DOI:10.12441/spyswjs.20240326001 [文章编号] 1673-1689(2024)09-0010-11

# 温度波动对冷鲜鸡贮藏品质的影响

汪辰晨 赵建伟* 陈 龙 金征宇

(江南大学食品学院,江苏 无锡 214122)

**摘要:**冷鲜鸡作为生鸡消费的主要形式,在冷链贮存和运输过程中经常会出现温度波动,但其对鸡肉品质的影响尚不明确。将冷鲜鸡肉在两个温度波动范围(0~4 ℃、0~10 ℃)条件下贮藏,并以恒温(0、4、10 ℃)贮藏为对照,测定贮藏过程中鸡肉样品的理化指标(挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、风味、汁液流失率、持水力、质构、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid-reactive substances, TBARS))和微生物指标(菌落总数、假单胞菌、热杀索丝菌、肠杆菌、乳酸菌),采用低场核磁共振技术和扫描电子显微镜观察鸡肉内部水分和组织微观结构的变化,研究冷鲜鸡肉贮藏过程中的品质变化。结果表明,在贮藏第 8 天,冷鲜鸡肉在温度波动 0~4 ℃、0~10 ℃条件下的 TVB-N 值分别是 4 ℃恒温贮藏下的 1.12 倍和 1.34 倍,菌落总数是 4 ℃恒温贮藏下的 1.90 倍和 3.95 倍。温度波动加快了冷鲜鸡肉中假单胞菌、热杀索丝菌和肠杆菌的繁殖,促使鸡肉肌原纤维分离、组织结构破坏,水分从鸡肉内部向外部迁移,造成汁液流失率显著增加,持水力显著下降,加快了冷鲜鸡品质劣变。

**关键词:**冷鲜鸡;温度波动;贮藏品质

# Effects of Temperature Fluctuation on Storage Quality of Chilled Chicken

*WANG Chenchen ZHAO Jianwei* CHEN Long JIN Zhengyu*

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Chilled chicken is the primary form for raw chicken consumption. Temperature fluctuations often occur during cold chain storage and transportation, however, the impact of these fluctuations on chicken quality remains unclear. Chilled chicken was stored for varying durations under two temperature fluctuation ranges (0~4 ℃, 0~10 ℃), with constant storage temperatures (0, 4, and 10 ℃) as controls. The quality changes of chilled chicken during storage were determined by analyzing physicochemical indicators, including total volatile basic nitrogen (TVB-N), flavor, juice loss rate, water-holding capacity, texture, and thiobarbituric acid-reactive substances (TBARS), as well as microbial indicators such as total viable counts, *Pseudomonas*, *Brochothrix thermosphacta*, *Enterobacter*, and lactic acid bacteria. Low-field nuclear magnetic resonance and scanning electron microscopy were used to observe changes in internal moisture and tissue microstructure in chicken. The results showed that on the 8th day of storage, the TVB-N value of chilled chicken stored under fluctuating temperature (0~4 ℃, 0~10 ℃) was 1.12 and 1.34 times higher, respectively, than that of chicken stored at a constant 4 ℃. Additionally, the total viable counts were 1.90 and 3.95 times higher than those under constant 4 ℃ storage. Temperature fluctuations accelerated the reproduction of *Pseudomonas*, *Brochothrix thermosphacta*, and *Enterobacter* in chilled chicken, promoting the separation of chicken myofibrils, damaging tissue structure, and causing water migration from the interior to the surface of the chicken. This led to a significant increase in juice

**基金项目:**国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFD2100602)。

**通信作者:**赵建伟(1971—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事食品加工分析与质量控制研究。E-mail: zhaojw@jiangnan.edu.cn

**收稿日期:**2024-03-26 **修回日期:**2024-04-18

loss rate and a notable decrease in water-holding capacity, thereby accelerating the quality deterioration of chilled chicken.

**Keywords:** chilled chicken; temperature fluctuation; storage quality

鸡肉因其蛋白质含量高、胆固醇和脂肪含量低等特性，具有较高的营养价值，深受消费者喜爱[1]。目前市场上的鸡肉主要分为3种：冷冻鸡、冷鲜鸡和热鲜鸡。其中，冷冻鸡在解冻过程中易导致风味、营养物质损失和质构破坏；热鲜鸡则通常以现场宰杀活鸡的方式销售，由于未经过冷却排酸处理，容易受到腐败微生物的污染。近年来，受禽流感和新冠疫情的影响，国家大力支持禽类“集中屠宰，冷鲜上市”的政策，因此冷鲜鸡逐渐成了鸡肉消费的主流趋势[2-3]。冷鲜鸡是指屠宰后迅速冷却，使胴体中心温度降至0~4 ℃，并在后续生产、运输及销售的整个过程始终处于0~4 ℃的鸡[4]。然而，即使在这种低温环境下，由于鸡肉水分含量高且营养丰富，微生物容易生长繁殖，进而导致鸡肉发生腐败[5]。因此，为了更好地提高鸡肉质量并满足消费者需求，还需要更深入地了解理化和微生物因素是如何影响鸡肉品质的。

