

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.81193

# 阿洛酮糖对海绵蛋糕面糊性能和品质的影响

柴茜亚<sup>1</sup> 李 华<sup>1</sup> 王小艳<sup>2,3</sup> 彭 超<sup>2</sup> 李睿尧<sup>2</sup>(1. 河南工业大学粮油食品学院, 河南 郑州 450001; 2. 中粮营养健康研究院有限公司, 北京 102209;  
3. 营养健康与食品安全北京市重点实验室, 北京 102209)

**摘要:** [目的] 探究阿洛酮糖是否可以替代蔗糖应用于海绵蛋糕中。 [方法] 以阿洛酮糖作为甜味剂替代蔗糖制作海绵蛋糕, 考察阿洛酮糖替代量(0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 以蔗糖质量计)对海绵蛋糕的面糊性能和烘焙品质的影响。 [结果] 添加阿洛酮糖可以提高蛋液的起泡能力、面糊的糊化温度和黏度。随着阿洛酮糖添加量的增加, 海绵蛋糕的烘焙损失率从 11.46% 显著降低至 10.31%, 比容由 3.75 mL/g 增至 4.34 mL/g, 海绵蛋糕的颜色加深, 硬度和咀嚼性呈先降低后增加趋势, 弹性和回复性无显著变化。 [结论] 阿洛酮糖可部分替代蔗糖, 适宜替代量为 10%~30%。

**关键词:** 阿洛酮糖; 海绵蛋糕; 面糊; 烘焙品质

## Effects of *D*-allulose on batter performance and quality of sponge cakes

CHAI Xiya<sup>1</sup> LI Hua<sup>1</sup> WANG Xiaoyan<sup>2,3</sup> PENG Chao<sup>2</sup> LI Ruiyao<sup>2</sup>(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;  
2. Nutrition and Health Research Institute, COFCO, Beijing 102209, China; 3. Beijing Key Laboratory of Nutrition, Health and Food Safety, Beijing 102209, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate whether *D*-allulose can replace sucrose in sponge cakes. [Methods] *D*-allulose is used as a sweetener to replace sucrose in the production of sponge cakes. The effects of different substitution levels of *D*-allulose(0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, based on the weight of sucrose) on the batter performance and baking quality of the sponge cakes are examined. [Results] The addition of *D*-allulose improves the foaming capacity of egg liquid, the gelatinization temperature, and the viscosity of the batter. As the amount of *D*-allulose increases, the baking loss rate of the sponge cake significantly decreases from 11.46% to 10.31%, and the specific volume increases from 3.75 to 4.34 mL/g. The color of the sponge cake darkens, while the hardness and chewiness initially decrease and then increase. Elasticity and resilience show no significant changes. [Conclusion] *D*-allulose can partially replace sucrose, with an optimal replacement level of 10% to 30%.

**Keywords:** *D*-allulose; sponge cake; batter; baking quality

海绵蛋糕作为一款口感绵软、细腻的膨松类烘焙产品,深受消费者喜爱。近年来由于生活条件的改善,人们越来越重视食物的营养性与健康性<sup>[1]</sup>。蔗糖是海绵蛋糕的主要原料之一,其在高温下可分解为葡萄糖和果糖,与氨基酸发生美拉德反应,从而使蛋糕产生诱人的色泽<sup>[2]</sup>;还可以提高淀粉糊化和蛋白质变性温度,增加蛋液的泡沫稳定性<sup>[3]</sup>。但是摄入过量的游离糖会增加非传染性疾

病的风险,如肥胖、龋齿、糖尿病等<sup>[4]</sup>。如何减少食品配方中的蔗糖含量,一直是全球食品领域关注的热点<sup>[5]</sup>。用功能性甜味剂完全或部分替代海绵蛋糕中的蔗糖来降低海绵蛋糕的热量,增加健康及营养性能,是近些年常用的一种减糖方法。王永俊等<sup>[6]</sup>用低聚异麦芽糖、低聚果糖、低聚半乳糖、菊粉替代蔗糖后发现,菊粉海绵蛋糕不被消费者接受,其他 3 种糖除了甜度方面有所不足,在面糊性能

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2021YFD2100181)

通信作者:彭超(1985—),男,中粮营养健康研究院正高级工程师,博士。E-mail: pengchao@cofco.com

李睿尧(1991—),男,中粮营养健康研究院有限公司工程师,博士。E-mail: lierking2008@126.com

收稿日期:2024-11-21 改回日期:2025-05-05

引用格式:柴茜亚,李华,王小艳,等. 阿洛酮糖对海绵蛋糕面糊性能和品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 183-189.

