

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.02.012

# 超声波处理对乳糖酶水解低乳糖牛乳品质的影响

那治国<sup>1</sup>, 郭玉娟<sup>1</sup>, 刘会佳<sup>2</sup>, 徐云飞<sup>1</sup>, 毕海鑫<sup>1\*</sup>

(1. 黑龙江东方学院 食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150066; 2. 黑龙江省市场监督管理人才培养发展中心, 黑龙江 哈尔滨 150076)

**摘要:** 目前对牛乳的杀菌方式主要是热处理, 但经过热处理后牛乳的品质会受到不同程度的破坏, 而超声波处理能较好保留低乳糖牛乳中的营养成分。因此, 该文对超声波处理低乳糖牛乳进行研究, 以酸度和 pH 值为指标, 考察不同超声功率(100、150、200、250 W)和超声时间(5、10、15、20 min)对低乳糖牛乳在 4 °C 条件下贮藏 21 d 品质的影响。结果显示: 最佳杀菌条件为超声功率 150 W、超声时间 10 min。由贮藏期试验可知, 经超声波处理后在 4 °C 贮藏环境下, 低乳糖牛乳能保存 15 d 左右, 而未经过超声波杀菌处理的鲜牛奶和低乳糖牛乳仅能保存 6 d 左右。由贮藏期稳定性试验可知, 经超声波处理后低乳糖牛乳在 4 °C 条件下可贮藏 15 d 以内, 稳定性试验呈阴性, 未发现酸败、脂肪分层现象, 贮藏 15 d 仍保持较好品质。在一定范围内随着超声功率提高、超声时间延长, 由于超声波的乳化均质作用, 低乳糖牛乳的品质逐渐改善, 其中低乳糖牛乳的浊度降低、乳化性质逐渐增高。

**关键词:** 低乳糖牛乳; 超声波; 牛乳品质; 杀菌; 贮藏

## Effect of Ultrasonic Treatment on the Quality of Low-Lactose Milk

NA Zhiguo<sup>1</sup>, GUO Yujuan<sup>1</sup>, LIU Huijia<sup>2</sup>, XU Yunfei<sup>1</sup>, BI Haixin<sup>1\*</sup>(1. College of Food Engineering, East University of Heilongjiang, Harbin 150066, Heilongjiang, China;  
2. Heilongjiang Province Market Supervision and Management Talent Training and Development Center, Harbin 150076, Heilongjiang, China)

**Abstract:** At present, milk is mainly sterilized by heat treatment, which, however, will deteriorate the quality of milk to varying degrees. Ultrasonic treatment can retain the nutrients in low-lactose milk. Low-lactose milk was subjected to ultrasonic treatment, and the effects of different ultrasonic power (100, 150, 200, and 250 W) and ultrasonic time (5, 10, 15, and 20 min) on the quality of low-lactose milk stored at 4 °C for 21 days were studied with acidity and pH as indicators. The results showed that the optimal sterilization conditions were ultrasonic treatment at 150 W for 10 min. The storage test showed that low-lactose milk could be preserved for about 15 d after ultrasonic treatment, while fresh milk and low-lactose milk without ultrasonic sterilization could only be preserved for about 6 d. The stability test during the storage period showed that the low-lactose milk could be stored for 15 d under 4 °C, with negative result in the alcohol test, no rancidity or fat stratification, and it still maintained good quality after storage for 15 d. As the ultrasonic power and ultrasonic time increased within certain ranges, the quality of low-lactose milk was gradually improved due to the emulsification and homogenization effects of ultrasound, which decreased the turbidity and improved the emulsifying properties of low-lactose milk.

**Key words:** low-lactose milk; ultrasound; milk quality; sterilization; storage

引文格式:

那治国, 郭玉娟, 刘会佳, 等. 超声波处理对乳糖酶水解低乳糖牛乳品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(2): 81-89.

NA Zhiguo, GUO Yujuan, LIU Huijia, et al. Effect of Ultrasonic Treatment on the Quality of Low-Lactose Milk[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 81-89.

基金项目: 黑龙江省重点研发计划指导类项目(GZ20210166)

作者简介: 那治国(1980—), 男(汉), 教授, 博士, 研究方向: 功能性乳制品加工。

\*通信作者: 毕海鑫(1997—), 女(汉), 助教, 硕士, 研究方向: 乳品分析检测。

低乳糖牛乳是将生牛乳通过乳糖酶水解或膜过滤的方式降低其乳糖含量,以适合乳糖不耐症人群食用的一种乳制品<sup>[1]</sup>。其中,水解法制备的低乳糖牛乳中的乳糖被乳糖酶水解成葡萄糖和半乳糖,在采用巴氏杀菌处理后更易发生美拉德反应,造成其在贮藏过程中发生变色、变味等品质变化<sup>[2]</sup>。非热杀菌技术指不经过加热处理的方法对食品进行杀菌处理以满足货架期的要求,同时可降低蛋白质的变性程度及美拉德反应的发生<sup>[3]</sup>。食品中的非热杀菌主要分为物理杀菌和化学杀菌,如超高压杀菌<sup>[4-5]</sup>、脉冲电场杀菌<sup>[6]</sup>、超声波杀菌<sup>[7]</sup>、辐照杀菌<sup>[8]</sup>、紫外线杀菌<sup>[9]</sup>等。其中超声波(ultrasound, US)杀菌技术一般采用 20~100 000 Hz 的超声频率来进行杀菌<sup>[10]</sup>。超声波可以应用于乳品工业中的许多方面,如提取、均质、脱气以及灭活微生物等<sup>[11]</sup>。用超声波处理生牛乳不仅可以灭活微生物、均质,而且还能很好保留牛奶中的蛋白质、脂肪和乳糖等物质,是一种前景广阔的冷杀菌技术<sup>[12]</sup>。