在贮藏过程中，冷藏温度是影响食品品质的重要因素，它会影响食品中微生物的生长，进而影响食品品质[6-7]。在实际的冷鲜鸡冷链运输和销售过程中，由于转运次数多、运输时间长、冷藏设备不完善及操作不规范等因素，常常导致冷藏温度发生波动。即使是微小的温度变化也会影响肉类中微生物生长、蛋白质降解和氧化特性，从而影响肉品的感官性状[8]。Mai等[9]研究表明，在运输和销售过程中，冷鲜鸡可能会因为制冷设备的缺陷导致其贮藏温度在0~10 ℃内波动，偏离了冷链规定的0~4 ℃温度范围。Yu等[10]研究了温度波动对鲑鱼品质的影响，发现在0~4 ℃波动贮藏下，鲑鱼的微生物繁殖速度比在0 ℃和4 ℃恒温贮藏时更快，鲑鱼的品质下降也更快。黄文博等[11]研究冷链温度波动对美国红鱼的影响，结果表明温度波动及其频率对美国红鱼生理和品质指标都有不同程度的负面影响。Wang等[12]的研究发现冷链温度波动显著影响了大眼金枪鱼的微生物菌落。

尽管已有一些关于温度波动对肉类品质影响的研究，但针对冷鲜鸡品质的具体影响仍缺乏深入研究。将冷鲜鸡肉在两种温度波动（0~4 ℃、0~10 ℃）和3种恒定温度（0、4、10 ℃）下贮藏，分析鸡肉在贮藏过程中TVB-N、风味、汁液流失率、持水力、质构、TBARS等理化指标和微生物指标的变化，明确冷鲜鸡肉的贮藏品质变化，为冷鲜鸡在冷链运输过程中的品质保障提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

冷鲜鸡：无锡生鲜市场。当日宰杀的整鸡，经快速预冷至鸡肉中心温度为0~4 ℃，用装有冰袋的保温箱保存，30 min内运至实验室冷藏。

硼酸、盐酸、体积分数95%乙醇、氧化镁、三氯乙酸等：国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

拍打式均质器：JX-05型，上海净信实业发展有限公司；离心机：TGL-16B型，上海安亭科学仪器厂；紫外分光光度计：V-1800型，上海美谱达仪器有限公司；低温培养箱：IL-11-2C型，上海沉汇仪器有限公司；冷场发射扫描电子显微镜：SU8100型，日本株式会社日立高新技术；物性分析仪：TA. XT Plus型，英国Stable Micro System公司；快速气相色谱电子鼻：Heracles II型，法国阿默思公司；低场核磁共振成像分析仪：MesoMR23-060V-I型，苏州纽迈分析仪器股份有限公司；恒温培养箱：DHP 303-00型，天津赛得利斯实验分析仪器制造厂。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品制备

从新鲜冷鲜鸡上取下鸡胸肉，去除可见脂肪和结缔组织，切成大小为40 mm×40 mm×10 mm的小块，装入无菌自封袋并随机分为5组。第1组（B4组）为0~4 ℃温度波动贮藏：第1天为0 ℃贮藏，第2天为4 ℃贮藏，第3天为0 ℃贮藏，第4天为4 ℃贮藏，如此往复共贮藏8 d；第2组（B10组）为0~10 ℃温度波动贮藏：第1天为0 ℃贮藏，第2天为10 ℃贮藏，第3天为0 ℃贮藏，第4天为10 ℃贮藏，如此往复共贮藏8 d；第3组（H0组）、第4组（H4组）、第5组（H10组）分别在0、4、10 ℃恒温贮藏8 d，作为对照组。分别在0、2、4、6、8 d末对

5组鸡肉样品随机取样并测定相关指标。

1.3.2 TVB-N值测定

按照GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中半微量定氮法测定。

1.3.3 风味分析

使用电子鼻测定鸡肉在不同温度贮藏过程中的风味特征。称取5 g鸡肉样品置于20 mL顶空气相瓶中，50 ℃下平衡30 min以达到顶空气体平衡，每组样品重复3次，最后通过Alpha软件进行主成分分析（principal component analysis，PCA）。