Citation: CHAI Xiya, LI Hua, WANG Xiaoyan, et al. Effects of *D*-allulose on batter performance and quality of sponge cakes[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 183-189.

方面与蔗糖相似,可被消费者接受。郝月慧等<sup>[7]</sup>用赤藓糖醇、麦芽糖醇、木糖醇完全替代蔗糖后发现,3种糖醇均增大了海绵蛋糕的硬度,降低了海绵蛋糕的比容,其中麦芽糖醇和木糖醇总体质量在可接受范围内,赤藓糖醇的不可接受,且3种糖醇均不能参与美拉德反应而影响海绵蛋糕的色泽。Gökse等<sup>[8]</sup>用角豆粉和甜菊糖部分替代蛋糕中的蔗糖后,蛋糕品质未变差,表明减少蛋糕中的蔗糖是可行的。

阿洛酮糖,别名D-阿洛酮糖、无花果糖,是一种在自然界中含量极低的稀有糖,对血糖、血脂和2型糖尿病及其并发症有抑制作用<sup>[9]</sup>。相比较蔗糖而言,阿洛酮糖具有更好的溶解性,且相同质量的阿洛酮糖的甜度为蔗糖的70%且热量极低<sup>[10]</sup>。阿洛酮糖作为一种还原糖,可以与氨基酸产生美拉德反应,使蛋糕产生诱人的色泽和愉快的风味<sup>[11]</sup>。作为一种新型功能甜味剂,阿洛酮糖可以减少人体对葡萄糖的吸收,从而抑制血糖浓度升高和降低血糖生成指数<sup>[12]</sup>。

研究拟将阿洛酮糖以不同的添加比例代替海绵蛋糕中的蔗糖,分析其对海绵蛋糕的面糊性能和烘焙品质的影响,为阿洛酮糖在海绵蛋糕等烘焙食品中的应用提供依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

阿洛酮糖、低筋粉、福临门大豆油:中粮集团有限公司;

鲜鸡蛋:缤纷田园柴鸡蛋;

蔗糖:太古食品贸易(中国)有限公司;

SP蛋糕油:食博士(广州)进出口贸易有限公司。

### 1.2 仪器与设备

打蛋器:HR3740型,无锡胜麦机械有限公司;

混合型流变仪:Discovery HR-1型,梅特勒-托利多(上海)有限公司;

差示扫描量热仪:DSC-1型,梅特勒-托利多(上海)有限公司;

质构仪:TA.XTC型,上海保圣实业发展有限公司;

烤箱:SMJ-603EM+AB型,无锡胜麦机械有限公司;

便携式色差仪:X-rite型,爱色丽(上海)色彩仪器商贸有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 原料配方表 按表1用阿洛酮糖替代海绵蛋糕中的部分蔗糖,替代量分别为蔗糖质量的10%,20%,30%,40%,50%。

表1 海绵蛋糕配方表  
Table 1 Recipe of sponge cakes

阿洛酮糖替代量/%	全蛋液/g	低筋粉/g	蔗糖/g	阿洛酮糖/g	蛋糕油/g	大豆油/g
0	100	40	35.0	0	2.5	7.5
10	100	40	31.5	3.5	2.5	7.5
20	100	40	28.0	7.0	2.5	7.5
30	100	40	24.5	10.5	2.5	7.5
40	100	40	21.0	14.0	2.5	7.5
50	100	40	17.5	17.5	2.5	7.5

1.3.2 海绵蛋糕制作工艺 将全蛋液放入不锈钢打蛋盆中,低档搅打30 s,加入蔗糖/阿洛酮糖低档搅打1 min,加入蛋糕油高档搅打1 min,将面粉分两次过筛加入,混匀后,加入大豆油,混匀,将面糊等量倒入纸杯中,30 g/个,预热烤箱,上火180℃、下火160℃,烤制18 min。

1.3.3 蛋液起泡性测定 根据文献[13],按式(1)计算蛋液起泡性。

$$R = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R——起泡性,%;

$m_i$ ——未打发的样品溶液质量,g;

$m_f$ ——与 $m_i$ 相同体积的样品溶液打发后的质量,g。

1.3.4 蛋液泡沫稳定性测定 根据文献[14]并修改。将打发的样品泡沫室温静置2 h后,用针管吸出底部析出的液体,称重,通过液体析出率来反映蛋液的泡沫稳定性,液体析出率越高,泡沫稳定性越差。

$$D = \frac{m_d}{m_f} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

D——液体析出率,%;

$m_d$ ——析出液体的质量,g;

$m_f$ ——泡沫的初始质量,g。

1.3.5 海绵蛋糕面糊流变学特性测定 采用流变仪测定面糊黏度特性,使用直径为40 mm平行板,设定测试间隙1 mm,测量25℃下,样品应力随剪切速率(0.1~100 s<sup>-1</sup>)的

