

# 低聚糖类益生元对炼乳品质的影响

周 颀<sup>1\*</sup>, 徐登薇<sup>1</sup>, 宋 锐<sup>1</sup>, 徐 升<sup>2</sup>, 董艺凝<sup>1\*</sup>, 程 龙<sup>1</sup>, 刘 杰<sup>1</sup>

(1. 滁州学院生物与食品工程学院, 滁州 239000; 2. 安徽达诺乳业股份有限公司, 滁州 239000)

**摘要:** **目的** 研究不同低聚糖类益生元替代蔗糖对炼乳品质的影响。**方法** 选用低聚果糖、低聚异麦芽糖、低聚木糖、低聚半乳糖 4 种低聚糖类益生元分别作为蔗糖替代物, 首先研究不同替代比的益生元炼乳体系质构、感官、色泽、晶体大小的变化, 得到较优的糖替代益生元; 而后通过静态流变学实验得到最佳糖替代益生元及替代比例。**结果** 与纯蔗糖炼乳相比, 低聚果糖炼乳黏性减小, 色泽无明显变化, 晶体长度增大, 消费者感官接受度高, 综合来看替代比 15%以内接受度高; 低聚异麦芽糖炼乳浓稠度和黏度增大, 色泽无明显变化, 晶体长度增大, 消费者感官喜好度高, 综合来看替代比 25%以内接受度高; 低聚木糖炼乳明亮度显著降低、黄度增加, 使得消费者感官喜好度下降; 低聚半乳糖的加入会使炼乳流动性变差, 应用局限性大。进一步通过静态流变学实验筛选最优益生元, 结果表明低聚异麦芽糖炼乳与纯蔗糖炼乳均表现出剪切稀化的假塑性行为, 且替代比 15%以内黏度曲线均下降较为平缓, 因此低聚异麦芽糖是最佳糖替代益生元、最佳替代比为 15%。**结论** 糖替代比 15%的低聚异麦芽糖炼乳既满足了甜感需求, 又实现了减糖的目标, 此外益生元的加入赋予了炼乳更多的功能性。该研究可为炼乳产品的减糖开发提供一定的理论依据和技术支持。

**关键词:** 炼乳; 减糖; 益生元; 流变特性; 质构特性

## Effects of oligosaccharide prebiotics on the quality of condensed milk

ZHOU Di<sup>1\*</sup>, XU Deng-Wei<sup>1</sup>, SONG Rui<sup>1</sup>, XU Sheng<sup>2</sup>, DONG Yi-Ning<sup>1\*</sup>, CHENG Long<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>

(1. School of Biological Science and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;  
2. Anhui Danuo Dairy Co., Ltd., Chuzhou 239000, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the effects of different oligosaccharide prebiotics replacing sucrose on the quality of condensed milk. **Methods** Four kinds of oligosaccharides including fructooligosaccharide, isomaltoligosaccharide, xylo-oligosaccharide and galactooligosaccharide were selected as sucrose substitutes respectively. The changes in texture, sensory, color and crystal size of prebiotic condensed milk with different substitution ratios were firstly studied to obtain the preferred sugar substitution prebiotics, and then the optimal sugar substitution prebiotic and substitution ratio were obtained by static rheological experiments. **Results** Compared with sweetened

**基金项目:** 安徽省合成甜味剂清洁生产工程技术研究中心开放基金项目(2022HTQSZ01)、滁州市八大产业链强链补链攻坚项目(2021GJ011)、安徽省大学生创新创业项目(S202110377147)

**Fund:** Supported by the Foundation of Anhui Province Synthetic Sweetener Cleaner Production Engineering Technology Research Center (2022HTQSZ01), the Chuzhou Municipal Science and Technology Project (2021GJ011), and the College Students' Innovation and Entrepreneurship Project of Anhui Province (S202110377147)

\*通信作者: 周 颀, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品低温加工及食品物性研究。E-mail: zhoudi06@163.com

董艺凝, 博士, 教授, 主要研究方向为酶的功能进化及功能食品开发。E-mail: dong\_yining@163.com

\*Corresponding author: ZHOU Di, Master, Lecturer, College of Biological and Food Engineering, Chuzhou College, No.1, West Huifeng Road, Langya District, Chuzhou 239000, China. E-mail: zhoudi06@163.com

DONG Yi-Ning, Ph.D, Professor, College of Biological and Food Engineering, Chuzhou College, No.1, West Huifeng Road, Langya District, Chuzhou 239000, China. E-mail: dong\_yining@163.com

condensed milk, the fructooligosaccharide condensed milk was less viscous, with no significant changes in color, crystal size increased, high consumer taste approval, and a comprehensive view of the acceptance of the substitution ratio within 15%; the consistency and viscosity of condensed milk with isomalto-oligosaccharide increased, with no significant changes in color, the crystal length increased, the consumer sensory preference was high, and the comprehensive view was that the substitution ratio within 25% was highly acceptable; the brightness of the xylo-oligosaccharide condensed milk was decreased significantly and the yellowness increased, which made the sensory preference of consumers decreased; the addition of galactooligosaccharide made condensed milk fluidity worse and its application was limited. Further static rheological experiments showed that both isomalto-oligosaccharide condensed milk and sweetened condensed milk exhibited pseudoplastic behavior of shear thinning, and the viscosity curves decreased gently within 15% substitution ratio. Therefore, isomalto-oligosaccharide was the best sugar substitution prebiotic, and the best substitution ratio in condensed milk was 15%.

**Conclusion** Sugar substitution ratio of 15% isomalto-oligosaccharide condensed milk not only meets the sweet taste demand, but also realizes the goal of reducing sugar. In addition, the addition of prebiotics gives condensed milk more functionality. This study can provide theoretical basis and technical support for the exploitation of sugar reduction in condensed milk.