1.3.4 汁液流失率

参考何向丽等[13]的方法测定样品汁液流失率。贮藏开始时，称取鸡肉样品质量并记录为$M_0$，之后的每个取样日随机抽取鸡肉样品并记录其质量为$M_1$。按式（1）计算样品的汁液流失率。

$$D=(M_0-M_1)/M_0\times 100\% \quad (1)$$

式中：

$D$——鸡肉样品的汁液流失率，%；

$M_0$——鸡肉样品的初始质量，g；

$M_1$——冷藏后鸡肉样品的质量，g。

1.3.5 持水力测定

参考Liu等[14]的方法，采用离心法测定样品的持水力。切取一块鸡肉样品其质量记为$M_2$，用双层滤纸包裹住并置于底部垫有足够脱脂棉的50 mL离心管中，于4 ℃、1 500 r/min离心10 min。离心后对样品质量进行称量并记录为$M_3$。按式（2）计算样品持水力。

$$W=M_3/M_2\times 100\% \quad (2)$$

式中：

$W$——鸡肉样品的持水力，%；

$M_2$——鸡肉样品离心前的质量，g；

$M_3$——鸡肉样品离心后的质量，g。

1.3.6 质构测定

参考赵天娇[15]的方法并稍加修改，使用TA.XT Plus物性分析仪测定鸡肉样品的质构特性。将鸡肉样品切成2 cm×2 cm×1 cm的立方体，选择TPA模式，探头为P/50。测试条件为：探头回升到距离鸡肉样品表面15 mm，测试前速度为2.0 mm/s，测试中速度为1.0 mm/s，测试后速度为2.0 mm/s，形变量为50%，两次下降时间间隔为5 s，触发力为5 g。通过分析鸡肉样品的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性来表征冷鲜鸡肉贮藏期间质构特性。每个鸡肉样品重复测定10次。

1.3.7 TBARS值测定

参考GB5009.181—2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》中分光光度法测定。称取3 g鸡肉样品，与30 mL三氯乙酸溶液混合，均质2 min，用双层慢速滤纸过滤2次。取5 mL上清液与5 mL的0.02 mol/L TBARS溶液混合均匀，在沸水浴中加热40 min，生成粉红色化合物，流水冷却至室温。在532 nm处测定吸光度值，代入1，1，3，3-四乙氧基丙烷标准曲线计算TBARS值。

1.3.8 微生物计数

参考Luzardo等[16]的方法并稍加修改。在超净台中称取10.00 g鸡肉样品，置于装有90 mL无菌生理盐水的无菌均质袋中，用拍打式均质器以10次/s的频率拍打2 min，取拍打后的样品溶液，用无菌生理盐水进行一系列10倍稀释，取100 μL合适稀释梯度的样品溶液，涂布在含不同培养基的平板上，将涂布后的平板置于各微生物的最适条件下培养并计数，培养条件见表1。

表1 不同微生物培养条件

Table 1 Different microbial culture conditions

| 微生物种类 | 培养基 | 温度/℃ | 时间/d |
|---|---|---|---|
| 菌落总数 | 平板计数琼脂培养基 | 37 | 2 |
| 假单胞菌 | 假单胞菌CFC选择性培养基 | 25 | 2 |
| 热杀索丝菌 | STAA琼脂培养基 | 30 | 2 |
| 肠杆菌 | 结晶紫中性红胆盐葡萄糖琼脂培养基 | 37 | 2 |
| 乳酸菌 | MRS琼脂培养基 | 30 | 2 |

1.3.9 水分分布及状态

参考Liu等[14]的方法，采用低场核磁共振技术分析样品的水分分布及状态。将鸡肉切成大小一致的小块，测试前先使用甘油对仪器进行校正。测试条件为：采样频率为100 kHz，氢质子共振频率为21 MHz，等待时间（$T_W$）为3 000 ms，重复次数（NS）为8，回波时间（$T_E$）为0.50 ms，回波数（NECH）为1 000。通过仪器自带软件进行数据反演，得到样品中不同水分的弛豫时间（$T_2$）和峰面积。

1.3.10 微观结构观察

参考Cheng等[17]的方法并稍加修改，沿肌原

纤维方向将鸡肉样品切成1 cm×1 cm×1 cm的立方体，浸泡在电镜专用戊二醛溶液中固定1 d，使用0.1 mol/L磷酸盐缓冲液（pH 7.0）清洗3次，然后用体积分数30%、50%、70%、80%、90%乙醇溶液浸泡脱水10 min，体积分数100%乙醇浸泡脱水2次（各15 min），经冷冻干燥后溅射喷金，使用扫描电子显微镜观察鸡肉样品的微观结构。

