组的失水增量最大 (1.30 g)，在储藏后期 (5~7 d) 0%~12% 组的失水增量均为 2.00 g 左右，而 16%组为 1.94 g，略低于其他组。整个储藏期间 (1~7 d)，对照组的失水总增量为 4.95 g，16%组为 4.37 g 显著低于对照组，表明高添加量 D-阿洛酮糖能有效减缓储藏过程中水分的散失。这可能是由于 D-阿洛酮糖的分子结构与常见六碳糖（如葡萄糖、果糖）相似，但具有不同的立体化学构型，其羟基能够与水分子形成多位点氢键^[27]，从而增强面包的保水能力，提升抗老化性能，延长货架期。由于酵母无法代谢 D-阿洛酮糖，其大部分残留在面包基质中（对照组除外），持续发挥保水功能，且残留量越高保水效果越强，这与前文储藏期间面包硬度增长倍数的变化规律一致，均呈现出剂量-效应关系。失水量的减少与硬度增长倍数的降低呈现良好的一致性 (16% 组失水最少、硬度增长最慢)，进一步证实了 D-阿洛酮糖通过保水作用延缓面包老化的有效性。Xiao 等^[28]在减糖面包体系中以 D-阿洛酮糖作为复合改良剂组分的研究显示，其能实现更好的水分控制，延缓水分流失和淀粉回生，这直接佐证了 D-阿洛酮糖的保水机制。

2.2.3 储藏期间 D-阿洛酮糖添加量对面包热力学特性的影响

差示扫描量热法 (DSC) 是一种热分析技术，常用于研究面包中淀粉的回生。淀粉回生是一个热可逆过程，它会直接导致面包变硬、口感变差。在 DSC 测试中，回生后的淀粉在加热过程中会出现一个熔融吸热峰。该峰的焓值 (ΔH) 可以衡量淀粉重结晶的程度， ΔH 值越高，说明淀粉分子排列越有序，回生程度越严重；反之则回生程度越轻^[29]。

由图 9a~c 可知，从储藏时间维度看（同一添加量下），特征温度 (T_0 、 T_p 、 T_c) 均随储藏时间延长而升高，

说明回生过程中形成的晶体逐渐成熟稳定, 需要更高能量才能熔融。从添加量维度看(同一储藏时间下), T_0 、 T_P 、 T_C 均随 D-阿洛酮糖添加量的增加而逐渐降低, 说明 D-阿洛酮糖改变了淀粉的分子微环境, 使重结晶晶体在更低的温度下即可熔融, 所需能量减少, 从而导致 ΔH 值降低^[30]。

由图 9d 可知, 从储藏时间维度看(同一添加量下), ΔH 值随储藏时间延长而逐渐升高, 这说明淀粉回生程度越来越严重, 与储藏期间面包硬度变大的规律相符合。从添加量维度看(同一储藏时间下), ΔH 值随 D-阿洛酮糖添加量增加而逐渐降低, 呈剂量依赖性。所有添加组的 ΔH 值均小于对照组, 其中, 16%组的 ΔH 值在整个储存期内最低。储藏第 7 d, 16%组的 ΔH 值比对照组 (2.43 J/g) 降低了 30.86%, 说明添加 D-阿洛酮糖对面包的老化起到了一定的抑制作用。这可能归因于以下机制: 首先, D-阿洛酮糖具有较强的亲水性, 吸引体系中的游离水分子, 减少淀粉回生所需的水分, 从而抑制淀粉分子链的重排与结晶。其次, D-阿洛酮糖利用羟基基团与淀粉链之间的氢键作用打乱原有的排列方式, 增加晶格缺陷并且降低结晶度, 使得 ΔH 值降低。此外, D-阿洛酮糖进入淀粉分子之间, 妨碍直链淀粉和支链淀粉侧链的有序聚集, 减缓了回生时期晶核形成的速度。综合硬度、失水量和热焓值三项指标: 16%组虽然储藏初期硬度较高, 但其后期硬度增长倍数最低 (3.11 倍)、失水量最少 (较对照组减少 17.6%)、 ΔH 降幅最大 (30.86%), 三者共同证明 D-阿洛酮糖能有效抑制长期老化, 且呈剂量依赖性。

