

# 模拟冷链物流过程中温度波动对牛肉丸品质劣变及干耗的影响

李华乐<sup>1</sup>, 王兆明<sup>1,2</sup>, 陈琪琪<sup>1</sup>, 袁晶晶<sup>1</sup>, 徐宝才<sup>1,2\*</sup>

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230031; 2. 合肥工业大学 动物源食品绿色制造与资源挖掘安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 该文以冷冻牛肉丸为研究对象, 探讨冷链温度波动对肉类预制菜冻藏损耗的加速效应。研究表明, 温度波动会加速牛肉丸的色泽和质构变化, 促进蛋白质和脂质的氧化, 随贮藏时间(0~38 d)延长, 牛肉丸硬度、咀嚼性和弹性的降低在温度波动组较为突出。脂质氧化指标硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)值结果表明, 温度波动组的牛肉丸脂质氧化程度更高。恒温组与温度波动组的巯基含量由初始的 1.121  $\mu\text{mol/g}$  分别降至 0.941  $\mu\text{mol/g}$  与 0.607  $\mu\text{mol/g}$ , 表明蛋白质氧化程度的增加。贮藏末期, 在温度波动条件下样品的干耗损失率相较于恒温组高出 2.47%, 离心损失率和蒸煮损失率较恒温组分别增加 0.8% 与 1.54%, 同时冰晶直径增大, 自由水流失增多, 总含水量降低。综上所述, 温度波动会加速牛肉丸的品质劣化和冰晶生长。

**关键词:** 冷链物流; 温度波动; 牛肉丸; 干耗; 品质

## Simulation of the Impact of Temperature Fluctuations on Quality Deterioration and Drying Loss of Beef Meatballs During Cold Chain Logistics

LI Huale<sup>1</sup>, WANG Zhaoming<sup>1,2</sup>, CHEN Qiqi<sup>1</sup>, YUAN Jingjing<sup>1</sup>, XU Baocai<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230031, Anhui, China; 2. Key Laboratory for Animal Food Green Manufacturing and Resource Mining of Anhui Province, Hefei University of Technology, Hefei 230031, Anhui, China)

**Abstract:** This study examined the impact of temperature fluctuations in the cold chain on the storage loss of frozen beef meatballs, a common type of pre-prepared meat dish. The results indicated that temperature fluctuations accelerated the changes in color and texture of beef meatballs and promoted the oxidation of proteins and lipids, and with the extension of storage time (0–38 d), there was a significant decrease in hardness, chewiness, and elasticity of beef meatballs in the temperature fluctuation group. The thiobarbituric acid reactive substances (TBARS, lipid oxidation index) assay found that the degree of lipid oxidation of beef meatballs in the temperature fluctuation group was higher. The thiol content in the constant temperature group and the temperature fluctuation group decreased from the initial 1.121  $\mu\text{mol/g}$  to 0.941  $\mu\text{mol/g}$  and 0.607  $\mu\text{mol/g}$ , respectively, indicating an increase in the degree of protein oxidation. At the end of storage, the drying loss rate of samples in the temperature fluctuation group was 2.47% higher than that in the constant temperature group, and the centrifugal loss rate and cooking loss rate were increased by 0.8% and 1.54%, respectively. Additionally, there were elevated ice crystals in diameter and more loss of free water, and the total water content was reduced. In summary, temperature fluctuations accelerated the quality deterioration and ice crystal growth of beef meatballs.

**Key words:** cold chain logistics; temperature fluctuation; beef meatballs; drying loss; quality

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101992)

作者简介: 李华乐(1998—), 男(汉), 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工与质量控制。

\*通信作者: 徐宝才(1973—), 男(汉), 博士, 研究方向: 肉品加工与质量控制。

引文格式:

李华乐,王兆明,陈琪琪,等.模拟冷链物流过程中温度波动对牛肉丸品质劣变及干耗的影响[J].食品研究与开发,2024,45(7):1-9.

LI Huale, WANG Zhaoming, CHEN Qiqi, et al. Simulation of the Impact of Temperature Fluctuations on Quality Deterioration and Drying Loss of Beef Meatballs During Cold Chain Logistics[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 1-9.

随着生活水平的提高,肉类预制菜产业在我国得到了快速发展,为广大消费者提供了丰富、便利的食品选择。肉类预制菜以其独特的口感、较高的营养价值和便捷性,受到人们的喜爱。然而,肉类预制菜产业的发展,离不开冷链物流的支持。冷链物流作为食品产业链中的重要一环<sup>[1]</sup>,其稳定性直接影响食品的品质和安全性<sup>[2]</sup>。在肉类预制菜产业中,冷链物流保证了肉制品从生产、加工到销售的每一个环节都能在适宜的温度环境下进行,最大程度地保持肉制品的新鲜度和风味。因此,冷链物流的运行效率和稳定性,成为保证肉制品品质的关键。然而,实际操作中,冷链物流过程中的温度波动是难以完全避免的<sup>[3]</sup>,且其对肉制品的品质和安全性影响十分显著。特别是在长距离运输和极端气候条件下,温度波动会加速肉制品的品质劣变<sup>[4]</sup>。近年来,冷链物流所使用的设备和技术已经显著改善,但是肉品品质劣变问题仍然存在<sup>[5]</sup>。

肉类预制菜不仅营养价值高,而且风味独特。但在冷链物流中,温度波动引起的冰晶形成和生长可能会破坏肉类的微观结构,导致细胞内营养成分的流失,进而对其感官品质和营养价值产生不良影响,具体表现为食品的色泽、口感和风味的变化<sup>[6]</sup>。此外,冰晶生长可能导致包装破裂,增加了微生物污染的风险,进而影响食品的卫生安全。因此,对冷冻过程中的冰晶生长进行有效控制是确保冷冻牛肉丸品质的关键环节。