超声波灭活乳中微生物的原理主要是利用超声波的空化效应<sup>[13]</sup>。空化效应表现为超声处理过程中,振幅足够大的声波通过液体传播在液体介质内部产生空化泡,由于超声波的压缩、减压使得空化泡迅速崩溃,产生较高的温度和压力并最终导致微生物失活死亡。在超声波处理过程中会引起介质强烈振动,介质分子的运动越来越快、分子之间相互作用力也越来越大,从而导致介质温度升高的现象被称为超声波的热效应<sup>[13]</sup>。另外,微生物从超声能量中吸收声能并在内部发生热效应,导致细胞内的酶变性而失活,从而影响其新陈代谢,当热效应达到一定程度时微生物的细胞壁及其他组织结构也会遭到破坏,最终使得微生物死亡。

基于超声波杀菌的特点,本文采用不同条件的超声波处理低乳糖牛乳,评价其在 4 °C 贮藏 21 d 内 pH 值、酸度、新鲜度、稳定性、功能成分等理化指标和感官指标的变化,以明确超声波处理对低乳糖牛乳品质的影响。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

生牛乳:市售;乳糖酶(5 000 NLU/g)、亚铁氰化钾、乙酸锌、乙酸铵:上海麦克林生化科技有限公司;氢氧化钠:天津市致远化学试剂有限公司;硫酸铜:天津市光复精细化工研究所;硫酸钾、硫酸、盐酸、1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(1-phenyl-3-methyl-5-pyrazolone, PMP)、D-乳糖、无水乙醇、硼酸、氯化钠、甲醇、乙腈:天津市科密欧化学试剂有限公司;酚酞试剂:中国精化科技研究所;二喹啉甲酸(bicinchoninic acid, BCA)蛋白浓度测定试剂盒:上海科艾博生物技术有限公司。所用试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

FA2004N 电子天平:美国双杰兄弟有限公司;HH 水浴锅:常州市金坛友联仪器研究所;KQ-250DE 超声波:上海蚁霖科学仪器有限公司;S400-K pH 计:上海梅特勒-托利多仪器有限公司;UV-1200PC 紫外可见分光光度计:上海天美科学仪器有限公司;HGK-55 自动凯氏定氮仪:上海沛欧分析仪器有限公司;BK-VX2 涡旋机:江苏海门市其林贝尔仪器制造有限公司;Agilent 1260 高效液相色谱仪:美国安捷伦科技公司;HBS-1101 酶标仪:山东莱恩德智能科技有限公司;Allegra X-30 离心机:上海卢湘仪离心机仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 低乳糖牛乳制备

利用乳糖酶水解生牛乳中乳糖,从而制备低乳糖牛乳<sup>[14]</sup>。以生牛乳为原料,在水解温度 37 °C、酶添加量 0.015 %、水解时间 1.5 h 条件下制备低乳糖牛乳,待乳糖水解率在 90% 左右即水解结束,之后迅速升温至 75 °C 进行 30 s 灭酶处理,然后迅速冷却到室温以下,即可得到低乳糖牛乳。

#### 1.3.2 超声波处理方法

##### 1.3.2.1 杀菌流程

将与恒温水槽连接的夹套烧杯用去离子水冲洗 3 遍,并用 75 °C 以上的烘箱对烧杯进行烘干杀菌,加入 300 mL 低乳糖牛乳,设定超声温度,开始进行超声处理(超声设备的频率为 25 kHz),然后对低乳糖牛乳进行不同超声功率和超声时间的超声波处理。超声处理的过程中保持温度在 20~35 °C,超声完成后立即取样,测定酸度与 pH 值,然后将余下的低乳糖牛乳在 4 °C 冰箱中保存备用。

##### 1.3.2.2 操作要点

准确称取 100 mL 低乳糖牛乳,固定超声功率 100 W,考察超声时间 5、10、15、20 min 对低乳糖牛乳杀菌效果的影响,记为 100/5、100/10、100/15、100/20;固定超声功率 150 W,考察超声时间 5、10、15、20 min 对低乳糖牛乳杀菌效果的影响,记为 150/5、150/10、150/15、150/20;固定超声功率 200 W,考察超声时间 5、10、15、20 min 对低乳糖牛乳杀菌效果的影响,记为 200/5、200/10、200/15、200/20;固定超声功率 250 W,考察超声时间 5、10、15、20 min 对低乳糖牛乳杀菌效果的影响,记为 250/5、250/10、250/15、250/20。

#### 1.3.3 酸度、pH 值的测定

##### 1.3.3.1 酸度测定

采用滴定法<sup>[15]</sup>测定酸度。吸取 10 mL 样品于 150 mL 锥形瓶中,加入 20 mL 蒸馏水和 2 mL 参比溶液混匀作参比颜色;另外于在 150 mL 锥形瓶中,加入 20 mL 蒸馏水、10 mL 奶样和适量的 0.5% 的酚酞指示剂,用 0.1 mol/L NaOH 溶液滴定,滴定终点颜色为淡粉色,并保持 60 s

不变,10倍消耗的NaOH溶液体积即为酸度(°T)。

### 1.3.3.2 pH值测定

采用电位滴定仪测定pH值。取25 mL样品,振荡混匀,测其pH值,重复3次,取平均值,测定均在室温下进行。

### 1.3.4 组织状态稳定性试验

#### 1.3.4.1 热稳定性试验

取10 mL生牛乳和未经超声处理的低乳糖牛乳以及经过不同条件处理后的低乳糖牛乳于试管中,沸水浴5 min,观察管壁是否有絮状沉淀、凝固等现象,若有絮片、颗粒、沉淀产生,则为阳性反应,用“+”表示;若无絮片、颗粒、沉淀产生,即为阴性反应,用“-”表示。