**KEY WORDS:** condensed milk; reducing sugar; prebiotics; rheological property; texture property

## 0 引言

炼乳是将牛乳浓缩至原体积 30%~40%的乳制品,按是否加糖分为甜炼乳和淡炼乳。其中,甜炼乳是在牛乳中加入 10%~16%的蔗糖,均质后进行浓缩得到,已被广泛应用于乳饮料、糖果、糕点等食品加工业中。相较于淡炼乳,甜炼乳更便于储存,营养价值高,深受广大消费者青睐<sup>[1]</sup>。然而摄入糖分过多导致的健康问题在全球范围内日益严重,世界卫生组织建议成人每天蔗糖的摄入量不应超过 50 g,最好控制在 25 g 左右<sup>[2-3]</sup>,因此全球掀起了减糖风潮,甜炼乳也亟需减糖处理来符合当代消费者对低糖低能量的需求。

乳制品中常见的降糖方式是糖替代法,即利用具有甜感但热量低的物质(如益生元、甜味剂等)部分或完全替代蔗糖,以实现终产品的降糖需求<sup>[4]</sup>。目前已有研究者开展糖替代炼乳开发,如国内熊猫乳业利用赤藓糖醇替代部分蔗糖并结合结晶控制工艺、超高压技术开发出一款低糖炼乳,产品含糖量降低且风味优良<sup>[5]</sup>。益生元指一些不被宿主消化吸收却能够选择性地促进体内有益菌的代谢和增殖,从而改善宿主健康的有机物质。研究表明低聚糖类益生元甜度较蔗糖低,不能被人体口腔腐败菌利用,不能被人体肠道消化吸收,热值较低,因此被广泛应用于功能性甜食,是一类优质的糖替代物质<sup>[6]</sup>。目前已有学者将益生元应用于炼乳,如王仲达等<sup>[7]</sup>选用低聚木糖部分替代蔗糖制作炼乳,结果表明低聚木糖的添加量、添加位置以及浓缩温度对于炼乳感官品质均会产生显著影响,其中添加量影响最大。朱嘉文等<sup>[8]</sup>以菊粉代替白砂糖进行浓缩,得到甜度适中、口感细腻的菊粉炼乳。迟明等<sup>[9]</sup>也选用菊

粉作为甜感来源之一加入到炼乳中,得到热量低、甜味清爽、口感优良的低糖炼乳。然而目前益生元炼乳的研究主要集中在简单的口感优化上,对糖替代益生元的种类筛选及不同益生元对炼乳品质的影响研究还远远不够。

降糖减热处理会带来体系固形物含量减少、风味及质构变化、体系流动规律改变、组织结构不稳定等问题<sup>[10-13]</sup>,因此研究者也致力于开展相关的研究。如王永俊等<sup>[14]</sup>选用低聚异麦芽糖、低聚果糖、低聚半乳糖和天然菊粉完全代替海绵蛋糕中的蔗糖,对比分析了它们对面糊性能和蛋糕烘焙品质的影响。PALOMA 等<sup>[15]</sup>将功能性低聚糖加入到发酵乳中,发现功能性低聚糖除了作为双歧因子存在外,还能作为食品添加剂改善发酵乳的质构和风味、降低产品热量。炼乳体系是乳蛋白、糖、脂肪等多种成分混合的复杂体系,同时含有多种呈味物质,不同益生元的添加也会对炼乳感官、风味、质构特性、流变特性、组织结构等发生显著影响,而目前该方面的研究还很少。因此,为更好地实现炼乳的减糖并保证其食用及加工品质,开展益生元糖替代炼乳质构变化、体系流动规律改变、感官对比分析等研究至关重要。

本研究以实现炼乳减糖为目标,将 4 种低聚糖类益生元作为蔗糖替代物添加至炼乳中,研究不同益生元种类及替代比例对炼乳质构特性、流变性、色泽、感官喜好度等指标的影响,以期确认最佳的低聚糖类益生元种类及比例,为炼乳的减糖开发提供一定的数据支撑与理论研究基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

全脂奶粉(食品级,黑龙江省光明松鹤乳品有限公司);

白砂糖(食品级, 广州福正东食品有限公司); 单甘酯、乳糖、低聚异麦芽糖(食品级, 河南万邦化工科技有限公司); 低聚果糖(食品级, 广州长程医药生物科技有限公司); 低聚木糖、低聚半乳糖(食品级, 浙江一诺生物科技有限公司)。

DHR-2 流变仪(美国 TA 公司); DHS16-A 水分含量测定仪(厦门群隆仪器有限公司); CR-400 色差仪(深圳市莱特仪器设备有限公司); TA.XT Plus 物性测定仪(英国 Stable Micro Systems 公司); HHS 型号电热恒温水浴锅(常州隆和仪器制造有限公司); FA2204B 型电子天平(精度 0.0001 g, 上海越平科学仪器有限公司); XHF-DY 高速分散器(上海贺帆仪器有限公司); RE-501 旋转蒸发器(上海常豫仪器有限公司); XP-201 偏光显微镜(上海精密仪器仪表有限公司); SHZ-D 型号循环水真空泵(郑州科文仪器设备有限公司)。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 工艺流程

原料准备、称取→预热杀菌→加入辅料→均质→真空浓缩→冷却→结晶、灌装→产品品质检验→成品。

### 1.2.2 工艺操作要点

益生元替代比范围的确定: 替代比定义为益生元质量替代蔗糖质量的百分比。前期预实验发现低聚半乳糖的替代比增加到 15%时, 样品流动性显著减小, 且低聚半乳糖的溶解性是 4 种益生元中最差的。综合考虑将低聚半乳糖的替代比设置为 3%、6%、9%、12%、15%, 低聚果糖、低聚异麦芽糖、低聚木糖的替代比设置为 5%、10%、15%、20%、25%进行后续实验。