冷藏干耗也是影响肉品品质的一个重要因素。干耗产生的原因是肉品冷藏过程中水分与外界空气进行热湿交换。当肉品的表面湿度降低时,会导致肉品表面脂肪氧化、口感变差、肉质变硬等多种问题的产生,严重时会使肉品无法食用<sup>[7]</sup>。针对这一问题,相关领域的专家以及学者们积极开展了一系列肉品冷链物流方面的研究工作并取得了一定进展<sup>[8]</sup>。研究表明,肉品保存的温度一旦出现较大的波动,就会使肉品产生的干耗现象更加剧烈<sup>[9]</sup>,导致肉品品质发生明显变化。因此,对于肉品冷链物流中温度波动的影响以及相关技术的研究具有重要的意义。

本文以冷冻牛肉丸为例,通过模拟冷链过程中常见的温度波动现象,探讨温度波动对牛肉丸品质劣变及干耗的影响。探讨冷链物流中其他因素(如水分分布、冰晶形态等)对牛肉丸品质的影响,并对未来肉品冷链物流的发展趋势和研究方向进行展望,以期

为冷链物流领域的研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

牛后腿肉(18~20月龄):市售。样品收集后,放置在保温箱中覆上碎冰,并于当天运至合肥工业大学食品与生物工程学院肉品加工与创新实验室进行样品处理。

NaCl、碳酸氢钠、三聚磷酸钠、玉米淀粉、大豆分离蛋白、氯化钾、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)、三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCA)、乙二胺四乙酸(ethylenediamine tetraacetic acid, EDTA)、盐酸、硼酸、氧化镁、碳酸钙:国药集团化学试剂有限公司;平板计数琼脂培养基(plate counting agar medium, PCA)、总硫基检测试剂盒、无水乙醇:生工生物工程(上海)股份有限公司;溴甲酚绿、甲基红:上海麦克林生化科技有限公司。所用试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

绞肉机(HX-J681A):佛山市海迅电器有限公司;冰箱(BC/BD-318HD):青岛海尔特种电冰柜有限公司;均质器(TTL-260):北京同泰联科技发展有限公司;多功能酶标仪(Synergy H1):美国Bio-Tek仪器公司;振荡培养箱(BSD-250):上海博迅实业有限公司医疗设备厂;高温高压灭菌锅(YX280A):上海三申医疗器械有限公司;高速冷冻离心机(CT14RD):上海天美生化仪器设备工程有限公司;数显恒温水浴锅(HH-2):江苏金坛金城国胜实验仪器厂;pH计(Five Easy Plus):梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;质构仪(TA.XT plus):英国Stable Micro Systems公司;核磁共振成像分析仪(NMI20):苏州纽迈分析仪器股份有限公司;分光测色仪(TS7600):深圳市三恩时科技有限公司;光学显微镜(SMZ800N):苏州南光电子科技有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 试验设计

新鲜的牛后腿肉去除可见的脂肪与结缔组织后,分割成块状清洗干净置于绞肉机中搅碎,加入0.2%氯化钠、0.5%碳酸氢钠、0.3%三聚磷酸钠、3%玉米淀粉、3%大豆分离蛋白、20%冰水等配料斩拌成肉糜,制成(25±2)g的肉丸。在50℃温水中定型15min后转移到75℃水中5min,待其冷却后采用托盘包装进

行分装。将处理好的样品进行冷链运输过程模拟,分为冷链一、冷链二。其中,冷链一(记为L1)全程 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冷链二(记为L2)处于温度波动状态。在每个关键点采

集3个样本作为平行样本,并根据不同的采样点进行编号,每个采样点另取一份样品放置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中备用。试验设计见图1。

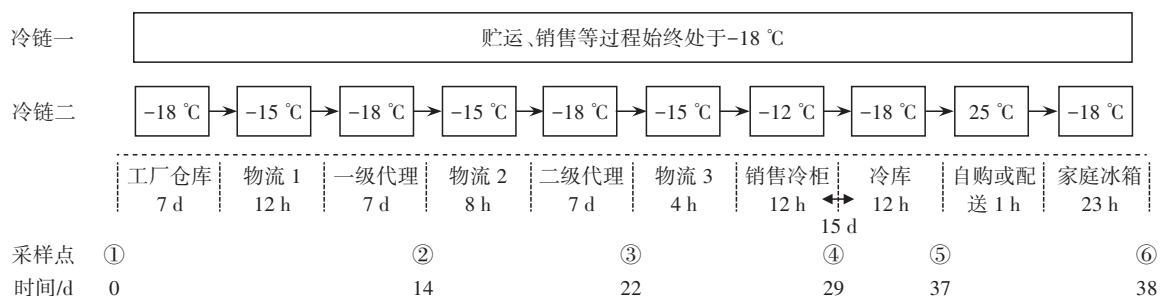


图1 试验设计

Fig.1 Design of experiments

### 1.3.2 色泽测定

使用分光测色仪测量不同处理组牛肉丸样品的色泽,选取样品表面不同部位进行测定,每个处理组进行3次平行试验以获得平均值,分别记录 $L^*$ 值、 $a^*$ 值、 $b^*$ 值。为使测量结果更加准确,测量前先对分光测色仪进行校准。

### 1.3.3 pH值测定

pH值根据Lan等<sup>[10]</sup>的方法进行测定,使用均质器将10g样品在90mL KCl溶液(0.1 mol/L)中均匀化2min制备匀浆。利用pH计进行测定。

### 1.3.4 质构的测定

参考张洁等<sup>[11]</sup>的方法并稍加修改,样品的全质构选用质构仪的P/36R探头进行测定。将样品切成约1cm×1cm×1cm的立方体置于探头下,对样品的硬度、弹性、咀嚼度进行测定。设定仪器测试参数:测前速度为1mm/s;测试速度为5mm/s;测后速度为5mm/s;两次压缩之间的时间延迟为5s,样品压缩距离为40%;触发力为5g。