变化情况。

1.3.6 海绵蛋糕比容测定 根据文献[15]并修改。将烤好的蛋糕室温冷却1 h,脱模后称重,用菜籽置换法测量蛋糕体积,每组样品测5次,去掉最高值和最小值后,取平均值,并按式(3)计算蛋糕比容。

$$P = \frac{V}{m}, \quad (3)$$

式中:

$P$ ——蛋糕比容, mL/g;

$V$ ——蛋糕体积, mL;

$m$ ——蛋糕质量, g。

1.3.7 蛋糕面糊热力学特性测定 将新鲜制备好的面糊室温静置5 min,取10 mg于坩埚中并将其密封,用差示扫描量热仪(DSC)检测面糊的糊化温度。温度范围为20~200 °C,升温速度为10 °C/min,以空坩埚作为对照,使用Pyris Software软件记录样品糊化起始温度、峰值温度与终止温度。

1.3.8 海绵蛋糕烘焙损失率测定 称量烘烤前蛋糕糊和模具的总质量,蛋糕烤制完成后室温冷却30 min,称重,按式(4)计算海绵蛋糕的烘焙损失率。

$$B = \frac{m_0 - m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

$B$ ——烘焙损失率, %;

$m_0$ ——蛋糕和模具质量, g;

$m_1$ ——烘烤后蛋糕质量, g;

$m_2$ ——烘烤前蛋糕质量, g。

1.3.9 海绵蛋糕色度测定 使用便携式色差仪测定蛋糕表皮与蛋糕芯的色泽,分别记录 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 值。

1.3.10 海绵蛋糕质构特性测定 根据文献[16]并修改。将蛋糕于室温下冷却1 h后脱模,用蛋糕刀除去蛋糕表层部分以保证检测面平整,选择P36r探头,测定海绵蛋糕芯硬度、咀嚼性、弹性与回复性4个指标。测前、中、后速度均为1 mm/s,触发力为0.078 4 N,两次压缩停留时间5 s,压缩百分比50%。

1.3.11 海绵蛋糕感官评定 根据文献[17]并修改。将海绵蛋糕置于白色盘子上并随机编号,由10位(4男6女)经过培训的测评人员,采用9分制评分法对海绵蛋糕的色泽、气味、回味、甜度、口感与总体可接受度进行评价。评分标准:非常喜欢9分;很喜欢8分;喜欢7分;稍喜欢6分;一般5分;不太喜欢4分;不喜欢3分;很不喜欢2分;非常不喜欢1分。

## 1.4 数据处理

所有样品均平行测定3次,采用IBM SPSS Statistics 26软件对数据进行显著性分析,采用Origin 2024b软件

作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对蛋液起泡性质和泡沫稳定性的影响

由图1可知,阿洛酮糖部分替代蔗糖后,鸡蛋液的起泡性显著升高。当阿洛酮糖替代量<30%时,蛋液起泡能力随阿洛酮糖替代量的增加而增大,替代量为30%时达最大值,比对照组高22.87%。当阿洛酮糖替代量>30%时,蛋液的起泡能力有所下降,可能是阿洛酮糖的亲水性强,减少了蛋液体系中的水分,使蛋白质分子在界面上重新排列的速度减小,黏度变大使空气不易进入形成气泡<sup>[18]</sup>。当阿洛酮糖替代量为10%时,泡沫的液体析出率与对照组无显著差异,表现出优于蔗糖的起泡能力和与蔗糖相当的泡沫稳定性。随着阿洛酮糖替代量的增加,其泡沫稳定性均显著低于对照组。蛋液的起泡性与液体析出率呈极显著正相关性,相关系数为0.701( $P < 0.01$ ),即起泡能力越强,其稳定性越差,与王永俊<sup>[18]</sup>的研究结果一致。

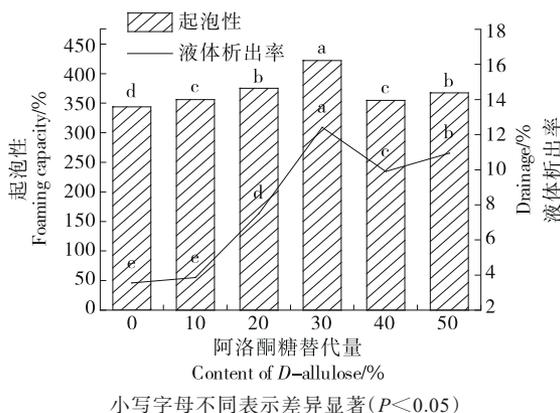


图1 阿洛酮糖对蛋液性能的影响

Figure 1 Effect of D-allulose on egg liquid performance

### 2.2 对面糊流变学特性的影响

由图2可知,随着剪切速率的增加,各海绵蛋糕糊的表观黏度均呈下降趋势,表明样品存在剪切变稀现象。在剪切速率变化范围内,所有蛋糕面糊的假塑性行为符合幂律模型中

$$\mu = k \times \gamma^{n-1}, \quad (5)$$

式中:

$\mu$ ——表观黏度, Pa·s;

$k$ ——相关性指数;

$\gamma$ ——剪切速率,  $s^{-1}$ ;

$n$ ——流动指数。

面糊的初始黏度影响海绵蛋糕的最终品质,面糊黏度越高,保留气泡的能力越强,面糊稳定性越好<sup>[16]</sup>。由表2可知,各面糊的 $R^2$ 均>0.99,说明该模型对面糊黏度

的拟合程度较强。流动指数为 0.294~0.436,阿洛酮糖替代组面糊的流动指数均明显低于对照组( $P<0.05$ ),说明添加阿洛酮糖的面糊黏度随剪切速率的变化程度大于对照组,其中替代量为 40%的面糊流动指数最低,较对照组低 32.57%。阿洛酮糖替代组的面糊稠度系数和黏度均显著大于对照组,是因为面糊黏度与体系中可用的自由水含量有关<sup>[19]</sup>,阿洛酮糖具有良好的吸水性,减少了面糊体系中自由水的含量。综上,阿洛酮糖可以有效提升海绵蛋糕面糊的表现黏度,增强面糊体系的稳定性。

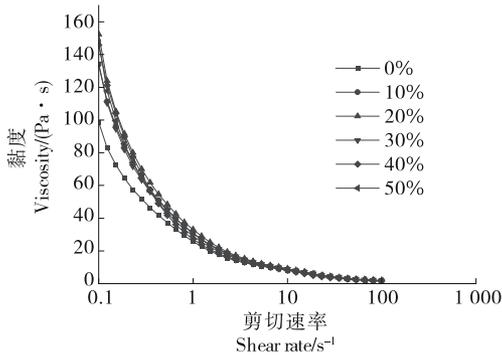


图 2 面糊表现黏度随剪切速率的变化图

Figure 2 Change in batter viscosity with shear rate

表 2 面糊的稠度系数和流动特性指数<sup>†</sup>

Table 2 Consistency coefficient and flow characteristic index of batter

阿洛酮糖替代量/%	$k$	$n$	$R^2$
0	25.75±0.34 <sup>d</sup>	0.436±0.018 <sup>a</sup>	0.999±0.001 <sup>a</sup>
10	30.05±1.33 <sup>b</sup>	0.373±0.003 <sup>b</sup>	0.998±0.000 <sup>ab</sup>
20	31.90±0.12 <sup>a</sup>	0.361±0.013 <sup>b</sup>	0.998±0.001 <sup>ab</sup>
30	30.10±0.58 <sup>b</sup>	0.376±0.007 <sup>b</sup>	0.997±0.002 <sup>ab</sup>
40	27.77±0.22 <sup>c</sup>	0.294±0.041 <sup>c</sup>	0.998±0.001 <sup>b</sup>
50	28.81±0.47 <sup>c</sup>	0.314±0.001 <sup>c</sup>	0.995±0.000 <sup>c</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.3 对面糊热力学特性的影响

海绵蛋糕面糊体系中淀粉糊化温度、蛋白质变性温度越高,烘焙过程中气体膨胀时间越长,蛋糕体积相对越大<sup>[20]</sup>。由表 3 可知,与对照组相比,当阿洛酮糖替代量 $<40\%$ 时,面糊体系的淀粉糊化和蛋白质变性的起始温度均显著升高( $P<0.05$ )。糊化温度与体系中的水分含量和糖种类密切相关<sup>[21]</sup>,可能是由于阿洛酮糖具有良好的亲水性,减少了体系中的可利用水,低温下阻碍了淀粉吸水膨胀,从而使糊化温度升高<sup>[22]</sup>;也可能是因为阿洛酮糖与面糊中的脂类、蛋白质结合形成的复合物,束缚了水分子与淀粉分子,使一部分淀粉分子在低温下难以膨胀,只有在高温下才能达到完全糊化

状态<sup>[23]</sup>。当阿洛酮糖替代量为 50%时,起始温度、峰值温度和终止温度比对照组有所降低,可能是因为阿洛酮糖在面糊体系中含有量过高时,阿洛酮糖分子会影响直链淀粉链长分布,从而降低了糊化温度。