综上所述, D-阿洛酮糖通过调节淀粉的热力学参数, 显著抑制回生, 从而延长面包保鲜期。虽然 16%组在储藏初期硬度较高 (见图 7), 但后期老化抑制效果最佳, ΔH 降幅最大。所以从质构及长期抗老化角度, 8%~12%组能在保持良好初始口感与延缓老化之间实现更好的平衡。Ikeda 等^[30]在对米粉的研究中发现, 在米粉体系中也发现, 添加 5%的 D-阿洛酮糖可使 ΔH 值降低约 28%, 与本研究结果一致。

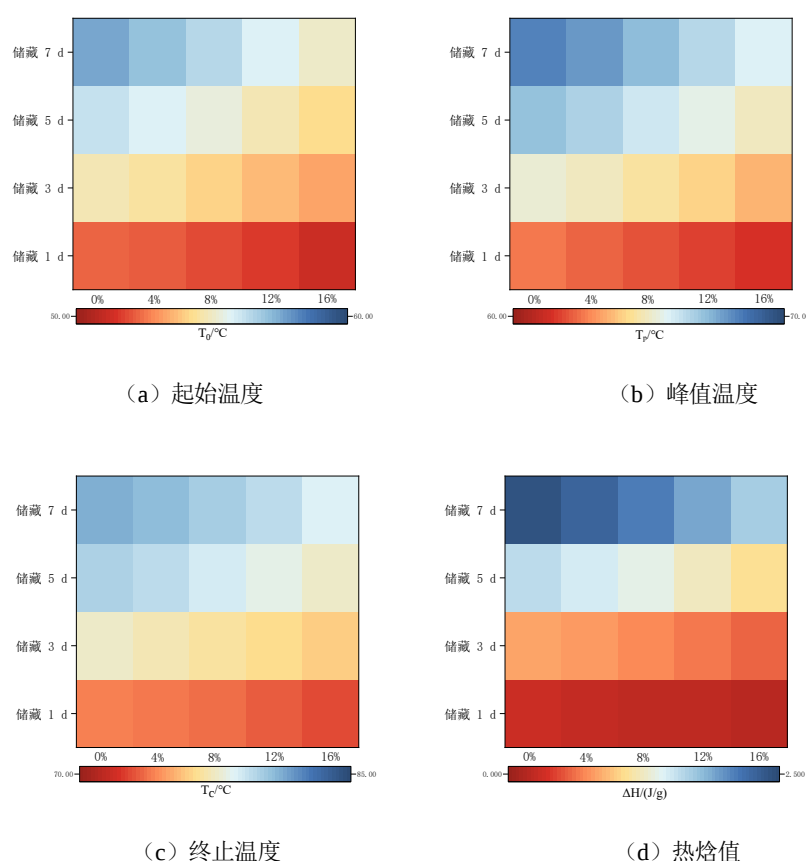


图 9 储藏期间 D-阿洛酮糖添加量对面包热力学特性的影响

Fig.9 Effect of D-allulose addition on thermal properties of bread during storage

3 结论

通过正交试验系统优化了 D-阿洛酮糖在面包制作中的添加量, 并确定了最佳工艺参数。D-阿洛酮糖添加量对面包品质具有显著影响: 随着添加量的增加, 面包的感官评分、比容和高径比呈下降趋势, 而硬度逐渐降低、弹

性有所上升。其中,8%添加量可在保持与对照组相当感官品质的同时,有效改善面包的质构特性。储藏试验显示,D-阿洛酮糖具有优异的抗老化特性,且效果呈剂量依赖性。随着替代比例的增加,抑制面包硬化的效果愈发显著:低添加量组(4%、8%)在储藏中后期硬度显著低于对照组,展现出良好的抗硬化效果;16%高添加量组的抑制效果最为显著,其硬度增长倍数显著低于其他组别。

综上所述,D-阿洛酮糖可替代部分蔗糖用于面包生产,综合考虑面包品质与长期抗老化效果,8%的添加量可在保持良好初始口感与有效延缓老化之间实现更好的平衡。为D-阿洛酮糖在烘焙体系中的应用提供了数据支撑。