### 1.3.5 菌落总数(total viable count, TVC)的测定

菌落总数的测定参考王明娟等<sup>[12]</sup>的方法,将10g牛肉丸样品放置在90mL无菌生理盐水(0.9% NaCl)中,用无菌均质器均质2min,取出1mL上清液,进行10倍梯度稀释,采用PCA培养基平板倾注法进行微生物培养,于37℃培养48h。每组进行3次平行试验,取平均值,结果以菌落总数的对数lg(CFU/g)表示。

### 1.3.6 总巯基含量测定

使用总巯基检测试剂盒[5, 5'-dithiobis-(2-nitrobenzoic acid), DTNB法]说明书进行测量。

### 1.3.7 脂质氧化测定

采用硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)来测定脂质氧化的程度<sup>[13]</sup>。将在4℃下解冻3h的样品切碎(以下解冻方法相同),取5g样品于250mL锥形瓶,加入50mL 7.5%的三氯乙酸溶液(含0.01%乙二胺四乙酸二钠),然后50℃水

浴振荡30min,冷却至室温后,用两层定量滤纸过滤,取5mL滤液,与5mL 0.02 mol/L TBA溶液混合,在90℃水浴条件下静置30min。使用相同浓度的TCA混合物作为空白对照,并通过比色法测定532nm波长下的吸光度。结果以丙二醛含量( $X$ , mg/kg)表示,计算公式如下。

$$X=C \times V \times 1\ 000 / (m \times 1\ 000)$$

式中: $C$ 为试样溶液丙二醛浓度,  $\mu\text{g/mL}$ ;  $V$ 为试样溶液定容体积, mL;  $m$ 为试样质量, g。

### 1.3.8 水分指标的测定

#### 1.3.8.1 冻结干耗损失率的测定

在贮藏前将牛肉丸样品依次编号并称重 $W_1$ (g),在每个采样点再次称取其质量 $W_2$ (g),冻结干耗损失率( $G$ , %)的计算公式如下。

$$G=(W_1-W_2)/W_1 \times 100$$

#### 1.3.8.2 离心损失率的测定

取5g牛肉丸样品 $M_1$ ,置于带有滤纸的离心管中,8000×g离心10min后取出称其质量 $M_2$ ,离心损失率( $L$ , %)的计算公式如下。

$$L=(M_1-M_2)/M_1 \times 100$$

#### 1.3.8.3 蒸煮损失率的测定

参考张燕等<sup>[14]</sup>的方法,称取牛肉丸样品质量 $m_1$ (g),置于75℃水浴中煮至中心温度为70℃保持20min后取出,擦干表面水分后称其质量 $m_2$ (g)。蒸煮损失率( $Z$ , %)的计算公式如下。

$$Z=(m_1-m_2)/m_1 \times 100$$

#### 1.3.8.4 低场核磁共振分析

低场核磁共振弛豫的测定参考谢勇<sup>[15]</sup>的方法并稍加修改,先将解冻的牛肉丸样品修整为1cm×1cm×2cm后放入15mm核磁管中。使用Niumag NMR分析软件和carr-purcell-meiboom-gill(CPMG)序列测量横向弛豫时间( $T_2$ )。将收集到的样品的 $T_2$ 衰减曲线转换为弛豫模型进行合并和反演。通过multiple spin-echo(MSE)成像序列获取质子密度图像,将样品分为

4层进行分析,间隙为0.5 mm,每层的宽度为2.9 mm,图像中的质子密度的分布通过 Niumag NMR 分析软件处理。

### 1.3.9 冰晶形态的观察

参考 Luan 等<sup>[16]</sup>的方法并稍加修改,使用预先冷却至 $-18^{\circ}\text{C}$ 的刀片从不同处理组的牛肉丸样品中切下 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的肉样,然后立即放入肌肉组织固定液中固定24~48 h,整个操作过程均在低温环境中进行以保持完整的冷链。固定完成后用70%乙醇浸泡20 min脱水处理,乙醇挥发后进行石蜡包埋、切片染色,最后用光学显微镜观察。

### 1.4 数据处理

所有试验都通过3份平行样品进行3次独立重复试验,统计分析采用SPSS软件25.0版。利用单因素方差分析和邓肯检验分析数据, $p<0.05$ 被认为是显著的。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH值与色泽的变化

模拟冷链期间牛肉丸的pH值变化见图2。

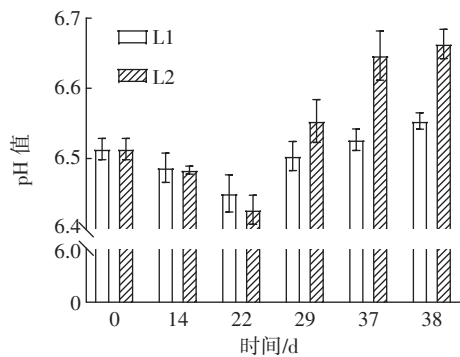


图2 不同处理组样品pH值变化

Fig.2 pH changes of samples in different treatment groups

由图2可知,在整个过程中不同处理组的样品pH值均呈现出先降低后升高的趋势。牛肉丸的初始pH值为6.51,在第22天时冷链一处理的样品pH值降低到6.45,冷链二处理组降低到6.42。随后两组的pH值均呈上升趋势,在模拟的第38天时分别上升到6.55、6.66。在肉制品中,pH值的变化通常被认为与肉品的色泽、风味有一定的关系,冷冻过程中脂肪的氧化反应会产生酸性物质,使样品pH值降低。细菌活性也会对pH值产生影响,冷冻过程抑制了细菌活性,但随着细菌的死亡和腐败,蛋白质分解产物和其他碱性化合物的释放会导致pH值升高<sup>[17]</sup>。此外,随着时间的推移,样品中冰晶也在不断生长,肉体系的蛋白完整性遭到破坏,微生物酶将蛋白质与核苷酸等分解,造成碱性化合物累积使样品在后续的贮藏过程中pH值不断升高。这可能是样品pH值产生变化的主要原因。此外,在温度波动的情况下,样品的pH值变化幅度较