表 3 蛋糕面糊的热力学特性参数<sup>†</sup>

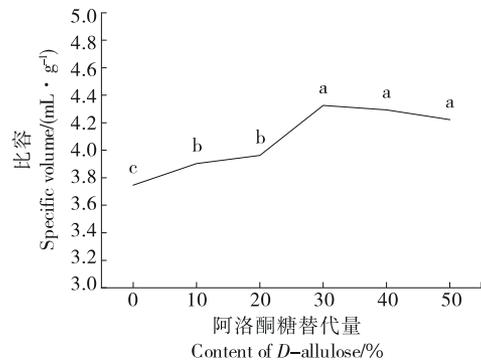
Table 3 Thermodynamic characteristics of cake batter

阿洛酮糖替代量/%	起始温度/°C	峰值温度/°C	终止温度/°C
0	102.40±0.57 <sup>d</sup>	120.38±0.07 <sup>b</sup>	139.71±5.02 <sup>cd</sup>
10	140.56±1.37 <sup>a</sup>	147.88±6.63 <sup>a</sup>	164.03±6.63 <sup>a</sup>
20	115.06±1.81 <sup>c</sup>	128.44±7.93 <sup>b</sup>	146.37±3.18 <sup>b</sup>
30	113.39±1.73 <sup>c</sup>	125.03±5.13 <sup>b</sup>	143.99±0.77 <sup>bc</sup>
40	131.57±2.20 <sup>b</sup>	141.26±2.75 <sup>a</sup>	158.35±0.31 <sup>a</sup>
50	100.89±0.09 <sup>d</sup>	108.45±0.91 <sup>c</sup>	136.49±0.64 <sup>d</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.4 对海绵蛋糕比容的影响

比容是衡量海绵蛋糕品质的重要指标之一,一般比容大的海绵蛋糕口感绵软、组织状态良好<sup>[24]</sup>。由图 3 可知,当阿洛酮糖替代量为 0%~30%时,随着阿洛酮糖替代量的增加,海绵蛋糕的比容逐渐增加,当阿洛酮糖替代量 $>30\%$ 时,海绵蛋糕的比容略有减小。蛋糕的体积与蛋清液的打发性<sup>[25]</sup>、最终产品中剩余的空气量紧密相关<sup>[26]</sup>。当阿洛酮糖替代量 $<40\%$ 时,海绵蛋糕比容与蛋液起泡能力趋势一致,其中 30%替代量的海绵蛋糕比容最高,比对照组高 14.93%。当阿洛酮糖替代量为 50%时,起泡能力高于 40%的,但蛋糕比容下降,可能是由于面糊糊化温度降低,使得海绵蛋糕在较低温度下,蛋糕糊内部开始形成凝胶结构,蛋糕体积膨大的时间缩短,最终导致蛋糕体积减小。蛋液的起泡能力与海绵蛋糕的比容呈极显著正相关,相关系数为 0.797( $P<0.01$ ),即起泡能力越



小写字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )

图 3 阿洛酮糖对海绵蛋糕比容的影响

Figure 3 Effect of *D*-allulose on the specific volume of sponge cakes

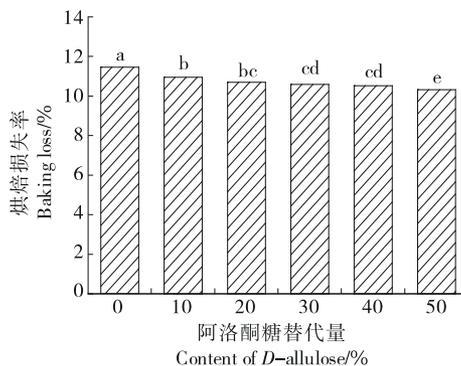
强,蛋糕比容越大。综上,阿洛酮糖替代蔗糖可以显著提高海绵蛋糕的比容。

### 2.5 对海绵蛋糕烘焙损失率的影响

蛋糕的烘焙损失率主要反映蛋糕中水分的损失情况。由图4可知,随着阿洛酮糖替代量的增加,海绵蛋糕的烘焙损失率从11.46%下降至10.31%,可能是因为阿洛酮糖具有良好的保湿性,使之与面糊中的自由水结合,从而抑制了海绵蛋糕烘烤过程中水分的散失,表明阿洛酮糖能够提高面糊的持水能力,减少烘烤过程中因水分蒸发而造成的质量损失。

### 2.6 对海绵蛋糕色度的影响

由表4可知,随着阿洛酮糖替代量的增加,海绵蛋糕表皮的 $L^*$ 、 $b^*$ 显著减小, $a^*$ 显著增大;海绵蛋糕芯的 $L^*$ 显著减小, $a^*$ 、 $b^*$ 显著增大,表明随着阿洛酮糖替代量的增加,海绵蛋糕表面逐渐变暗,红度显著变深,黄度显著降低;蛋糕芯的明亮度减小,红色度和黄色度显著提高。海绵蛋糕表面颜色逐渐加深,呈深棕色,可能是由于阿洛酮糖