原料准备、称取: 准备所需的全脂奶粉、益生元、去离子水等原料, 称取全脂奶粉 30 g 并溶解于 50 g 水中。

预热杀菌: 将奶粉搅拌均匀, 之后放于温度为 80°C 的水浴锅中, 恒温 20 min 杀菌。加入辅料: 将称量好的白砂糖、去离子水等辅料混合、将不同种类及比例的益生元加入后搅拌均匀, 倒入全脂牛奶再次搅拌均匀, 原辅料共同在 80°C 的水浴锅中恒温放置 10 min, 期间需要不断搅拌, 使所有物料混合均匀。

均质: 将混合、杀菌好的溶液用高速搅拌机搅拌 5 次, 每次 30 s。

真空浓缩: 将均质后的混合液用旋转蒸发器进行真空浓缩, 真空度为 0.1 MPa, 水浴温度为 55°C, 转速为 80 r/min (转速需要缓慢上升, 防止产生大量气泡并将混合液倒吸、污染)。

冷却: 炼乳浓缩完成后, 水浴冷却至 30~32°C。

结晶、灌装: 加入乳糖作为晶种, 搅拌浓缩液, 之后装罐(罐子需要煮 5 min 并倒置自然晾干)、静置排气泡、结晶、密封 5 h 得成品。甜炼乳以 17~18°C 为宜, 但必须在搅拌后的 2 h 内进行, 防止时间间隔太长有细菌滋生。

产品品质检验: 对样品进行质构、偏光显微观察、色泽、感官等指标的测定。

## 1.3 指标测定

### 1.3.1 益生元甜感实验

将不同种类益生元分别溶解于 20 g 水中, 与 10% 的蔗糖水溶液在 20°C 时的甜度进行对比<sup>[16]</sup>, 得到 4 种益生元的甜度。

### 1.3.2 静态流变特性的测定

选用 40 mm 平板夹具, 25°C 条件下使剪切速率从 0.1~300 s<sup>-1</sup> 递增, 记录测试过程中炼乳黏度随剪切速率变化的关系<sup>[17]</sup>。

### 1.3.3 质构特性的测定

探头型号 AB/E 圆柱型塑料探头, 直径 45 mm。测试前、中、后速分别为 1.0、1.0、1.0 mm/s, 压缩深度为 15 mm, 触发类型为 Auto-5 g<sup>[18]</sup>。

### 1.3.4 色泽测定

采用色差仪对炼乳样品进行色泽测定, 测定前用白板校正色差仪, 根据 CIELAB 表色系统, 其中  $L^*$  为明亮度指数,  $a^*$  和  $b^*$  为彩度指数, 每组样品测定 3 次。

### 1.3.5 晶体结构测定

将不同处理后的炼乳样品置于偏光显微镜下, 在 40 倍物镜条件下观察炼乳中的晶体长度。

### 1.3.6 喜好度排序感官实验

(1) 喜好度排序感官实验方法设计内容

将纯蔗糖炼乳和 18 组益生元替代炼乳进行编号, 具体编号情况见表 1。

表 1 炼乳产品编号表  
Table 1 Condensed milk product number list

序号	产品名称	序号	产品名称	序号	产品名称	序号	产品名称
1	纯蔗糖炼乳	7	5%低聚异麦芽糖	13	10%低聚木糖	19	9%低聚半乳糖
2	5%低聚果糖	8	10%低聚异麦芽糖	14	15%低聚木糖	20	12%低聚半乳糖
3	10%低聚果糖	9	15%低聚异麦芽糖	15	20%低聚木糖	21	15%低聚半乳糖
4	15%低聚果糖	10	20%低聚异麦芽糖	16	25%低聚木糖		
5	20%低聚果糖	11	25%低聚异麦芽糖	17	3%低聚半乳糖		
6	25%低聚果糖	12	5%低聚木糖	18	6%低聚半乳糖		

为避免评价员存在感官适应性,采用平衡不完全区组设计(balanced incomplete block design, BIBD)<sup>[19]</sup>,每位评价员仅评价其中 5 个样品。设计产品喜好度排序检验评价表,评价员按照表格进行感官评价。

#### (2)结果分析方法

评价员完成评价后,回收评价单,将评定结果与样品准备工作表核对,统计每个样品的秩和,根据 BIBD 表的参数(处理数  $t=21$ ,区组容量  $k=5$ ,重复数  $r=5$ ,区组数  $b=21$ , $\lambda=1$ ,实验重复次数  $p=3$ ),使用 Friedman 秩次<sup>[20]</sup>和检验计算  $F$  值[公式(1)],其中  $R_j$  是第  $j$  个样品的秩次和。

$$F = \frac{12}{\lambda pt(k+1)} \sum_{j=1}^t R_j^2 - \frac{3(k+1)pr^2}{\lambda} \quad (1)$$

将  $F$  统计量与自由度为  $(t-1)$  的  $X^2$  临界值比较,如果样品间有显著差异,着进行各样品秩次和多重比较,见式(2)。

$$LSD_{\alpha} = t_{\alpha, \alpha} \sqrt{p(k+1)(rk-r+\lambda)/6} \quad (2)$$

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 20.0 进行数据显著性分析;使用 Origin 9.0 进行图形绘制,采用 Excel 2010 进行数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 益生元对炼乳质构、色泽、晶体大小及感官的影响

#### 2.1.1 益生元的甜度测试

对不同益生元的甜感进行测试,由结果可知低聚果糖和低聚半乳糖的甜度均为蔗糖的 0.3 倍,低聚异麦芽糖和低聚木糖的甜度均为蔗糖的 0.4 倍。将蔗糖作为对照,根据 4 种益生元的实际甜度进行甜度换算,得到不同替代种类及替代比的代糖炼乳,进而开展品质分析实验。

#### 2.1.2 益生元对炼乳质构的影响

表 2 为 4 种低聚糖炼乳的质构变化情况,与纯蔗糖炼乳相比,低聚果糖的添加会使炼乳的坚实度、浓稠度、内聚性和黏性 4 项指标均呈减小趋势,其中坚实度、内聚性和黏性在替代比为 5% 时开始显著减小( $P<0.05$ ),浓稠度在替代比达 10% 时开始显著减小( $P<0.05$ );而低聚异麦芽糖、低聚木糖、低聚半乳糖的添加都会使炼乳的坚实度、浓稠度、内聚性和黏性 4 项指标均呈显著增大趋势( $P<0.05$ )。结合感官可知,相较于纯蔗糖炼乳,替代比 10% 的低聚果