恒温冷链更大。

肉制品色泽是评价肉制品是否新鲜的重要指标,也是影响消费者购买行为的主要因素之一。不同处理组样品色泽变化结果见表1。

表1 不同处理组样品色泽变化

Table 1 Color changes of samples in different treatment groups

指标	时间/d	色泽	
		L1	L2
$L^*$ 值	0	46.50±0.16 <sup>a</sup>	46.50±0.16 <sup>b</sup>
	14	46.64±1.02 <sup>a</sup>	49.15±1.09 <sup>a</sup>
	22	45.98±0.58 <sup>a</sup>	46.31±1.01 <sup>b</sup>
	29	45.73±0.57 <sup>a</sup>	46.50±0.91 <sup>b</sup>
	37	46.08±1.03 <sup>a</sup>	46.79±0.58 <sup>b</sup>
	38	45.85±0.25 <sup>a</sup>	44.75±0.65 <sup>c</sup>
	$a^*$ 值	0	5.18±0.52 <sup>a</sup>
14		5.08±0.55 <sup>a</sup>	4.77±0.65 <sup>a</sup>
22		5.18±0.52 <sup>a</sup>	4.65±0.55 <sup>a</sup>
29		5.40±0.53 <sup>a</sup>	4.69±0.27 <sup>a</sup>
37		5.49±0.49 <sup>a</sup>	5.10±0.40 <sup>a</sup>
38		5.16±0.45 <sup>a</sup>	5.54±0.11 <sup>a</sup>
$b^*$ 值		0	10.79±0.69 <sup>ab</sup>
	14	10.04±0.24 <sup>b</sup>	9.77±0.93 <sup>c</sup>
	22	11.62±1.01 <sup>a</sup>	9.73±0.33 <sup>c</sup>
	29	10.90±1.00 <sup>ab</sup>	9.07±0.88 <sup>c</sup>
	37	11.68±0.81 <sup>a</sup>	10.62±0.42 <sup>b</sup>
	38	11.38±0.31 <sup>ab</sup>	11.72±0.21 <sup>a</sup>

注:同一指标同列不同小写字母表示差异显著, $p<0.05$ 。

由表1可以看出,在模拟冷链的过程中,冷链一处理组的样品 $L^*$ 值与 $a^*$ 值无显著差异( $p>0.05$ )。 $b^*$ 值整体上呈现出上升趋势。相比之下,冷链二处理组中 $a^*$ 值在整个过程中并无显著变化( $p>0.05$ ), $L^*$ 值由初始的46.50在14 d后增加到49.15,而后在第38天时降低到44.75, $b^*$ 值呈现出先下降后上升的趋势,与恒温处理组(L1)相比,温度波动处理组(L2)的 $L^*$ 值、 $a^*$ 值与 $b^*$ 值的变化幅度更大。这可能是由于温度波动导致的脂质氧化和蛋白质氧化等变质反应加剧,影响了肉丸的色泽<sup>[18]</sup>。

### 2.2 质构分析

质构与肉制品的感官属性和适口性具有很高的相关性,决定了产品的品质<sup>[19]</sup>。不同处理组样品质构变化见图3。

由图3可知,在整个模拟冷链物流的过程中,0~14 d时,牛肉丸硬度与咀嚼度均增加,这可能是由于蛋白质的变性和水分的流失。然而14~38 d时随着贮藏时间的延长,硬度与咀嚼度逐渐降低。这种变化可能是由于蛋白质的分解和水分重新分布的影响,导致牛肉丸变得更柔软、更易咀嚼。同样地,牛肉丸的弹性也