#### 1.3.4.2 酒精稳定性试验

吸取5 mL鲜牛乳和未经超声处理的低乳糖牛乳以及经过不同条件处理后的低乳糖牛乳于平皿中,分别加入5 mL 70%酒精,边加边摇,使酒精与样品均匀混合,并观察现象,记录数据及试验现象。若有絮片、颗粒、沉淀产生,则为阳性反应,用“+”表示;若无絮片、颗粒、沉淀产生,即为阴性反应,用“-”表示。

### 1.3.5 浊度测定

参照Partschefeld等<sup>[16]</sup>的方法,用紫外可见分光光度计在860 nm处测定吸光度。

### 1.3.6 乳化性质测定

参照Jiang等<sup>[17]</sup>的方法略作修改,将低乳糖牛乳制成蛋白含量为0.5%的溶液,用紫外可见分光光度法在500 nm处测定吸光度。

### 1.3.7 乳铁蛋白含量测定

低乳糖牛乳中乳铁蛋白含量测定采用酶联免疫法。取新鲜牛乳和低乳糖牛乳置于离心管中,在4 °C、2 000×g下离心20 min后,将上层漂浮乳脂去除。剩余低乳糖牛乳转移至10 mL高速离心管中,在25 °C、10 000×g下离心20 min。然后使用注射器吸取中间透明的乳清3 mL于洁净的离心管中,根据BCA蛋白浓度测定试剂盒说明书测定乳铁蛋白含量<sup>[18]</sup>。并以吸光度为纵坐标,乳铁蛋白含量为横坐标绘制乳铁蛋白含量测定的标准曲线,线性回归方程为 $Y=0.0092x+0.0562$ , $R^2=0.9955$ 。

### 1.3.8 维生素C含量测定

低乳糖牛乳中维生素C(抗坏血酸)含量的测定参照陈治明等<sup>[19]</sup>的方法。

### 1.3.9 维生素B<sub>2</sub>含量测定

参照王艳芳等<sup>[20]</sup>的方法,采用紫外可见分光光度计在444 nm处测定吸光度。以吸光度为纵坐标,牛乳体积为横坐标绘制标准曲线,线性回归方程为 $Y=0.0121x+0.001$ , $R^2=0.9996$ 。

### 1.3.10 感官评定

参考GB 25190—2010《食品安全国家标准 灭菌

乳》进行适当修改。取适量经不同超声处理后的低乳糖牛乳置于50 mL烧杯中,并在室温自然光下观察其色泽和组织状态,嗅闻气味、品尝滋味后,根据评分要求对每个样品进行打分。所有样品平行测定3次,取其平均值,具体评分标准见表1。

表1 感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

项目	要求	分值
色泽 (10分)	不均匀的黄褐色	1~<4
	均匀一色,但有黄褐色	4~<8
	均匀一致乳白色	8~10
滋味、气味 (10分)	有明显的酸味	1~<4
	乳香味略淡,但无酸味	4~<8
	有乳香味且无异味	8~10
组织状态 (10分)	有黏稠、凝块和分层现象	1~<4
	均匀流体、有微量絮状物沉淀或脂肪上浮	4~<8
	均匀流体、无沉淀、无杂质、无脂肪上浮	8~10

## 1.4 数据处理

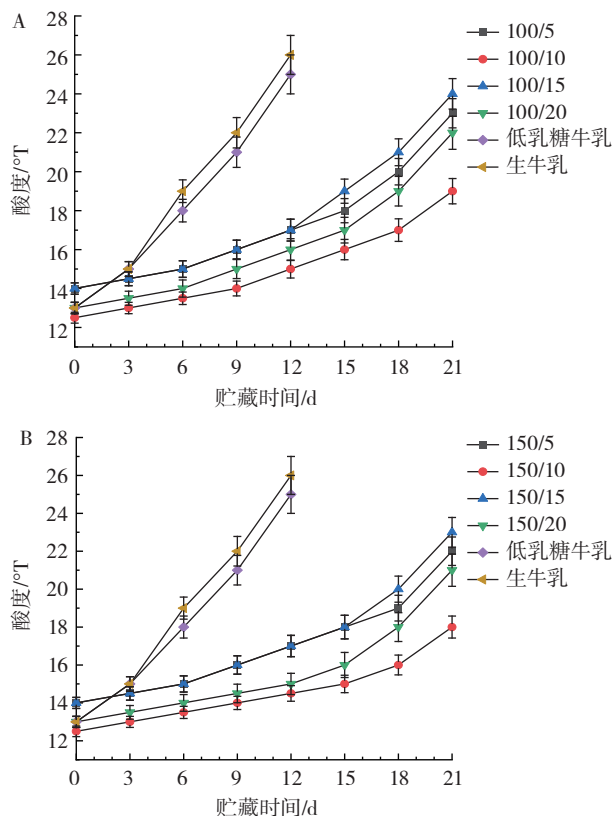
本试验所有数据均为3重复试验的平均值,试验结果以平均值±标准差表示。采用SPSS 26.0进行数据处理与分析,采用Origin 2021作图。