表 2 不同益生元对炼乳质构的影响( $n=3$ )  
Table 2 Effects of different prebiotics on texture of condensed milk ( $n=3$ )

种类	替代比	测定指标			
		坚实度/g	浓稠度/g.sec	内聚性/g.sec	黏性/g
CM		43.07±0.86 <sup>k</sup>	345.83±11.15 <sup>k</sup>	18.30±3.33 <sup>g</sup>	54.15±3.16 <sup>j</sup>
	5%	30.66±1.71 <sup>l</sup>	314.03±13.00 <sup>k</sup>	13.78±2.39 <sup>h</sup>	38.16±1.37 <sup>k</sup>
	10%	23.68±0.64 <sup>m</sup>	247.47±0.23 <sup>l</sup>	10.71±2.19 <sup>hi</sup>	27.34±0.44 <sup>l</sup>
FCM	15%	20.16±6.66 <sup>m</sup>	194.66±9.14 <sup>l</sup>	7.98±2.39 <sup>i</sup>	20.81±2.04 <sup>l</sup>
	20%	12.91±5.78 <sup>n</sup>	123.84±12.51 <sup>l</sup>	4.14±3.33 <sup>j</sup>	8.59±2.59 <sup>m</sup>
	25%	7.01±1.33 <sup>n</sup>	68.72±2.99 <sup>m</sup>	2.11±0.89 <sup>j</sup>	4.51±1.64 <sup>m</sup>
	5%	58.91±6.26 <sup>j</sup>	524.77±20.20 <sup>j</sup>	73.95±30.26 <sup>d</sup>	121.56±7.42 <sup>i</sup>
	10%	83.75±5.39 <sup>i</sup>	757.22±8.61 <sup>i</sup>	109.32±8.27 <sup>c</sup>	163.44±6.06 <sup>h</sup>
ICM	15%	119.67±5.27 <sup>h</sup>	927.45±8.62 <sup>h</sup>	111.77±9.47 <sup>c</sup>	238.57±6.03 <sup>g</sup>
	20%	153.44±3.87 <sup>g</sup>	1215.57±56.17 <sup>g</sup>	127.94±5.58 <sup>c</sup>	349.01±12.77 <sup>f</sup>
	25%	227.24±3.31 <sup>c</sup>	1557.99±18.91 <sup>f</sup>	145.93±23.50 <sup>b</sup>	750.46±14.84 <sup>b</sup>
	5%	52.71±4.56 <sup>j</sup>	711.20±32.82 <sup>i</sup>	27.21±2.69 <sup>f</sup>	227.19±28.75 <sup>g</sup>
	10%	88.50±2.24 <sup>i</sup>	793.38±12.04 <sup>hi</sup>	60.17±2.38 <sup>c</sup>	406.84±22.20 <sup>c</sup>
XCM	15%	92.00±5.94 <sup>i</sup>	1284.28±14.73 <sup>g</sup>	59.00±0.50 <sup>c</sup>	630.51±19.43 <sup>c</sup>
	20%	109.8±2.19 <sup>hi</sup>	1542.89±24.8 <sup>f</sup>	79.52±3.58 <sup>d</sup>	861.54±31.78 <sup>b</sup>
	25%	130.62±7.96 <sup>h</sup>	2168.85±89.16 <sup>c</sup>	164.53±5.84 <sup>b</sup>	885.78±40.30 <sup>b</sup>
	3%	189.89±7.34 <sup>f</sup>	2987.09±107.68 <sup>d</sup>	167.54±5.78 <sup>b</sup>	155.83±0.55 <sup>h</sup>
	6%	267.76±13.76 <sup>d</sup>	3357.89±179.45 <sup>e</sup>	189.56±8.43 <sup>a</sup>	311.56±1.32 <sup>f</sup>
GCM	9%	2743.65±9.67 <sup>c</sup>	2789.45±698.56 <sup>d</sup>	179.98±15.78 <sup>a</sup>	523.67±2.19 <sup>d</sup>
	12%	3378.56±76.58 <sup>b</sup>	7689.39±942.49 <sup>b</sup>	198.56±17.45 <sup>a</sup>	827.68±15.39 <sup>b</sup>
	15%	3961.54±109.33 <sup>a</sup>	12469.35±1147.41 <sup>a</sup>	213.15±15.06 <sup>a</sup>	1156.57±39.59 <sup>a</sup>

注:质构测定指标以平均值±标准偏差表示;同列不同小写字母表示数据间差异显著( $P<0.05$ )。CM:纯蔗糖炼乳;FCM:低聚果糖炼乳;ICM:低聚异麦芽糖炼乳;XCM:低聚木糖炼乳;GCM:低聚半乳糖,下同。

糖炼乳对牙齿的附着感减弱, 炼乳的流动性增加, 有明显变稀现象。低聚异麦芽糖替代比升至 15% 时, 炼乳有明显增稠现象且对牙齿的附着感逐渐增强。低聚木糖替代比升至 10% 时, 炼乳的浓稠度明显增大。低聚半乳糖替代比为 3% 时, 炼乳体系的浓稠度也明显增大, 此时炼乳流动性明显增大、对牙齿的附着感较强、浓稠感强; 低聚半乳糖替代比为 12% 时, 炼乳的流动性很小, 已不符合市售炼乳的流动性要求。

由于 4 种低聚糖的结构完全不同, 低聚糖与炼乳中蛋白会发生不同程度的相互作用, 可能导致炼乳体系凝胶结构发生改变, 进而显著影响炼乳质构指标的变化。质构指标显示低聚半乳糖并不适合大量添加至炼乳体系, 少量添加即会引起炼乳的增稠现象, 因此作为蔗糖替代物的应用局限性大; 其他 3 种益生元在一定的添加比例下并不会引起炼乳质构的不利变化, 是可行度高的 3 种蔗糖替代物。