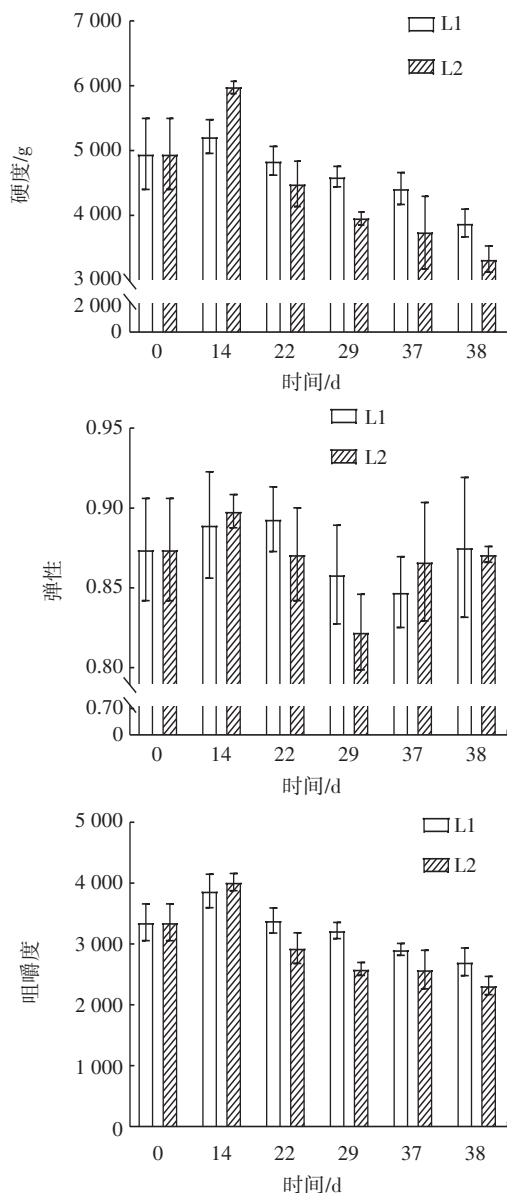


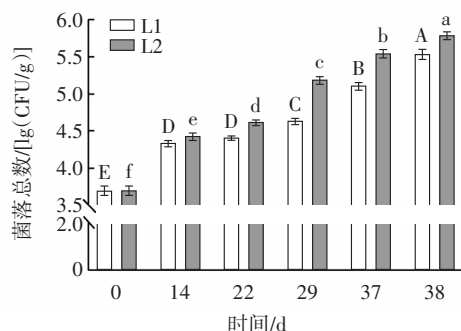
图3 不同处理组样品质构变化

Fig.3 Texture changes of samples in different treatment groups

在贮藏过程中发生变化。初始阶段,牛肉丸可能具有一定的弹性,但随着贮藏时间的延长,弹性整体呈下降趋势。这可能是蛋白质的降解、水分的流失以及脂肪的氧化等因素共同作用的结果。此外,冷链二处理组相比于冷链一处理组的质构特性变化更为明显。这可能是因为冷链二处理组处于温度波动的环境下,加速了冰晶的生长。冰晶的生长会影响肉中内部组织结构的完整性,破坏肌原纤维蛋白三维凝胶结构并导致水分发生迁移,使其质构特性受到更大的影响<sup>[17]</sup>。

### 2.3 菌落总数的变化

通常肉类表面会受到各种腐生微生物的污染。在肉制品中,细菌的生长会引起一系列变化,比如产生不悦的味道、气味和改变质地,最终导致不可食用。不同处理组样品菌落总数变化如图4所示。



同一处理组不同字母表示差异显著,  $p < 0.05$ 。

图4 不同处理组样品菌落总数变化

Fig.4 Changes in total bacterial count of samples in different treatment groups

由图4可知,在整个模拟冷链过程中不同处理组的菌落总数均呈不断上升趋势。其中冷链一处理组由初始的3.68 lg(CFU/g),在第38天时上升至5.54 lg(CFU/g)。在整个模拟冷链过程中,冷链二牛肉丸样品中的菌落总数均高于冷链一,并且在第38天时达到5.79 lg(CFU/g)。低温冷冻能够有效地抑制微生物生长繁殖,但在温度波动过程中,样品中蛋白质、脂质等物质的渗出为嗜冷微生物的生长提供了更多营养物质<sup>[20]</sup>。

### 2.4 贮藏过程中氧化指标分析

图5描述了牛肉丸在不同处理条件下TBARS值的变化。

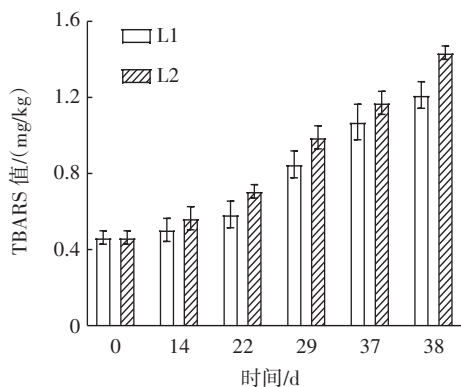


图5 不同处理组样品TBARS值变化

Fig.5 TBARS changes of samples in different treatment groups

由图5可知,两组样品的TBARS值均随着时间的延长而逐渐增加。与冷链二处理组相比,冷链一处理组样品在恒温状态下表现出更低的TBARS值,表明温度波动加剧了脂质氧化程度。同时,脂质氧化是一级反应,作为一种温度依赖性反应,温度越高,氧化反应越快,这与已有研究发现,兔肉在冷藏和超低温贮存期间TBARS值不断增加的结果相一致<sup>[18]</sup>。

TBARS值是评价肉制品脂质氧化程度的常用指标。结果表明,牛肉丸在贮藏过程中发生了脂质氧化。一般来说,温度波动会加速冰晶的生长而引起样品微

观结构的破坏,导致氧化酶、脂肪酶等流出<sup>[21]</sup>,同时在低水分活度下,干耗造成表面水分升华,留下孔洞,从而增加了与氧气的接触,这也是加速冷链二处理组氧化的重要原因。

蛋白质氧化会导致巯基含量减少,因为巯基易受自由基攻击氧化形成二硫键。因此,巯基含量的变化是反映蛋白质氧化程度的重要指标之一<sup>[22]</sup>,不同处理组样品总巯基含量变化见图6。

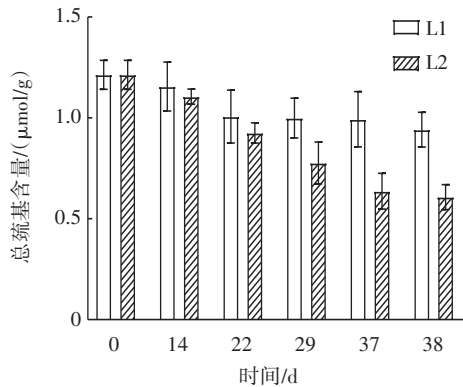


图6 不同处理组样品总巯基含量变化

Fig.6 Changes in total thiol of samples in different treatment groups

由图6可知,随着时间的延长,各处理组的总巯基含量都呈现下降趋势。相似地,文献<sup>[23]</sup>研究发现肌原纤维蛋白中巯基含量在冷藏过程中呈下降趋势,因为总巯基可与活性氧(reactive oxygen species, ROS)反应,形成磺酸、二硫键等氧化产物,从而降低总巯基含量<sup>[24]</sup>,先前的研究也报告了类似的趋势<sup>[25-26]</sup>。其中冷链一处理组总巯基含量在整个过程中高于冷链二。冷链一由初始的 1.121 μmol/g 至第 38 天时下降到 0.941 μmol/g,冷链二处理组经 38 d 后下降到 0.607 μmol/g。这可能是由于温度波动过程中样品的巯基更容易被氧化,形成分子内或分子间的二硫键<sup>[27]</sup>。