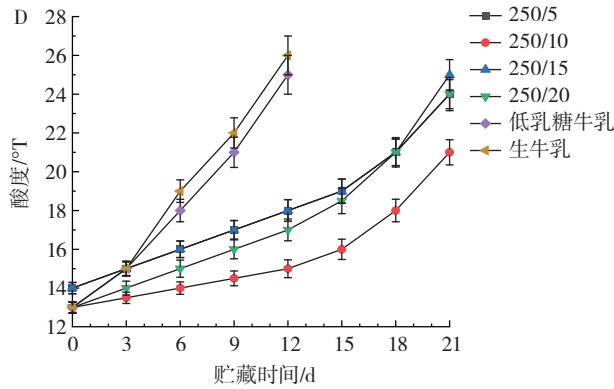
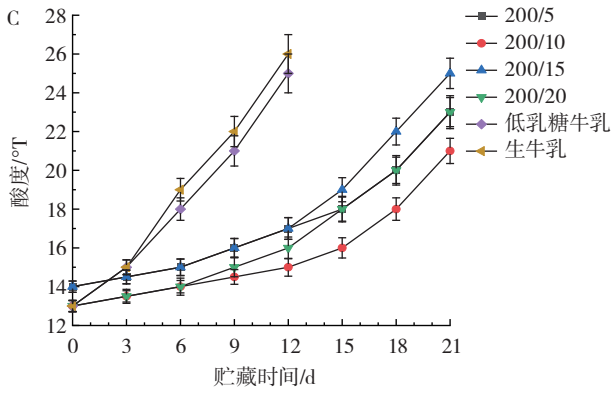
## 2 结果与分析

### 2.1 超声波杀菌对低乳糖牛乳酸度及pH值的影响

#### 2.1.1 超声波杀菌对低乳糖牛乳酸度的影响

相同超声功率不同超声时间条件下制得的低乳糖牛乳在4 °C下贮藏21 d的酸度变化见图1。





A. 100 W 超声功率; B. 150 W 超声功率; C. 200 W 超声功率;  
D. 250 W 超声功率。

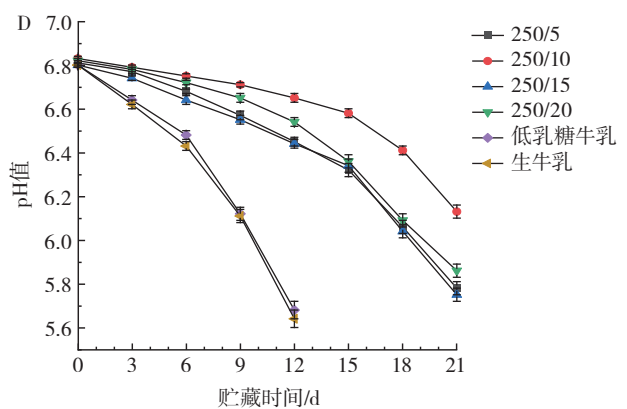
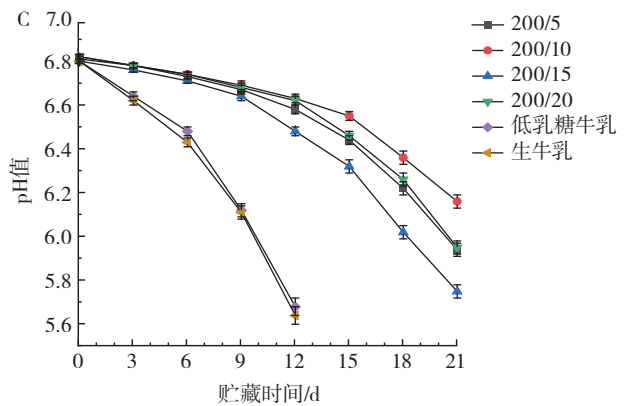
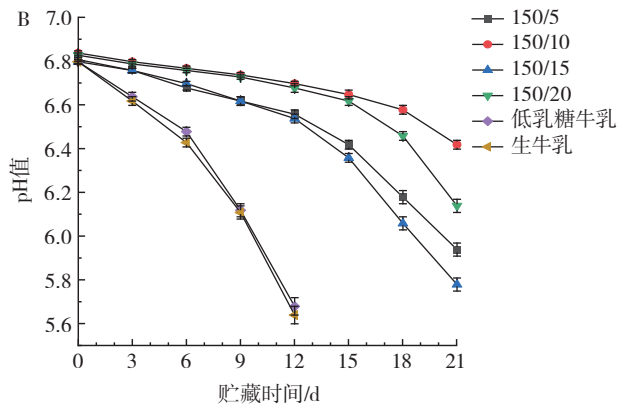
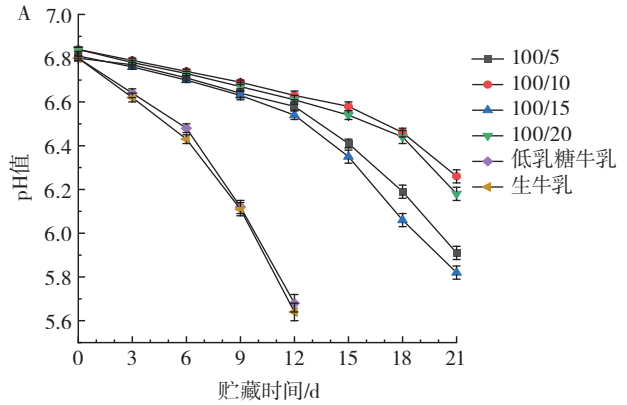
图1 不同超声波杀菌条件下酸度变化

Fig.1 Changes in acidity of low-lactose milk sterilized under different ultrasonic conditions

由图1可知,本试验中低乳糖牛乳的酸度均在 $12^{\circ}\text{T}$ 以上。随着贮藏时间的延长酸度逐渐上升,超声功率固定时,随着超声时间的延长,酸度先缓慢上升后迅速上升;不同超声处理的低乳糖牛乳贮藏15 d后差异较大,其中150 W、10 min和250 W、15 min表现较为明显。在贮藏15 d内,不同杀菌条件处理下,酸度上升缓慢。在超声时间15 min的条件下,酸度上升较快达到临界值 $18^{\circ}\text{T}$ ;在超声时间10 min条件下,酸度上升较为缓慢,基本在 $12\sim 15^{\circ}\text{T}$ 。在贮藏15 d后,酸度有明显上升,但低乳糖牛乳的酸度上升情况略有不同,在超声时间15 min条件下,酸度大幅度上升超出 $12\sim 18^{\circ}\text{T}$ ,发生酸败情况;在超声时间10 min条件下,酸度上升缓慢,基本在 $12\sim 18^{\circ}\text{T}$ 。这是因为超声波的热效应使得牛乳的温度持续升高,从而导致低乳糖牛乳中的蛋白质受热分解,使得牛乳中的酸度上升。刘媛丽<sup>[21]</sup>研究表明,超声波处理对抑制牛乳酸败变质有一定的作用。由此可知,低乳糖牛乳贮藏的最适超声波条件为150 W、10 min。