### 2.1.3 益生元对炼乳色泽的影响

图 1 为 4 种低聚糖炼乳色泽变化情况。图 1A 中明亮度  $L^*$  值结果表明, 所有替代组的低聚果糖炼乳和低聚异麦芽糖炼乳  $L^*$  值与纯蔗糖炼乳无显著性差异 ( $P>0.05$ ); 5% 低聚木糖炼乳与纯蔗糖炼乳无显著差异, 10% 至 25% 的低聚木糖炼乳  $L^*$  值与纯蔗糖炼乳相比呈显著减小趋势 ( $P<0.05$ ); 低聚半乳糖替代比从 3% 升至 15%, 炼乳  $L^*$  值逐渐增大。图 1B 中黄度  $b^*$  值结果表明, 低聚果糖炼乳  $b^*$  值整体都低于纯蔗糖炼乳, 其他 3 种低聚糖炼乳  $b^*$  值均呈增大趋势。结合感官综合分析可知, 所有组别的低聚果糖炼乳和低聚异麦芽糖炼乳颜色虽都发生轻微改变, 但与纯蔗糖炼乳相比, 肉眼观察到的变化不显著, 均在测试者可接受范围内。而随着低聚木糖和低聚半乳糖替代比的增加, 代糖炼乳呈现出肉眼可见的变黄趋势, 且低聚木糖的变黄程度最显著。

综合图 1A、B 分析可知, 25% 以内的低聚果糖炼乳和低聚异麦芽糖炼乳与纯蔗糖炼乳相比色泽相似度高, 肉眼观察并无显著差异; 低聚半乳糖的添加会使炼乳更加黄亮, 且替代比越高、炼乳越明亮和偏黄, 这 3 种低聚糖炼乳的色泽变化均是消费者可接受的色泽。低聚果糖、低聚异麦芽糖和低聚半乳糖这 3 种低聚糖均为白色或微黄色粉末, 与乳粉、蔗糖等原料颜色相似, 且经过加工后并不会引起色泽大幅度变化, 因此是较为优选的低聚糖。低聚木糖的添加会使炼乳明亮度降低、黄度变大, 这可能是由于低聚木糖本身为淡黄色粉末<sup>[21]</sup>, 且经过浓缩等工艺后色泽变化显著, 因而使炼乳在色泽方面的感官接受度降低。

### 2.1.4 益生元对炼乳晶体大小的影响

图 2 为 4 种低聚糖炼乳晶体大小变化情况。结果表明与纯蔗糖炼乳相比, 低聚异麦芽糖和低聚半乳糖的添加均会使代糖炼乳中的晶体长度增加, 且替代比越大、晶体长度越长。低聚异麦芽糖是由两个葡萄糖分子以  $\alpha$ -1,6 糖苷键连接起来的双糖, 低聚半乳糖是在半乳糖或葡萄糖分子

上连接半乳糖基, 这两种低聚糖加入后可能与炼乳中的乳糖产生联结<sup>[22-23]</sup>, 导致炼乳中的晶体长度增大。图 2 还表明随着低聚果糖替代比从 5% 增加至 25%, 代糖炼乳晶体长度不断增大; 其中替代比 5% 代糖炼乳的晶体长度小于纯蔗糖炼乳, 其余代糖炼乳晶体长度均大于纯蔗糖炼乳。这可能是因为低聚果糖是果糖基通过  $\beta$ -2,1 糖苷键连接而成的聚合度 2~9 的功能性低聚糖, 主要成分为蔗果三糖 (GF2)、蔗果四糖 (GF3)、蔗果五糖 (GF4)<sup>[24]</sup>, 低聚果糖的加入影响了炼乳中的乳糖结晶, 使得炼乳体系中颗粒的晶体大小增大, 从而导致代糖炼乳的晶体长度增加。由图 2 可知, 随着低聚木糖替代比的增加, 炼乳晶体长度呈先增大后减小的趋势, 这可能与低聚木糖的化学结构有关, 低聚木糖一方面与炼乳中蛋白分子结合, 另一方面以氢键的形式参与网络结构的形成<sup>[25]</sup>, 不同添加量的低聚木糖使炼乳体系中乳糖结晶受到显著影响, 出现先增加后减小的趋势。

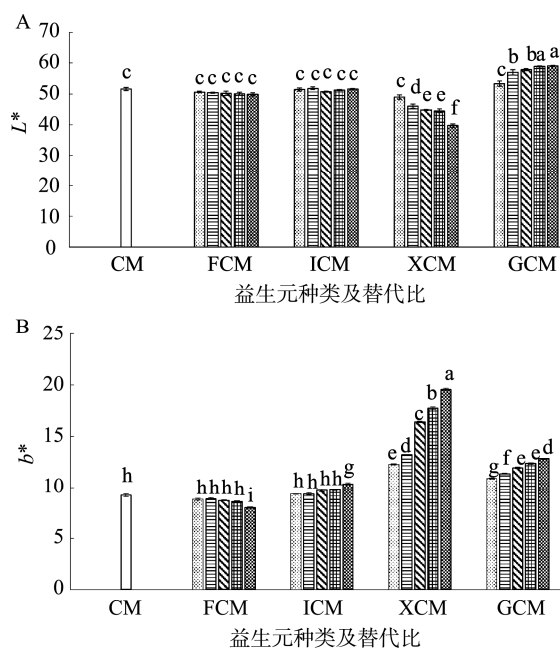
### 2.1.5 喜好度排序感官实验

评价员完成评定后, 回收 63 份评价单, 得到有效问卷数 63 份。计算每个样品的秩和, 根据排序检验的 Friedman 秩次和检验计算  $F$  值:

$$F=212$$

查  $X^2$  表, 在显著水平为 0.05, 自由度为  $t-1=21-1=20$  时,  $X^2=31.41<F$ , 表明评价员对 21 个样品间的喜好度有显著差异。故采用最小显著差数法进行各样品秩次和多重比较:

$$LSD_a=15.56$$



注: 不同小写字母表示不同种类间差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。FCM、ICM、XCM 替代比自左至右分别为 5%、10%、15%、20%、25%; GCM 替代比自左至右分别为 3%、6%、9%、12%、15%。下同。