## 2.5 贮藏过程中牛肉丸持水性变化

### 2.5.1 贮藏过程中牛肉丸干耗损失的变化

不同处理样品干耗损失率变化见表2。

表2 不同处理组样品干耗损失变化

Table 2 Changes in drying loss of samples in different treatment groups

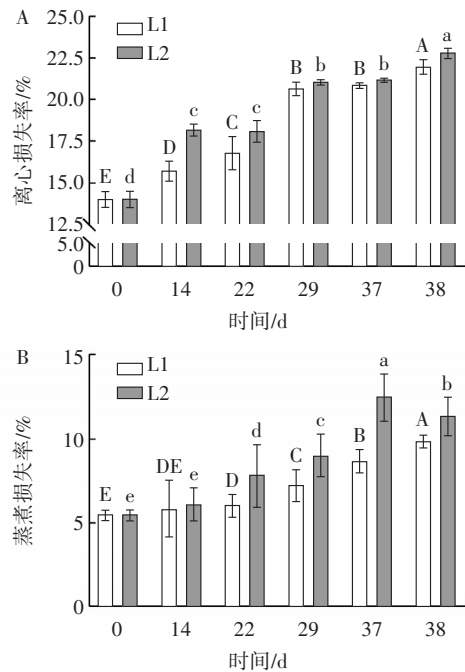
时间/d	干耗损失率/%	
	L1	L2
0	/	/
14	2.39±0.05 <sup>b</sup>	2.74±0.15 <sup>c</sup>
22	2.92±0.11 <sup>b</sup>	3.10±0.18 <sup>c</sup>
29	4.71±0.65 <sup>a</sup>	5.79±0.58 <sup>b</sup>
37	5.31±0.64 <sup>a</sup>	6.13±0.58 <sup>b</sup>
38	5.34±0.66 <sup>a</sup>	7.81±0.65 <sup>a</sup>

注:同列不同小写字母表示差异显著, $p<0.05$ 。/表示第0天未产生干耗。

由表2可知,随着时间的延长,样品的干耗损失率逐渐增加,其中冷链二在整个过程中表现出更高的干耗损失率,这是因为在整个模拟冷链运输的过程中,冷链二处理组处于温度波动的条件下,样品内部形成了更大的冰晶体,从而引起了组织结构的破坏<sup>[28]</sup>,进而导致肉丸的保水性降低,干耗损失率不断上升。

### 2.5.2 贮藏过程中牛肉丸离心损失与蒸煮损失的变化

持水力是评价肉品质的重要指标,而离心损失率和蒸煮损失率均是评价肉品持水力的重要指标。不同处理组样品离心损失率与蒸煮损失率变化见图7。



A. 离心损失率;B. 蒸煮损失率。同一处理组不同字母表示差异显著, $p<0.05$ 。

图7 不同处理组样品离心损失率与蒸煮损失率变化

Fig.7 Changes in centrifugal loss and cooking loss of samples in different treatment groups

如图7A所示,随着时间的延长,不同处理组牛肉丸样品的离心损失率整体呈现出不断上升的趋势,其中冷链一处理组的牛肉丸样品的离心损失率由初始的14.1%经过38d后上升到22.0%。相比之下,冷链二处理组的样品在第29天时离心损失率就已经达到21.1%,在第38天时上升到22.8%。在整个过程中冷链一处于恒温状态,其离心损失率始终低于冷链二处理组,这可能与样品中冰晶形态与氧化程度有一定的关联<sup>[29]</sup>。

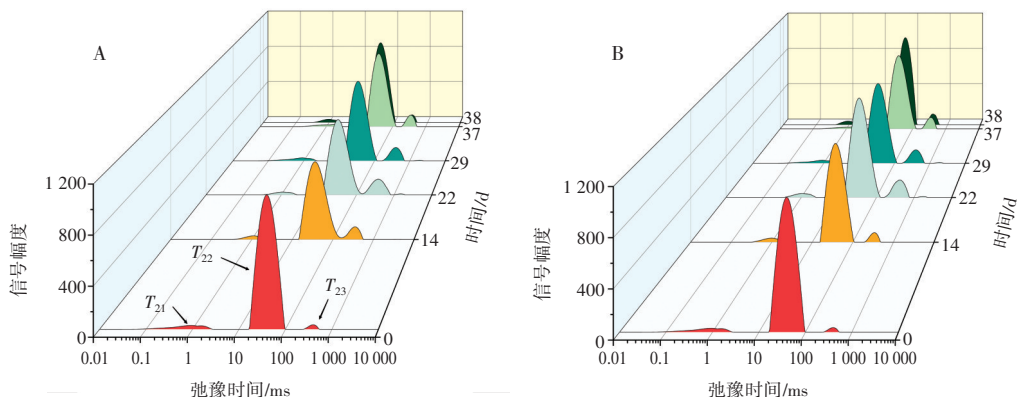
由图7B可知,不同处理组的牛肉丸样品在整个模拟冷链过程中均呈现整体上升的趋势,且不同处理组之间的蒸煮损失率存在较大差异,其中冷链二处理组在第29天时蒸煮损失率已经达到9.01%,与冷链一蒸煮损失率的最高值相接近。这与牛肉丸贮藏方式密

切相关,在温度波动条件下,样品中蛋白三维网状结构更容易遭到破坏,纤维之间的水分更容易流出<sup>[30]</sup>,从而使冷链二处理组的样品具有更高的蒸煮损失率。这与研究发现冰晶的生长会导致蛋白凝胶性能下降、氧化变性与结构遭到破坏,进而降低其持水能力的结果相

一致<sup>[20]</sup>。综上,温度波动能够加快肉制品持水力的降低。

### 2.5.3 贮藏过程中牛肉丸水分迁移的变化

通过对牛肉丸样品进行低场核磁共振分析得到水分分布图,结果如图8所示。



A. 冷链一; B. 冷链二。

图8 不同处理组样品的 $T_2$ 水分弛豫图

Fig.8  $T_2$  relaxation images of water in samples in different treatment groups