### 2.1.2 超声波杀菌对低乳糖牛乳 pH 值的影响

同一超声功率不同超声时间的低乳糖牛乳 pH 值的变化见图2。



A. 100 W 超声功率; B. 150 W 超声功率; C. 200 W 超声功率;  
D. 250 W 超声功率。

图2 不同超声波杀菌条件下 pH 值变化

Fig.2 Changes in pH of low-lactose milk sterilized under different ultrasonic conditions



由图2可知,在贮藏过程中低乳糖牛乳的pH值始终小于7,处于略偏酸性的环境中,且随着贮藏时间的延长pH值逐渐降低;在贮藏15d内,pH值下降趋势较缓慢。不同超声处理的低乳糖牛乳在贮藏15d后差异变化较大,其中150W、10min和250W、15min表现较为明显。贮藏后期根据杀菌条件的不同pH值呈现不同的结果。超声10min时,超声功率100、150、200W和250W条件下均能贮藏18d不发生酸败,且150W时能贮藏21d,pH值为6.4。在贮藏15d内,超声功率150W时,随着超声时间延长pH值缓慢下降,pH值在6.4以上;在贮藏15d后,超声功率150W,超声10min时pH值下降最缓慢。由此可知,低乳糖牛乳在贮藏期间的最适杀菌条件为150W、10min。这是由于超声的热效应,导致蛋白质分解和变性,引起酪蛋白沉淀,使得牛乳酸度增加和pH值降低。刘媛丽<sup>[21]</sup>研究表明,超声波处理可以抑制牛乳pH值的下降,与本文研究结果相同。

## 2.2 超声波杀菌对低乳糖牛乳稳定性的影响

### 2.2.1 超声波杀菌对低乳糖牛乳热稳定性的影响

低乳糖牛乳在不同超声条件4℃下贮藏21d的热稳定性变化见表2。

表2 低乳糖牛乳在不同超声条件4℃下贮藏21d的热稳定性变化  
Table 2 Thermal stability of low-lactose milk sterilized under different ultrasonic conditions and stored at 4℃ for 21 days

杀菌条件	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	15 d	18 d	21 d
100/5	-	-	-	-	-	-	+	+
100/10	-	-	-	-	-	-	+	+
100/15	-	-	-	-	-	-	+	+
100/20	-	-	-	-	-	-	+	+
150/5	-	-	-	-	-	-	+	+
150/10	-	-	-	-	-	-	+	+
150/15	-	-	-	-	-	-	+	+
150/20	-	-	-	-	-	-	+	+
200/5	-	-	-	-	-	-	+	+
200/10	-	-	-	-	-	-	+	+
200/15	-	-	-	-	-	-	+	+
200/20	-	-	-	-	-	-	+	+
250/5	-	-	-	-	-	-	+	+
250/10	-	-	-	-	-	-	+	+
250/15	-	-	-	-	-	-	+	+
250/25	-	-	-	-	-	-	+	+
未杀菌低乳糖牛乳	-	-	-	+	+	+	+	+
生牛乳	-	-	-	+	+	+	+	+

注:-表示阴性反应;+表示阳性反应。

由表2可以看出,贮藏前6d,各组均没有出现颗粒物或沉淀。贮藏第9天开始,生牛乳和未处理低乳糖牛乳有颗粒絮状物生成,而低乳糖牛乳中未出现颗粒物或沉淀。贮藏第18天,经超声处理的低乳糖牛乳

出现颗粒絮状物。表明低乳糖牛乳的稳定体系已经被破坏。这是由于超声波杀菌使蛋白质的空间结构发生改变,使得热稳定性提高。这与王喜波等<sup>[22]</sup>研究结果相同。

### 2.2.2 超声波杀菌对低乳糖牛乳酒精稳定性的影响

低乳糖牛乳在不同超声条件4℃下中贮藏21d的酒精稳定性变化见表3。

表3 低乳糖牛乳在不同超声条件4℃下中贮藏21d的酒精稳定性变化  
Table 3 Alcohol stability of low-lactose milk sterilized under different ultrasonic conditions and stored at 4℃ for 21 days

杀菌条件	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	15 d	18 d	21 d
100/5	-	-	-	-	-	-	+	+
100/10	-	-	-	-	-	-	+	+
100/15	-	-	-	-	-	-	+	+
100/20	-	-	-	-	-	-	+	+
150/5	-	-	-	-	-	-	+	+
150/10	-	-	-	-	-	-	+	+
150/15	-	-	-	-	-	-	+	+
150/20	-	-	-	-	-	-	+	+
200/5	-	-	-	-	-	-	+	+
200/10	-	-	-	-	-	-	+	+
200/15	-	-	-	-	-	-	+	+
200/20	-	-	-	-	-	-	+	+
250/5	-	-	-	-	-	-	+	+
250/10	-	-	-	-	-	-	+	+
250/15	-	-	-	-	-	-	+	+
250/25	-	-	-	-	-	-	+	+
未杀菌低乳糖牛乳	-	-	-	+	+	+	+	+
生牛乳	-	-	-	+	+	+	+	+