图 1 不同益生元种类及替代比对炼乳色泽的影响 ( $n=3$ )

Fig.1 Effects of different prebiotic types and substitution ratios on color of condensed milk ( $n=3$ )

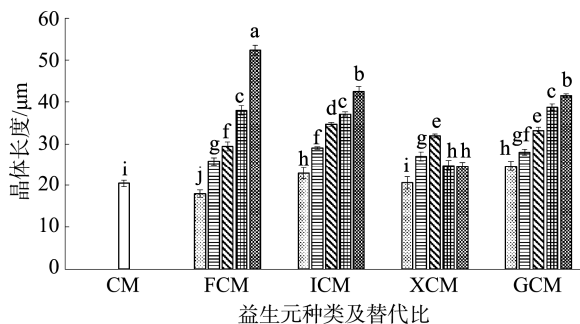


图2 不同益生元种类及替代比对炼乳晶体大小的影响( $n=3$ )  
Fig.2 Effects of different prebiotic types and substitution ratios on crystal length of condensed milk ( $n=3$ )

按照排序检验的秩和比较字母标注法标注各样品间的差异显著性,感官结果见表3。由表3可知,在益生元代糖炼乳样品中,评价员对样品9(15%低聚异麦芽糖炼乳)的喜好度最高,但与样品2(5%低聚果糖)、样品7(5%低聚异麦芽糖炼乳)、样品8(10%低聚异麦芽糖炼乳)间没有显著差异;与样品3、4、5、6、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21间有显著差异。

#### 2.1.6 综合分析

与纯蔗糖炼乳相比,综合考虑质构、明亮度和黄度、晶体大小和消费者感官喜好度4个指标,低聚果糖炼乳和低聚异麦芽糖炼乳更接近纯蔗糖炼乳。其中,低聚果糖炼乳流动性变强、色泽变化不明显、晶体长度增大、感官喜好度高,综合来看替代比15%以内的品质接受度高;低聚异麦芽糖炼乳浓稠度和黏度增大、色泽变化不明显、晶体长度增大、消费者感官喜好度高,综合来看替代比25%以内的品质接受度高。低聚木糖炼乳浓稠度和黏度增大,晶体长度先增大后减小,但炼乳色泽变得黄暗,使得消费者感官喜好度明显下降。低聚半乳糖炼乳明亮度和黄度显著增加,晶体长度增大,但仅添加3%流动性就明显变差,因此加工性能和涂抹性能局限性大。为进一步得到最优糖替代炼乳及替代比例,对低聚果糖炼乳和低聚异麦芽糖炼乳开展静态流动性分析,以观测不同益生元替代后对炼乳流动特性的影响。

#### 2.2 益生元替代比对炼乳流变性的影响

图3A为低聚果糖炼乳黏度随剪切速率变化的曲线图。由图3A可知,所有炼乳样品的黏度均随着剪切速率的

增大呈下降趋势,这表明经过不同处理的炼乳样品均表现出剪切变稀的假塑性行为<sup>[26-27]</sup>。此外,低聚果糖炼乳的起始黏度均低于纯蔗糖炼乳,这与质构结果是相吻合的。由图3A可知,5%低聚果糖炼乳的黏度曲线与纯蔗糖炼乳很接近,随着替代比从10%增大至25%,炼乳的黏度与纯蔗糖炼乳相比有显著差异,且炼乳黏度的下降趋势逐渐趋于平缓。低聚果糖具有高水溶性、较强的亲水性,因此可增强炼乳体系的持水性、降低炼乳硬度<sup>[28-29]</sup>,这可能是导致炼乳黏度下降的原因;此外低聚果糖本身具有较好的加工稳定性,因此低聚果糖炼乳在受到不同程度剪切力处理后,表现出比纯蔗糖炼乳更平缓的变化。

图3B为低聚异麦芽糖炼乳黏度随剪切速率变化的曲线图。由图3B可知,低聚异麦芽糖炼乳和纯蔗糖炼乳的黏度均随着剪切速率的增大呈下降趋势,这说明了不同处理的低聚异麦芽糖炼乳也均表现为剪切稀化的假塑性行为。由图3B还可知,5%低聚异麦芽糖炼乳的黏度曲线与纯蔗糖炼乳最为接近,起始黏度相似且黏度曲线下降平缓;10%低聚异麦芽糖炼乳和15%低聚异麦芽糖炼乳的起始黏度比纯蔗糖炼乳高,这也与质构结果相吻合,且黏度曲线下降较为平缓。20%低聚异麦芽糖炼乳和25%低聚异麦芽糖炼乳黏度曲线在低剪切速率0~50 s<sup>-1</sup>区间呈快速下降趋势,在剪切速率50~300 s<sup>-1</sup>区间下降趋势趋于平缓。这可能是由于低聚异麦芽糖具有良好的保湿性<sup>[30]</sup>,因此与炼乳体系中的自由水结合紧密,从而提高了炼乳的黏度;但自由水与低聚异麦芽糖的结合很容易被外力打破,因此较小的剪切速率即可使炼乳黏度下降。

### 3 结论

将低聚果糖、低聚异麦芽糖、低聚木糖、低聚半乳糖4种低聚糖类益生元替代蔗糖添加到炼乳中,探究不同益生元种类及替代比对炼乳质构、静态流变学特性、色泽、晶体大小和感官喜好度的影响,最终得到最优益生元为低聚异麦芽糖,最优替代比为15%。本研究为低聚糖类益生元替代蔗糖制作炼乳提供了一定的应用参考,为炼乳产品的降糖开发提供了理论依据。后续研究可进一步筛选出更多适合添加至炼乳体系益生元种类,并探究得到不同益生元的最佳添加量、添加方式等,在实现炼乳减糖目标的同时提高产品的功能性。