由图8可知, $T_{21}$ 在0.1~10 ms代表结合水, $T_{22}$ 在10~100 ms代表不易流动水, $T_{23}$ 在100~1 000 ms代表自由水。随着温度波动次数增加,冷链一与冷链二处理组样品结合水含量有所降低,但变化并不明显,不易流动水含量随着时间的延长而有所降低,自由水含量呈先上升后下降的趋势,这可能是肉丸内部组织结构遭到破坏所导致。而后自由水以汁液的形式流出,自由水含量降低,因此肉丸中总含水量降低。这种现象在冷链二处理组中表现得更为明显,这可能是由于随

着温度波动次数的增加,肌原纤维内的水分迁移到细胞外,形成了更大的冰晶体,对肉丸组织和细胞结构的破坏加剧。Ali等<sup>[31]</sup>也在鸡胸肉冻融循环过程中发现了相同的变化趋势。

### 2.6 微观结构

冰晶大小对冷冻肉制品的品质具有重要影响。因此,通过观察冰晶形态可以更好地了解肉制品品质的变化。不同处理组样品冰晶形态变化见图9。

由图9可知,牛肉丸中存在许多圆形白色空腔结

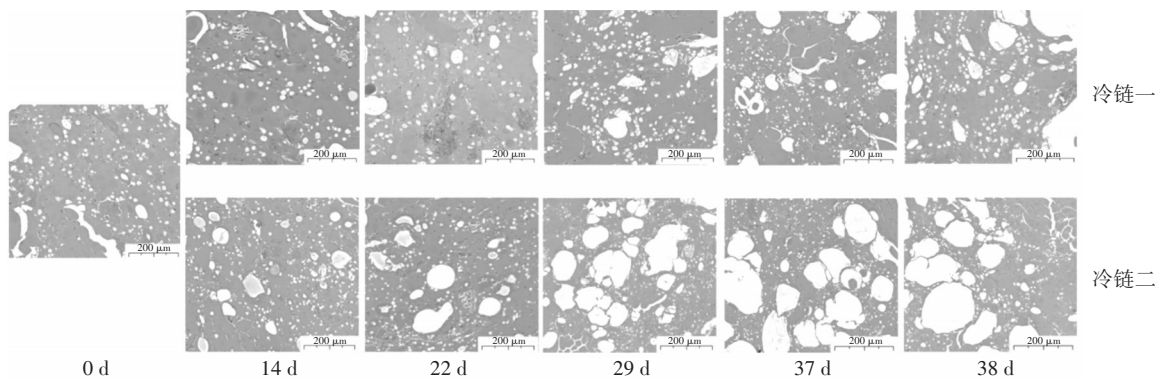


图9 不同处理组样品冰晶形态变化

Fig.9 Changes in ice crystal morphology of samples in different treatment groups

构。其中,较大的圆形空腔为脂肪部分,较小的则可能是水或空气造成。温度波动对冻藏样品中的冰晶形态有明显影响。在储存过程中,温度波动可能导致冰晶重新结晶,从而对组织结构造成不良影响。冷链二处理组牛肉丸的冰晶面积和直径与冷链一处理组存在差异,表明温度波动使冰晶面积增加,在加剧对组织结构