小写字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )

图4 阿洛酮糖对海绵蛋糕烘焙损失率的影响

Figure 4 Effect of *D*-allulose on the baking loss rate of sponge cakes

具有较强的还原性,在烘烤过程中与氨基酸发生了美拉德反应<sup>[27]</sup>。随着阿洛酮糖替代量的增加,美拉德反应加强,从而产生了深棕色物质。

表4 阿洛酮糖对蛋糕表皮和蛋糕芯色度的影响<sup>†</sup>

Table 4 Effects of *D*-allulose on the color of cake crust and core

阿洛酮糖替代量/%	蛋糕表皮			蛋糕芯		
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$
0	58.52±0.59 <sup>a</sup>	12.59±0.28 <sup>c</sup>	43.16±1.47 <sup>a</sup>	74.51±0.81 <sup>b</sup>	0.83±0.16 <sup>d</sup>	33.23±0.85 <sup>d</sup>
10	56.96±0.80 <sup>b</sup>	16.41±0.35 <sup>b</sup>	37.50±2.42 <sup>b</sup>	74.42±0.35 <sup>bc</sup>	3.58±0.36 <sup>ab</sup>	38.86±1.40 <sup>a</sup>
20	56.16±0.54 <sup>b</sup>	16.68±0.12 <sup>b</sup>	37.12±1.32 <sup>b</sup>	74.40±0.34 <sup>bc</sup>	3.82±0.28 <sup>a</sup>	38.50±1.01 <sup>ab</sup>
30	56.27±0.52 <sup>b</sup>	16.73±0.05 <sup>b</sup>	36.09±0.94 <sup>b</sup>	75.58±0.30 <sup>a</sup>	3.07±0.10 <sup>c</sup>	35.40±0.89 <sup>c</sup>
40	55.84±0.32 <sup>b</sup>	16.62±0.46 <sup>b</sup>	36.59±0.94 <sup>b</sup>	73.80±0.27 <sup>bc</sup>	3.31±0.09 <sup>bc</sup>	36.03±0.59 <sup>c</sup>
50	53.36±0.90 <sup>c</sup>	17.71±0.49 <sup>a</sup>	35.73±0.61 <sup>b</sup>	73.59±0.45 <sup>c</sup>	3.80±0.21 <sup>a</sup>	36.83±1.16 <sup>bc</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.7 对海绵蛋糕质构特性的影响

硬度是质构特性中衡量海绵蛋糕品质的一项重要指标,一般硬度越小的蛋糕,更能呈现出柔软的口感<sup>[25]</sup>。咀嚼性能反映吞咽蛋糕的难易程度,咀嚼性越低,蛋糕越容易被嚼碎吞咽<sup>[28]</sup>。弹性和回复性能表征蛋糕在受到压力后恢复的能力<sup>[29]</sup>。由表5可知,随着阿洛酮糖替代量的增加,海绵蛋糕的硬度和咀嚼性降低,弹性和回复性无显著差异。当阿洛酮糖替代量为40%时,硬度和咀嚼性最低,相对于对照组分别下降了42.49%,39.19%,说明阿洛酮糖替代部分蔗糖能使海绵蛋糕的口感变软,硬度降低,与Lee等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。

### 2.8 海绵蛋糕的感官评价

由图5可知,当阿洛酮糖替代量 $<30\%$ 时,甜度评分最接近对照组,10%阿洛酮糖组评分略高于对照组,可能是由于对照组甜度最高,消费者更偏爱甜度相对较低的蛋糕。当阿洛酮糖替代量为40%,50%时,海绵蛋糕的色

表5 阿洛酮糖对海绵蛋糕质构特性的影响<sup>†</sup>

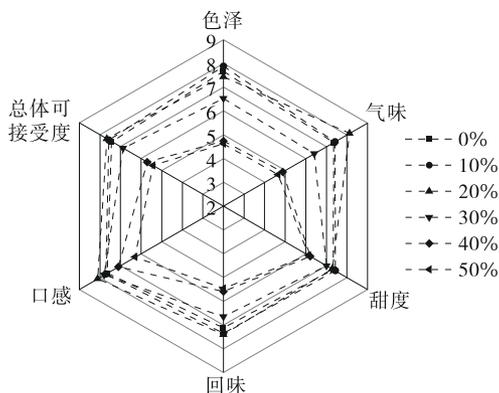
Table 5 Effect of *D*-allulose on the texture properties of sponge cakes