表3 炼乳喜好度排序结果

Table 3 Preference ranking results of condensed milk

处理数 $t=21$ , 区组容量 $k=5$ , 重复数 $r=5$ , 区组数 $b=21$ , $\lambda=1$ , 实验重复次数 $p=3$																					
样品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$R_j$	16 <sup>a</sup>	28 <sup>ab</sup>	33 <sup>bc</sup>	33 <sup>bc</sup>	48 <sup>cd</sup>	48 <sup>cd</sup>	21 <sup>ab</sup>	24 <sup>ab</sup>	18 <sup>a</sup>	34 <sup>bc</sup>	42 <sup>bc</sup>	45 <sup>bc</sup>	42 <sup>bc</sup>	51 <sup>cd</sup>	57 <sup>de</sup>	60 <sup>de</sup>	66 <sup>de</sup>	66 <sup>de</sup>	66 <sup>de</sup>	75 <sup>e</sup>	72 <sup>e</sup>

注:同行不同小写字母表示数据间差异显著( $P<0.05$ )。

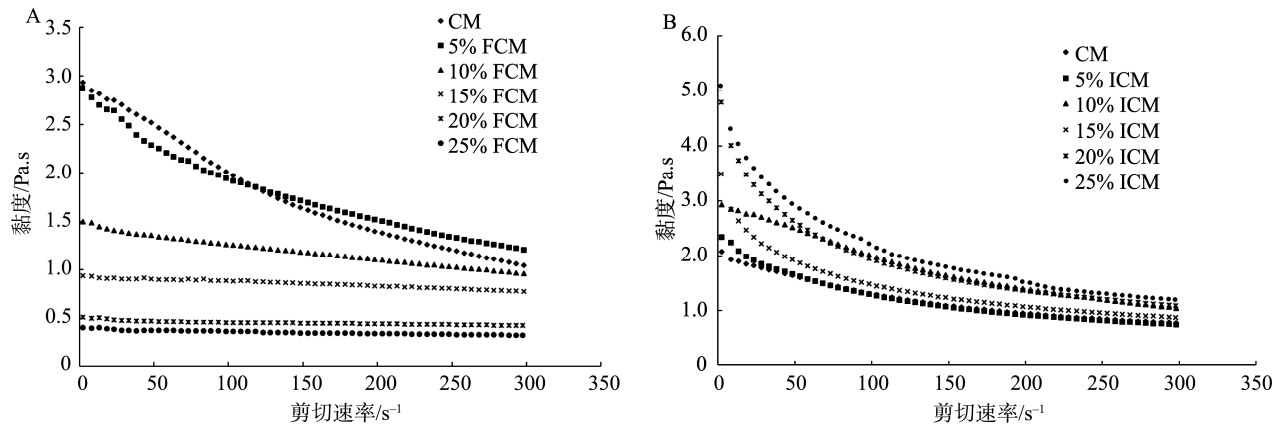


图 3 炼乳黏度随剪切速率的变化曲线

Fig.3 Viscosity curve of condensed milk with shear rate

## 参考文献

- [1] JOUKI M, JAFARI S, JOUKI A, *et al.* Characterization of functional sweetened condensed milk formulated with flavoring and sugar substitute [J]. *Food Sci Nutr*, 2021, 9(9): 5119–5130.
- [2] 易华西. 乳制品加工与质量控制研究新动态[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(17): 5812–5813.
- YI HX. New research trends in processing and quality control of dairy products [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(17): 5812–5813.
- [3] HUTCHINSON J, RIPPIN H, THREAPLETON D, *et al.* High sugar content of European commercial baby foods and proposed updates to existing recommendations [J]. *Matern Child Nutr*, 2020, 17(1): 1–14.
- [4] LAM J, ELMORE R, HOWARD B, *et al.* Low-calorie sweeteners and health outcomes: An evaluation of rapid versus traditional evidence mapping [J]. *BMC Res Notes*, 2022, 15(1): 65.
- [5] 梁世排, 梁世赞, 杨晓军, 等. 一种低糖低渗透压并抑制微生物的甜炼乳制备方法: 中国, CN112998076A [P]. 2021-06-22.
- LIANG SP, LIANG SZ, YANG XJ, *et al.* A kind of preparation method of sweet condensed milk with low sugar and low osmotic pressure and inhibiting microorganisms: China, CN112998076A [P]. 2021-06-22.
- [6] 刘波, 刘通通, 张祥奎, 等. 益生元及其应用研究进展[J]. *食品与药品*, 2021, 23(5): 485–492.
- LIU B, LIU TT, ZHANG XK, *et al.* Prebiotics and its application research progress [J]. *Food Drug*, 2021, 23(5): 485–492.
- [7] 王仲达, 苏曙光, 张月霞. 低聚木糖炼乳的工艺优化研究[J]. *现代食品*, 2017, 2(8): 123–126.
- WANG ZD, SU SG, ZHANG YX. Optimization of process for low concentration condensed milk of xylo oligosaccharides [J]. *Mod Food*, 2017, 2(8): 123–126.
- [8] 朱嘉文, 张艳珍, 王菲, 等. 菊粉炼乳制备工艺研究[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(16): 168–170, 221.
- ZHU JW, ZHANG YZ, WANG F, *et al.* Research on the preparation technology of inulin condensed milk [J]. *Anhui Agric Sci*, 2020, 48(16): 168–170, 221.
- [9] 迟明, 朱嘉文, 张东, 等. 一种菊粉炼乳及其制备方法: 中国, CN11213714A [P]. 2020-06-02.
- CHI M, ZHU JW, ZHANG D, *et al.* A kind of inulin condensed milk and preparation method: China, CN11213714A [P]. 2020-06-02.
- [10] ALEXANDRINA S, CAMELIA A. Functional bread: Effect of inulin-type products addition on dough rheology and bread quality [J]. *J Cere Sci*, 2017, 75: 220–227.
- [11] LIM PY, WONG KY, THOO YY, *et al.* Effect of inulin, fructo-oligosaccharide, trehalose or maltodextrin (M10 and M30) on the physicochemical and sensory properties of dark compound chocolate [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 149: 111964.
- [12] SAMANTA AK, NATASHA J, JAYATSM C, *et al.* Xylooligosaccharides as prebiotics from agricultural by-products: Production and applications [J]. *Bioact Carbohydr Diet Fibre*, 2015, 5(1): 62–71.
- [13] BALTHAZAR CF, SILVA HLA, CAVALCANTI RN, *et al.* Prebiotics addition in sheep milk ice cream: A rheological, microstructural and sensory study [J]. *J Funct Foods*, 2017, 35: 564–573.
- [14] 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 YJ, DENG WT, ZHENG JX, *et al.* Effects of four functional oligosaccharides on batter properties and baking quality of sponge cake [J]. *Food Mach*, 2019, 35(5): 8–13.
- [15] PALOMA DF, OSWALDO HH, AGUSTIN O, *et al.* Probiotic viability in yoghurts containing oligosaccharides derived from lactulose (OsLu) during fermentation and cold storage [J]. *Int Dairy J*, 2020, 102(C): 104621.
- [16] WON-WHI K, SEONG-BO K, SEO-JIN C. Effect of concentration range on the accuracy of measuring sweetness potencies of sweeteners [J]. *Food Qual Pref*, 2020, 79(1): 1–11.
- [17] 周頔, 徐升, 孙艳辉, 等. 紫薯对炼乳流变及质构特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(16): 97–103.
- ZHOU D, XU S, SUN YH, *et al.* Effect of purple sweet potato on rheological and textural properties of condensed milk [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(16): 97–103.
- [18] 代曜伊, 刘敏, 郑炯. 竹笋不溶性膳食纤维对草莓果酱流变及质构特