破坏的同时影响了其保水能力和汁液流失的程度<sup>[32]</sup>。

## 3 结论

研究表明,冷链物流在温度波动条件下对冷冻牛肉丸的品质存在明显影响。在温度波动条件下,牛肉丸的脂质氧化、蛋白质氧化、持水性和冰晶形态等

均受到了影响。温度波动加剧了脂质和蛋白质的氧化程度,降低了牛肉丸的持水性,改变了冰晶的大小和形态。此外,温度波动对肉丸的色泽也会产生负面影响。因此,要确保冷冻牛肉丸的品质,关键在于冷链运输过程中严格控制温度,避免温度波动。未来冷链物流领域的研究重点将集中在通过研究新技术、提升监管能力以及优化包装材料等方式来减少外界温度对产品的影响,从而提高产品在温度波动条件下的稳定性。这对于冷冻食品的冷链管理和品质控制具有重要的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 王友珍. 我国冷链物流发展现状与趋势研究[J]. 物流科技, 2023, 46(13): 125-126.  
WANG Youzhen. Research on the current situation and trend of the cold chain logistics development in our country[J]. Logistics Sci-Tech, 2023, 46(13): 125-126.
- [2] 吴佳佳. 冷链物流发展存在的问题及对策研究[J]. 中国集体经济, 2022(31): 106-108.  
WU Jiajia. Research on the problems and countermeasures in the development of cold chain logistics[J]. China Collective Economy, 2022(31): 106-108.
- [3] 张金钰. 生鲜品冷链断链原因及对策分析[J]. 中国物流与采购, 2020(17): 49-50.  
ZHANG Jinyu. Causes and countermeasures of cold chain breakage of fresh products[J]. China Logistics & Purchasing, 2020(17): 49-50.
- [4] 司徒慧媛, 李玉梅, 高加龙, 等. 模拟冷链流通中温度波动对养殖金鲷鱼肉品质及微生物多样性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(5): 148-159.  
SITU Huiyuan, LI Yumei, GAO Jialong, et al. Effect of temperature fluctuation during simulated cold chain circulation on meat quality and microbial diversity of cultured *Trachinotus ovatus*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(5): 148-159.
- [5] 五彩云. 肉类在冷藏和冻藏中干耗的研究[J]. 肉类工业, 1997(6): 21-23.  
WU Caiyun. Study on dry consumption of meat in cold storage and frozen storage[J]. Meat Industry, 1997(6): 21-23.
- [6] WANG Y, LIANG H, XU R Y, et al. Effects of temperature fluctuations on the meat quality and muscle microstructure of frozen beef[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 116: 1-8.
- [7] DING D M, ZHOU C Y, GE X Y, et al. The effect of different degrees of superchilling on shelf life and quality of pork during storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(4): e14394.
- [8] 杨坤, 张翔戈, 何榕波, 等. 冷链无源蓄冷保温包装温度场研究[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(24): 87-89, 97.  
YANG Kun, ZHANG Xiangge, HE Rongbo, et al. Research on temperature field of cold chain passive thermal insulation packaging[J]. Heilongjiang Science, 2022, 13(24): 87-89, 97.
- [9] 范薇. 温度波动对带包装速冻食品干耗的影响及控制[J]. 冷藏技术, 2016, 39(3): 28-31.  
FAN Wei. Effect and control of temperature fluctuations on frozen food with packaging weight loss[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2016, 39(3): 28-31.
- [10] LAN Y, SHANG Y B, SONG Y, et al. Changes in the quality of superchilled rabbit meat stored at different temperatures[J]. Meat Science, 2016, 117: 173-181.
- [11] 张洁, 吴香, 张万刚, 等. 血浆蛋白对调理猪排品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 24-31.  
ZHANG Jie, WU Xiang, ZHANG Wangang, et al. Effects of blood plasma on the quality characteristics of prepared pork chops[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 24-31.
- [12] 王明娟, 王瑞贤. 壳聚糖与丁香精油对调理猪排微生物指标的影响[J]. 现代食品, 2021(15): 216-218.  
WANG Mingjuan, WANG Ruixian. Effect of chitosan and clove essential oil on microbial indexes of prepared pork chops[J]. Modern Food, 2021(15): 216-218.
- [13] ZHANG Y M, HOLMAN B W B, PONNAMPALAM E N, et al. Understanding beef flavour and overall liking traits using two different methods for determination of thiobarbituric acid reactive substance (TBARS)[J]. Meat Science, 2019, 149: 114-119.
- [14] 张燕, 李升升, 赵立柱. 基于主成分和聚类分析的藏羊部位肉品质评价[J]. 食品科技, 2022, 47(4): 128-133.  
ZHANG Yan, LI Shengsheng, ZHAO Lizhu. Evaluation of Tibetan sheep meat quality based on principal component and cluster analysis[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(4): 128-133.
- [15] 谢勇. 低压静电场辅助冻结对调理牛排品质的影响及机理探究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.  
XIE Yong. Effect of low-voltage electrostatic field assisted freezing on the quality of conditioned steak and its mechanism[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [16] LUAN L L, WANG L P, WU T T, et al. A study of ice crystal development in hairtail samples during different freezing processes by cryosectioning versus cryosubstitution method[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 87: 39-46.
- [17] LI X F, LI C, YE H, et al. Changes in the microbial communities in vacuum-packaged smoked bacon during storage[J]. Food Microbiology, 2019, 77: 26-37.
- [18] WANG Z F, HE Z F, ZHANG D, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on protein and lipid oxidation in rabbit meat[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(6): 3004-3015.
- [19] WANG Y Y, TAYYAB RASHID M, YAN J K, et al. Effect of multi-frequency ultrasound thawing on the structure and rheological properties of myofibrillar proteins from small yellow croaker[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105352.
- [20] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review[J]. Meat Science, 2012, 91(2): 93-98.
- [21] PAN N, DONG C H, DU X, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the quality of quick-frozen pork patty with different fat content by consumer assessment and instrument-based detection[J]. Meat Science, 2021, 172: 108313.
- [22] XU M F, LIAN Z H, CHEN X Q, et al. Effects of resveratrol on lipid and protein co-oxidation in fish oil-enriched whey protein isolate emulsions[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130525.
- [23] 杜琪, 廖月琴, 吴盈茹, 等. 冷藏过程中细点圆趾蟹肌肉品质变化研究[J]. 核农学报, 2023, 37(5): 1012-1021.  
DU Qi, LIAO Yueqin, WU Yingru, et al. Changes in quality characteristics of sand crab (*Ovalipes punctatus*) during chilled storage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(5): 1012-1021.
- [24] 岳建伟, 师希雄, 孙金龙, 等. 宰后成熟过程中活性氧介导的氧化应激对肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 247-251.  
YUE Jianwei, SHI Xixiong, SUN Jinlong, et al. Effects of reactive oxygen species mediated oxidative stress on meat quality during



- postmortem aging[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(2): 247-251.
- [25] SOYER A, ÖZALP B, DALMIŞ Ü, et al. Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 1025-1030.
- [26] ZHANG X C, HUANG W B, XIE J. Effect of different packaging methods on protein oxidation and degradation of grouper (*Epinephelus coioides*) during refrigerated storage[J]. Foods, 2019, 8(8): 325.
- [27] CAO Y G, AI N S, TRUE A D, et al. Effects of (-)-epigallocatechin-3-gallate incorporation on the physicochemical and oxidative stability of myofibrillar protein-soybean oil emulsions[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 439-445.
- [28] SHAO Y, WANG L, CHEN C S, et al. Antioxidant capacity of fermented soybeans and their protective effect on protein oxidation in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) during repeated freezing-thawing (FT) treatments[J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 91: 213-221.
- [29] 姜晴晴, 邵世奇, 陈士国, 等. 冻融循环对带鱼蛋白质性质及肌肉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(4): 122-129.
- JIANG Qingqing, SHAO Shiqi, CHEN Shiguo, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the characteristics of protein and the quality of muscle in hairtail(*Trichiurus haumela*)[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(4): 122-129.
- [30] LI F F, WANG B, KONG B H, et al. Decreased gelling properties of protein in mirror carp (*Cyprinus carpio*) are due to protein aggregation and structure deterioration when subjected to freeze-thaw cycles[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105223.
- [31] ALI S, ZHANG W G, RAJPUT N, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of chicken breast meat[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 808-814.
- [32] QIAN S Y, LI X, WANG H, et al. Effects of low voltage electrostatic field thawing on the changes in physicochemical properties of myofibrillar proteins of bovine *Longissimus dorsi* muscle[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 261: 140-149.

加工编辑:张昱  
收稿日期:2023-10-09