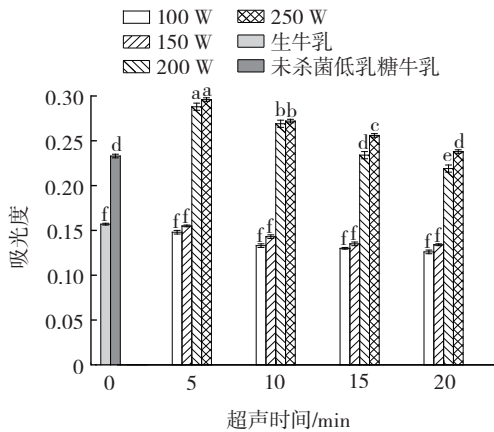
注:-表示阴性反应;+表示阳性反应。

由表3可以看出,贮藏前6d,均没有出现颗粒物或沉淀。贮藏第9天,生牛乳和未处理低乳糖牛乳有颗粒絮状物生成,而超声处理低乳糖牛乳中未出现颗粒物或沉淀。贮藏第18天,经超声处理的低乳糖牛乳出现颗粒絮状物。出现颗粒絮状物说明其酸度较高,新鲜度差,而经过超声波杀菌处理会使蛋白质的空间结构发生改变,稳定性提高,牛乳的新鲜度提高。这与王喜波等<sup>[22]</sup>研究结果相同,经过杀菌后的牛乳稳定性明显提高。

### 2.3 超声波杀菌对低乳糖牛乳浊度的影响

不同超声波杀菌条件下浊度变化见图3。

由图3可知,在150W超声功率范围内,随着超声时间的延长,牛乳的浊度小幅下降。但是与150W相比,200、250W牛乳的浊度较高。张安琪等<sup>[23]</sup>发现杀菌处理使酪蛋白胶束发生分裂,粒径减小,因此浊度降低。由于超声处理的热效应,低乳糖牛乳温度升高,影响酪蛋白的稳定性,导致其粒径增大,从而减缓浊度的降低。



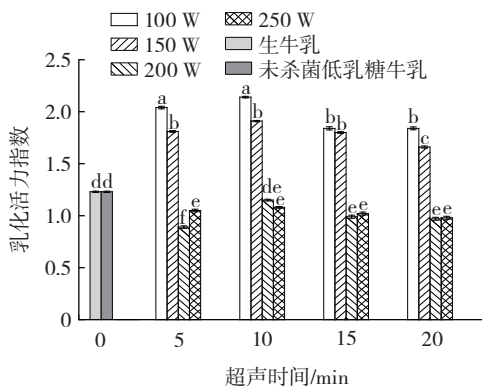
不同小写字母表示存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。

图3 不同超声波杀菌条件下浊度变化

Fig.3 Changes in turbidity of low-lactose milk sterilized under different ultrasonic conditions

#### 2.4 超声波杀菌对低乳糖牛乳乳化性质的影响

将油和水进行混合处理,酪蛋白分子的亲水性和亲油性使其具有向油水界面扩散的倾向,其中疏水性部分朝向脂质,而亲水性部分则朝向水相,从而降低了油水界面的张力并形成薄膜,从而表现出优异的乳化性能。因此,测定乳状液膜对不同种类物质的乳化能力可以评价其乳化性。蛋白质的乳化性可以通过乳化活力和乳化稳定性两个指标进行表征<sup>[24]</sup>。不同超声波杀菌条件下乳化性质变化见图4和图5。

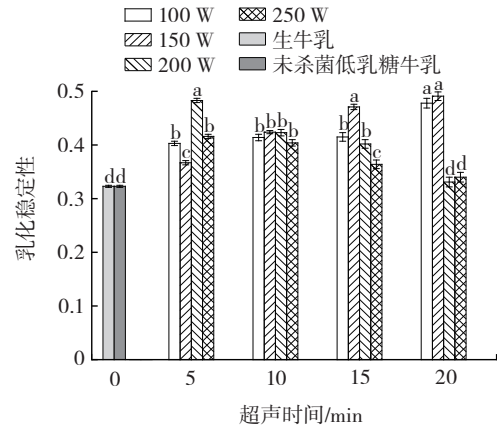


不同小写字母表示存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。

图4 不同超声波杀菌条件下乳化活力指数变化

Fig.4 Changes in emulsifying vitality index of low-lactose milk sterilized under different ultrasonic conditions

由图4可知,当超声功率在150W、处理10min内,低乳糖牛乳乳化活力指数增加,并在10min时达到最大,之后缓慢降低。当超声功率超出150W时,随着超声时间的延长,低乳糖牛乳乳化活力指数整体降低。由图5可知,当超声功率在150W内,乳化稳定性随超声时间的延长而增大。当超声功率超出150W时,超声5min内,低乳糖牛乳乳化稳定性显著增加,并在5min时达到最大,之后缓慢降低。



不同小写字母表示存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。

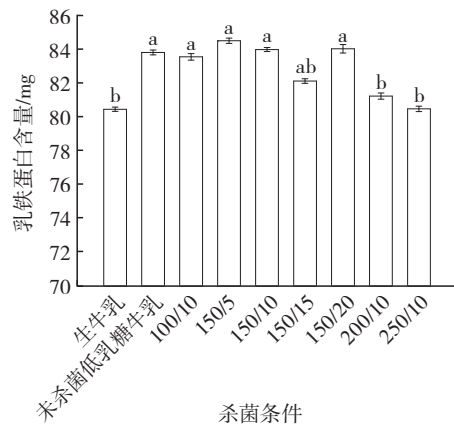
图5 不同超声波杀菌条件下乳化稳定性变化

Fig.5 Changes in emulsifying stability of low-lactose milk sterilized under different ultrasonic conditions