参考文献

- [1] 田年寿,田丽铁.蔗糖和果糖在人体中易引起的疾病[J].商业科技,1991,5:9-10.
- [2] 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.
- [3] HAYASHI N, IIDA T, YAMADA T, et al. Study on the postprandial blood glucose suppression effect of D-psicose in borderline diabetes and the safety of long-term ingestion by normal human subjects [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2010, 74(3): 510-519.
- [4] 国家卫生健康委.关于 D-阿洛酮糖等 20 种“三新食品”的公告: 2025 年 第 4 号[EB/OL].(2025-06-26)[2025-08-08]. https://wsjkw.qinghai.gov.cn/ztzl/spaqbz/gjbz/202508/t20250808_322856.html.
- [5] GRANSTRÖM T B, TAKATA G, TOKUDA M, et al. Izumoring: a novel and complete strategy for bioproduction of rare sugars [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2004, 97(2): 89-94.
- [6] 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 and Technology*, 2022, 57(9): 5931-5942.
- [7] LEE H, SHIN J. Quality properties of sponge cake according to replacement ratio of allulose [J]. *Food Engineering Progress*, 2022, 26(3): 147-155.
- [8] YOUNG M, JEON S, KWEON M. Study on applicability of allulose as a sucrose replacer in cookie making [J]. *Journal of the East Asian Society of Dietary Life*, 2016, 26(5): 450-456.
- [9] 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): 1-8.
- [10] HU J, NI A, CAI X, et al. Effect of allulose on the quality characteristics of sugar-free bread [J]. *Food Bioscience*, 2025, 71: 107089.
- [11] 王心乐.低 GI 原料对面团和面包品质特性的影响研究[D].长春:吉林农业大学,2021.
- [12] 陈永莹,曹家宝,王霞,等.甘油二酯对面包老化的影响[J].黑龙江八一农垦大学学报,2025,37(2):59-66.
- [13] 吴昊.麦芽三糖酶对面包品质及淀粉回生的调控机制研究[D].扬州:扬州大学,2025.
- [14] 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.
- [15] IBRAHIM O O. A review: manufacturing, and properties of the D-fructose epimer D-allulose (D-psicose) [J]. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2024, 15(9): 522-542.
- [16] 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 and Technology*, 2022, 57(9): 6004-6015.
- [17] 林丹琼.不同方法提取的芝麻分离蛋白对面包品质比较[J].现代食品科技,2020,36(5):165-170.
- [18] CAPPELLI A, BETTACCINI L, CINI E. The kneading process: a systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 104: 91-101.
- [19] 张猛.复合杂粮面包工艺优化及品质改良研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [20] NAJI-TABASI S, SHAHIDI-NOGHABI M, HOSSEININEZHAD M. Improving the quality of traditional Iranian bread by using sourdough and optimizing the fermentation conditions [J]. *SN Applied Sciences*, 2022, 4(5): 148.
- [21] 黄松伟.馒头制作过程面团持气性的变化研究[D].郑州:河南工业大学,2012.
- [22] HEITMANN M, ZANNINI E, ARENDT E. Impact of *Saccharomyces cerevisiae* metabolites produced during fermentation on bread quality parameters: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(7): 1152-1164.
- [23] 钟璇,沈冰,刘秋萍,等.麦芽糖淀粉酶改善吐司面包抗老化的质构效应研究[J].粮食与油脂,2025,38(5):84-88.
- [24] LIU C, LI X, SONG H, et al. Moisture sorption isotherms of polydextrose and its gelling efficiency in inhibiting the retrogradation of rice

- starch [J]. *Gels*, 2024, 10(8): 529.
- [25] LI S, SUN R, GONG Y, et al. Effects of dextran molecular weight on starch retrogradation and technological properties of Chinese steamed bread: based on the rubber/glass transition [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 270: 131887.
- [26] LI S, MAO J, ZHAO Y, et al. Correlation of glass transition features and macroscopic, mesoscopic properties of dough regulated by molecular weight of dextran [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 151: 109844.
- [27] 张苗苗.三种功能性糖对面包品质的影响及抗老化研究[D].武汉:武汉轻工大学,2022.
- [28] 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, 105(5): 3024-3035.
- [29] 谭萱宇.蓝莓渣对面包品质及抗老化效果的影响[D].长沙:湖南农业大学,2021.
- [30] 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.