- 性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(3): 83–88.
- DAI YY, LIU M, ZHENG J. Effect of insoluble dietary fiber of bamboo shoots on the rheology and texture properties of strawberry jam [J]. Food Ferment Ind, 2017, 43(3): 83–88.
- [19] 江丽红, 周颖喆, 洪青, 等. 市售陈年切达奶酪风味特征及消费者喜好度研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(23): 275–281.
- JIANG LH, ZHOU YZ, HONG Q, *et al.* Research on the flavor characteristics and consumer preferences of commercial aged Cheddar Cheese [J]. Sci Technol Food Ind, 2014, 35(23): 275–281.
- [20] 丛懿洁, 王磊. Friedman 检验和定量描述分析法(QDA)在风味酸奶感官评定中的应用[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(4): 121–127.
- CONG YJ, WANG L. Application of friedman test and quantitative description analysis (QDA) in the sensory evaluation of flavor yogurt [J]. Storage Process, 2021, 21(4): 121–127.
- [21] 许文婷, 杨晓光, 王瑞琴, 等. 低聚木糖的生理功能、应用及检测研究[J]. 广西糖业, 2017, (5): 38–43.
- XU WT, YANG XG, WANG RQ, *et al.* The physiological function, application and detection of oligoxylose [J]. Guangxi Sugar Ind, 2017, (5): 38–43.
- [22] PALANIAPPAN A, EMMAMBUX MN. The challenges in production technology, health-associated functions, physico-chemical properties and food applications of isomaltooligosaccharides [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2021, 10(26): 1–17.
- [23] SHARMA S, SINGH S, CHAUDHARY V, *et al.* Isomaltooligosaccharides utilization and genomic characterization of human infant anti-inflammatory Bifidobacterium longum and Bifidobacterium breve strains [J]. 3 Biotech, 2022, 12(4): 89–89.
- [24] HAJAR AS, HAFIZ ARM, RAZID SS, *et al.* Enzymatically synthesised fructooligosaccharides from sugarcane syrup modulate the composition and short-chain fatty acid production of the human intestinal microbiota [J]. Food Res Int, 2021, 149: 110677.
- [25] 庄春云. 温度对低聚半乳糖和低聚果糖糖基化特性的影响及其在婴儿配方乳粉中的应用研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2021.
- ZHUANG CY. Effect of temperature on glycosylation characteristics of galactooligosaccharides and fructooligosaccharides and their application in infant formula milk powder [D]. Shenyang: Liaoning University, 2021.
- [26] BIANCA G, MARIA JNM, RODRIGO DF, *et al.* Thixotropy of sweetened condensed milk applied to flow fluid dynamics analysis of cylindrical pipes [J]. J Food Process Eng, 2020, 43(6): 1–12.
- [27] 胡玢. 紫薯益生菌酸奶的研制[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- HU F. Development of purple sweet potato probiotic yogurt [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017.
- [28] KANG S, YOU HJ, LEE YG, *et al.* Production, structural characterization, and *in vitro* assessment of the prebiotic potential of butyl-fructooligosaccharides [J]. Int J Mol Sci, 2020, 21(2): 445–448.
- [29] 倪晓蕾. 低聚果糖浸渍处理对米饭品质和抗回生特性改善作用研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2021.
- NI XL. Effect of fructooligosaccharide impregnation on rice quality and anti retrogradation characteristics [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2021.
- [30] 张心怡. 银杏低聚异麦芽糖的制备、理化性质及其益生活性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2021.
- ZHANG XY. Preparation, physicochemical properties and probiotic activity of isomaltooligosaccharides from *Ginkgo biloba* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

## 作者简介



周 颀, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品低温加工技术及食品物性研究。  
E-mail: zhoudi06@163.com



董艺凝, 博士, 教授, 主要研究方向为酶的功能进化及功能食品开发。  
E-mail: dong\_yining@163.com