超声处理后,乳清蛋白表面疏水性增加,表明超声引起乳清蛋白三级结构发生改变,引起乳清蛋白中聚集体变小,提升了乳清蛋白的乳化性。王喜波等<sup>[22]</sup>研究表明,经过杀菌处理的原料乳乳化活性和乳化稳定性会得到提升。

#### 2.5 超声波杀菌对低乳糖牛乳中乳铁蛋白含量的影响

乳铁蛋白是一种天然的多功能铁结合糖蛋白。乳铁蛋白不仅参与铁的转运,而且具有抗菌、抗病毒感染、抑制人体肿瘤细胞等作用;还能调节体内铁的平衡,调节骨髓细胞的生成,促进细胞的生长;调节机体免疫功能,增强机体抗病能力<sup>[25-27]</sup>。不同超声波杀菌条件下乳铁蛋白含量变化见图6。



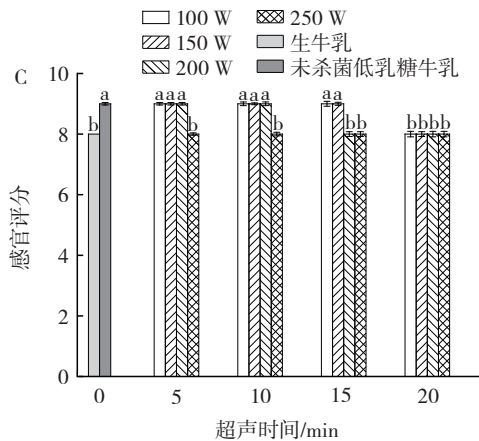
不同小写字母表示存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。

图6 不同超声波杀菌条件下乳铁蛋白含量变化

Fig.6 Changes in lactoferrin content of low-lactose milk sterilized under different ultrasonic conditions

如图6所示,经过100/10、150/5、150/10和150/20超声处理后,低乳糖牛乳中的乳铁蛋白的含量变化不大,说明牛乳中的活性物质得到了有效保留,适宜超声





A. 色泽; B. 滋味、气味; C. 组织状态; 不同小写字母表示存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。

图9 不同超声波杀菌条件对低乳糖牛乳感官的影响

Fig.9 Effects of different ultrasonic conditions on the sensory quality of low-lactose milk

如图9所示,与生牛乳相比,经过不同超声处理的低乳糖牛乳在色泽方面略有改善,但变化并不明显;而在滋味、气味方面有较大改善,与刘飞云等<sup>[30]</sup>研究结果一致。这可能是由于乳糖水解发生美拉德反应产生了更多的挥发性芳香物质,大大改善了牛乳的香味;另外,当低乳糖牛乳经150 W的超声处理,其组织状态明显得以改善;当超出150 W时,随着超声时间的延长,其组织状态反而变差,这可能是由于过高的超声处理可能使低乳糖牛乳中的蛋白和脂肪等降解,从而导致感官品质下降。

### 3 结论

本文通过不同条件的超声波杀菌处理发现,超声波处理功率为150 W、超声时间10 min时,低乳糖牛乳贮藏时间可延长至15 d以上。超声波杀菌这种非热杀菌技术,既可以延长食品货架期,又可降低食品中蛋白质的变性及美拉德反应的发生,而且超声波的热效应、空穴效应等对其功能性成分影响不大。因此,这种非热杀菌技术可以为后续低乳糖牛乳的杀菌条件提供一种参考。

### 参考文献:

[1] CHENG L J. Research of the immobilized lactase in low-lactose milk manufacturing[J/O]. Agricultural and Food Sciences, 2012 [2023-12-01]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID: 88154242>.

[2] CLAEYS W L, VAN LOEY A M, HENDRICKX M E. Intrinsic time temperature integrators for heat treatment of milk[J]. Trends in Food Science & Technology, 2002, 13(9/10): 293-311.

[3] TOEPFL S, MATHYS A, HEINZ V, et al. Review: Potential of high hydrostatic pressure and pulsed electric fields for energy efficient and environmentally friendly food processing[J]. Food Reviews International, 2006, 22(4): 405-423.

[4] BENJAMIN O, GAMRASNI D. Microbial, nutritional, and organo-

leptic quality of pomegranate juice following high-pressure homogenization and low-temperature pasteurization[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(3): 592-599.

[5] TEIXEIRA S C M. High-pressure small-angle neutron scattering for food studies[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2019, 42: 99-109.

[6] LIN Y W, SUBBIAH J, CHEN L, et al. Validation of radio frequency assisted traditional thermal processing for pasteurization of powdered infant formula milk[J]. Food Control, 2020, 109: 106897.

[7] LIN L, WANG X L, LI C Z, et al. Inactivation mechanism of *E. coli* O157: H7 under ultrasonic sterilization[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 59: 104751.

[8] CHATTERTON D E W, AAGAARD S, HESSELBALLE HANSEN T, et al. Bioactive proteins in bovine colostrum and effects of heating, drying and irradiation[J]. Food & Function, 2020, 11(3): 2309-2327.

[9] 张晓君, 王彩云, 程英, 等. 紫外杀菌技术在乳制品灭菌工艺中应用研究进展[J]. 中国乳品工业, 2019, 47(4): 47-52.

ZHANG Xiaojun, WANG Caiyun, CHENG Ying, et al. Advancement of application of ultraviolet sterilization in dairy product sterilization[J]. China Dairy Industry, 2019, 47(4): 47-52.

[10] GAO S P, HEMAR Y, LEWIS G D, et al. Inactivation of *Enterobacter aerogenes* in reconstituted skim milk by high- and low-frequency ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(6): 2099-2106.

[11] 闫坤. 超声波对乳品辅助杀菌及改性技术的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.