阿洛酮糖替代量/%	硬度/N	弹性	咀嚼性/N	回复性
0	3.57±0.34 <sup>a</sup>	0.99±0.00	2.65±0.26 <sup>a</sup>	0.39±0.02
10	2.82±0.13 <sup>b</sup>	0.99±0.01	2.13±0.10 <sup>b</sup>	0.40±0.01
20	2.60±0.19 <sup>b</sup>	0.99±0.01	1.97±0.14 <sup>b</sup>	0.40±0.01
30	2.56±0.34 <sup>b</sup>	0.99±0.01	1.95±0.24 <sup>b</sup>	0.40±0.01
40	2.05±0.07 <sup>c</sup>	0.99±0.00	1.57±0.05 <sup>c</sup>	0.40±0.00
50	2.09±0.18 <sup>c</sup>	0.99±0.00	1.61±0.13 <sup>c</sup>	0.39±0.01

<sup>†</sup> 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

泽和气味评分降低到5分以下。这可能是因为阿洛酮糖能直接参与美拉德反应,随着其替代量的增加,美拉德反应越强烈,褐变速度越快,生成的类黑素等颜色物质越

多,导致蛋糕外观颜色过深,评分较差。在整体质量评价中,替代量为 0%~30% 的蛋糕总体可接受度评分 > 6 分,说明蔗糖替代量 < 30% 时,消费者可以普遍接受。



甜度为评价人员对蛋糕甜度的喜好度评分,排名先后并不代表实际的甜度(如阿洛酮糖甜度约为蔗糖的 70%)

图 5 阿洛酮糖对海绵蛋糕感官评分的影响

Figure 5 Effect of *D*-allulose on the sensory scores of sponge cakes

### 3 结论

阿洛酮糖能显著改善蛋液、面糊和蛋糕的品质。在试验范围内,阿洛酮糖能显著提高蛋液的打发性能,面糊的黏度和糊化温度。阿洛酮糖部分替代蔗糖后,海绵蛋糕表皮和蛋糕芯的颜色加深,硬度和烘焙损失率降低,比容提高,显示出良好的替代性。感官评价结果表明,10%~30% 蔗糖替代量的海绵蛋糕可被消费者接受。后续可进一步研究阿洛酮糖对海绵蛋糕贮藏期间品质及淀粉老化的影响。

#### 参考文献

[1] 胡欣宇, 明建, 王姝, 等. 超微板栗粉对海绵蛋糕品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 220-226.  
HU X Y, MING J, WANG S, et al. Effects of superfine chestnut powder on sponge cake quality[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 220-226.

[2] KRUPA-KOZAK U, DRABIŃSKA N, ROSELL C M, et al. High-quality gluten-free sponge cakes without sucrose: inulin-type fructans as sugar alternatives[J]. Foods, 2020, 9(12): 1 735.

[3] PSIMOULI V, OREOPOULOU V. The effect of alternative sweeteners on batter rheology and cake properties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(1): 99-105.

[4] LANATA M C, PATRIGNANI M, PUPPO M C, et al. Quality evaluation of gluten-free biscuits prepared with algarrobo flour as a partial sugar replacer[J]. Open Agriculture, 2022, 7(1): 323-334.

[5] GARVEY E C, O'SULLIVAN M G, KERRY J P, et al. Aroma generation in sponge cakes: the influence of sucrose particle size and sucrose source[J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135860.

[6] 王永俊, 邓雯婷, 郑建仙, 等. 4 种功能性低聚糖对海绵蛋糕的面糊性能和烘焙品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 8-13.  
WANG Y J, DENG W T, ZHENG J X, et al. Effects of four kinds of functional oligosaccharides on the batter and the baking quality of sponge cake[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 8-13.

[7] 郝月慧, 贾春利, 王凤, 等. 三种糖醇对海绵蛋糕面糊流变学、热力学及烘焙学特性影响的比较研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(6): 298-302, 306.  
HAO Y H, JIA C L, WANG F, et al. A comparative research of the influences of maltitol, xylitol and erythritol on the rheological, thermal and baking properties of sponge-cake batter[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(6): 298-302, 306.

[8] GÖKÇE C, BOZKURT H, MASKAN M. The use of carob flour and stevia as sugar substitutes in sponge cake: optimization for reducing sugar and wheat flour in cake formulation[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2023, 32: 100732.

[9] 帅玉英, 孙怡, 吴晓花, 等. 低热量甜味剂 *D*-阿洛酮糖的生产应用研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2014, 25(9): 159-163.  
SHUAI Y Y, SUN Y, WU X H, et al. Applications and regulation of low caloric sweetener, *D*-psicose[J]. China Food Additives, 2014, 25(9): 159-163.