YAN Kun. Study on ultrasonic assisted sterilization and modification technology of dairy products[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.

[12] GABRIEL A A. Inactivation of *Listeria monocytogenes* in milk by multifrequency power ultrasound[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 846-853.

[13] MUÑOZ-LABRADOR A, PRODANOV M, VILLAMIEL M. Effects of high intensity ultrasound on disaggregation of a macromolecular procyanidin-rich fraction from *Vitis vinifera* L. seed extract and evaluation of its antioxidant activity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 50: 74-81.

[14] 景文娟, 刘晓兰. 固定化乳糖酶在低乳糖乳制品中的应用[J]. 中国乳业, 2020(5): 73-80.

JING Wenjuan, LIU Xiaolan. Application of immobilized lactase in low lactose dairy products[J]. China Dairy, 2020(5): 73-80.

[15] 刘成相. 乳与乳制品酸度测定方法及其改进[J]. 江苏预防医学, 2008, 19(3): 69-70.

LIU Chengxiang. Determination method of acidity of milk and dairy products and its improvement[J]. Jiangsu Journal of Preventive Medicine, 2008, 19(3): 69-70.

[16] PARTSCHEFELD C, SCHWARZENBOLZ U, RICHTER S, et al. Crosslinking of casein by microbial transglutaminase and its resulting influence on the stability of micelle structure[J]. Biotechnology Journal, 2007, 2(4): 456-461.

[17] JIANG S J, ZHAO X H. Transglutaminase-induced cross-linking and glucosamine conjugation of casein and some functional properties of the modified product[J]. International Dairy Journal, 2011, 21(4): 198-205.

[18] 麦巧冰, 陈杰, 李桢枝. 酶联免疫法检测配方奶粉中乳铁蛋白含量研究——以进口婴幼儿配方奶粉为例[J]. 现代商贸工业, 2016, 37(31): 180-181.

MAI Qiaobing, CHEN Jie, LI Ruizhi. Study on detection of lactoferrin content in formula milk powder by enzyme-linked immunosorbent assay—Taking imported infant formula milk powder as an ex-



- ample[J]. *Modern Business Trade Industry*, 2016, 37(31): 180-181.
- [19] 陈治明, 洪亮. 高效液相色谱法测定牛奶中的维生素 C 含量[J]. *现代食品科技*, 2011, 27(6): 707-709.  
CHEN Zhiming, HONG Liang. Analysis of vitamin C content in milk by HPLC[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2011, 27(6): 707-709.
- [20] 王艳芳. 高压脉冲电场对牛乳中挥发性物质及脂质成分的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2009.  
WANG Yanfang. Effect of high voltage pulsed electric field on volatile substances and lipid components in milk[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [21] 刘媛丽. 超声波杀菌技术在牛乳加工中的应用[J]. *现代畜牧科技*, 2017(8): 4-5.  
LIU Yuanli. Application of ultrasonic sterilization technology in the milk processing[J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2017(8): 4-5.
- [22] 王喜波, 张安琪, 王玉莹, 等. 巴氏杀菌和超巴氏杀菌对牛乳清蛋白结构及热稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 307-313.  
WANG Xibo, ZHANG Anqi, WANG Yuying, et al. Effect of pasteurization and ultra-pasteurization on structure and thermal stability of fresh milk whey protein[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6): 307-313.
- [23] 张安琪, 王玉莹, 李瑞, 等. 超巴氏杀菌对牛乳酪蛋白微观结构及凝聚性质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 106-110.  
ZHANG Anqi, WANG Yuying, LI Rui, et al. Effect of ultra-pasteurization on microstructure and aggregation properties of casein from bovine milk[J]. *Food Science*, 2020, 41(3): 106-110.
- [24] BU G H, ZHANG N, CHEN F S. The influence of glycosylation on the antigenicity, allergenicity, and structural properties of 11S-lactose conjugates[J]. *Food Research International*, 2015, 76(Pt 3): 511-517.
- [25] 王蓓, 唐艳斌, 张炎, 等. 牛乳中乳清蛋白质的功能活性研究进展[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(9): 366-373.  
WANG Bei, TANG Yanbin, ZHANG Yan, et al. Research progress on functional activity of whey protein in milk[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(9): 366-373.
- [26] 王雨奇, 孙翠翠, 杜鹏. 乳铁蛋白分离纯化及功能特性的研究进展[J]. *乳品与人类*, 2023(2): 44-52.  
WANG Yuqi, SUN Cuicui, DU Peng. Research progress on lactoferrin isolation and purification and functional characteristics[J]. *Dairy and Humankind*, 2023(2): 44-52.
- [27] RASCÓN - CRUZ Q, ESPINOZA - SÁNCHEZ E A, SIQUEIROS - CENDÓN T S, et al. Lactoferrin: A glycoprotein involved in immunomodulation, anticancer, and antimicrobial processes[J]. *Molecules*, 2021, 26(1): 205.
- [28] 任璐. 不同杀菌工艺对延长货架期牛乳品质的影响[J]. *乳业科学与技术*, 2022, 45(3): 9-13.  
REN Lu. Effects of different sterilization processes on the quality of extended shelf-life milk[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2022, 45(3): 9-13.
- [29] 刘海燕. 液态乳热处理和贮藏对乳蛋白的稳定性及氧化作用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
LIU Haiyan. Study on the stability and oxidation of milk protein by heat treatment and storage of liquid milk[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [30] 刘飞云, 潘道东, 严玉婷. 鲜乳超声波除菌技术研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(12): 346-349.  
LIU Feiyun, PAN Daodong, YAN Yuting. Study on sterilization of fresh milk with ultrasonic technology[J]. *Food Science*, 2008, 29(12): 346-349.

责任编辑: 冯娜

收稿日期: 2023-12-06