[10] ZHANG W L, LI H, JIANG B, et al. Production of *D*-allulose from *D*-glucose by *Escherichia coli* transformant cells co-expressing d-glucose isomerase and *D*-psicose 3-epimerase genes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(10): 3 420-3 426.

[11] 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.

[12] 邓莉川, 丁子元, 王小艳, 等. *D*-阿洛酮糖的功能特性及其应用进展[J]. 当代化工, 2018, 47(5): 995-998.  
DENG L C, DING Z Y, WANG X Y, et al. Functional properties and application progress of *D*-psicose[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(5): 995-998.

[13] 李鑫. 基于界面特性解析蛋清蛋白体系泡沫性质及其调控机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 15-16.  
LI X. Engineered interface for explaining foaming characteristics of egg white protein systems and regulation mechanisms[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020: 15-16.

[14] KUROPATWA M, TOLKACH A, KULOZIK U. Impact of pH on the interactions between whey and egg white proteins as

- assessed by the foamability of their mixtures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(8): 2 174-2 181.
- [15] TANG T T, WU S F, TANG S S, et al. Effect of modified egg white powder on the properties of angel cakes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 326: 111012.
- [16] 杨槟煌, 黄玉兰, 戴聪杰, 等. 裸藻对戚风蛋糕品质及抗氧化能力的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(1): 152-157.
- YANG B H, HUANG Y L, DAI C J, et al. Effects of *Euglena gracilis* on the quality and antioxidant activity of Chiffon cake [J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(1): 152-157.
- [17] PSIMOULI V, OREOPOULOU V. The effect of fat replacers on batter and cake properties[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(10): C1 495-C1 502.
- [18] 王永俊. 四种功能性低聚糖在海绵蛋糕中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 20-21.
- WANG Y J. Study on the application of four functional oligosaccharides in sponge cake[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 20-21.
- [19] BOZDOGAN N, KUMCUOGLU S, TAVMAN S. Investigation of the effects of using quinoa flour on gluten-free cake batters and cake properties[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(2): 683-694.
- [20] MIZUKOSHI M, MAEDA H, AMANO H. Model studies of cake baking II, expansion and heat set of cake batter during baking[J]. *Cereal Chem*, 1980, 57(5): 352-355.
- [21] HESSO N, LOISEL C, CHEVALLIER S, et al. Monitoring cake baking by studying different ingredient interactions: from a model system to a real system[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 51: 7-15.
- [22] 杜先锋, 许时婴, 王璋. NaCl和糖对葛根淀粉糊化特性的影响[J]. *食品科学*, 2002, 23(7): 34-36.
- DU X F, XU S Y, WANG Z. Effects of NaCl and sugar on the gelatinization behavior of kuzu starch[J]. *Food Science*, 2002, 23(7): 34-36.
- [23] 冷雪, 曹龙奎. 利用差示扫描量热仪研究小米淀粉及小米粉的糊化特性[J]. *食品科学*, 2015, 36(19): 60-66.
- LENG X, CAO L K. Gelatinization characteristics of millet starch and millet flour evaluated by differential scanning calorimeter[J]. *Food Science*, 2015, 36(19): 60-66.
- [24] YILDIZ E, GUNER S, SUMNU G, et al. Monitoring the effects of ingredients and baking methods on quality of gluten-free cakes by time-domain (TD) NMR relaxometry[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(10): 1 923-1 933.
- [25] 黄雪, 唐梦琦, 付阳, 等.  $\beta$ -葡聚糖对戚风蛋糕的品质特性及抗老化的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(8): 131-137, 145.
- HUANG X, TANG M Q, FU Y, et al. Effect of  $\beta$ -glucan on the quality characteristics and anti-aging of chiffon cake[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(8): 131-137, 145.
- [26] ARICI M, ÖZÜLKÜ G, KAHRAMAN B, et al. The effect of taro-wheat flour and taro-gluten free flour on cake batters and quality[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(1): 531-540.
- [27] 翟昕宇, 邢晓睿, 王睿黎, 等. 明胶—糖类互作对含糖凝胶理化特性及体外消化性的影响[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(5): 99-107.
- ZHAI X Y, XING X R, WANG R C, et al. Effects of gelatin-saccharides interactions on the physicochemical properties and *in-vitro* digestion of cold-set gels[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(5): 99-107.
- [28] SAHI S S, ALAVA M J. Functionality of emulsifiers in sponge cake production[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2003, 83(14): 1 419-1 429.
- [29] RODRÍGUEZ-GARCÍA J, SAHI S S, HERNANDO I. Functionality of lipase and emulsifiers in low-fat cakes with inulin[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 58(1): 173-182.
- [30] 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.