### 1.4 数据处理

每个样品均重复测试3次，使用SPSS 20.0和Excel 2010处理数据并进行单因素方差分析（ANOVA），$P<0.05$表示差异显著。使用Origin 2024进行绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度波动对冷鲜鸡肉中TVB-N值的影响

TVB-N指肉类在贮藏过程中，肉中的蛋白质分解产生的氨和胺等碱性含氮物质[18]。GB 2707—2016《食品安全国家标准 鲜（冻）畜、禽产品》中规定，冷鲜鸡肉的TVB-N值不应超过15 mg/100 g。5组鸡肉样品中TVB-N值均随贮藏时间的延长显著增加，见图1。这可能是由于贮藏过程中微生物繁殖导致鸡肉蛋白质降解产生TVB-N。H10、B10、B4、H4这4组鸡肉中的TVB-N值分别在贮藏第2、4、6、6天超过15 mg/100 g，而H0组在整个贮藏期间均未超过限值。表明当贮藏温度存在10 ℃时，有利于鸡肉中微生物的繁殖，加速了蛋白质分解，从而导致TVB-N值快速增加，缩短了冷鲜鸡的货架期。尽管B4组和H4组的TVB-N值在同一天达到限值，但在贮藏后期（4~8 d），B4组鸡肉的TVB-N值高于H4组；贮藏8 d时，B4组鸡肉中TVB-N值比H4组高了2.10 mg/100 g。结果表明，温度波动显著加快了冷鲜鸡肉中TVB-N的累积，缩短了冷鲜鸡货架期，不利于鸡肉保鲜。

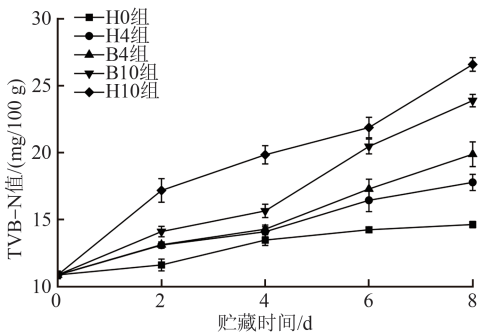



图1 不同贮藏温度下冷鲜鸡肉中TVB-N值的变化

Fig. 1 Changes in TVB-N values of chilled chicken stored under different temperatures

### 2.2 温度波动对冷鲜鸡肉风味的影响

采用电子鼻测定冷鲜鸡肉在不同温度下贮藏后的风味变化，并用PCA进行分析。其中，PC1和PC2分别表示能够将样品区分开的最主要的两个方差来源。PC1贡献率为81.829%，远大于PC2贡献率（15.635%），见图2。表明不同温度贮藏下冷鲜鸡肉间的差异主要集中在PC1上，总贡献率为97.464%，高于90%，说明PCA能够较好地反映出样品风味的实际情况，且两种主成分涵盖了5种贮藏温度下冷鲜鸡肉中挥发性风味物质的大部分信息。点之间的距离越远，表示风味变化越明显。不同贮藏温度和时间的鸡肉气味在空间排布上有明显差异。在第4天时，相较于位于第三象限的H0、H4、B4组样品，H10、B10组样品位于第一象限左侧，远离新鲜样品。说明无论贮藏温度是否恒定，温度过高都会显著影响样品的风味。肉类的挥发性气味主要来源于贮藏过程中蛋白质的降解、脂肪的氧化以及微生物分解产生的代谢物[19]。贮藏8 d时，H4、B4、B10、H10组样品均位于第一象限右侧，且各组之间能够明显被区分开，H0组也与新鲜样品相距较远，表明电子鼻可以有效区分不同贮藏温度和时间下鸡肉的风味。另外，贮藏期间温度波动会加速冷鲜鸡肉中微生物繁殖和脂肪氧化过程，进而加重冷鲜鸡肉风味劣变。

### 2.3 温度波动对冷鲜鸡肉汁液流失率和持水力的影响

在贮藏过程中，鸡肉中的汁液逐渐渗出，不仅导致鸡肉中营养成分的流失，还会影响其感官品质。随着贮藏时间的延长，5组鸡肉样品的汁液流失率均明显升高，见图3（a）。这种变化主要是由于贮藏期间鸡肉细胞内的生化反应和微生物生长，导致蛋白质分解和组织结构破坏，从而使水分从鸡肉中渗出流失。在整个贮藏期内，鸡肉样品的汁液流失率均表现为H10组>B10组>B4组>H4组>H0组，表明温度波动明显提高了鸡肉的汁液流失率。

持水力与鸡肉中蛋白质的分解密切相关。随着贮藏时间的延长，5组鸡肉样品的持水力均明显降低，见图3（b）。与新鲜鸡肉样品持水力初始值（89.01%）相比，H0、H4、B4、B10、

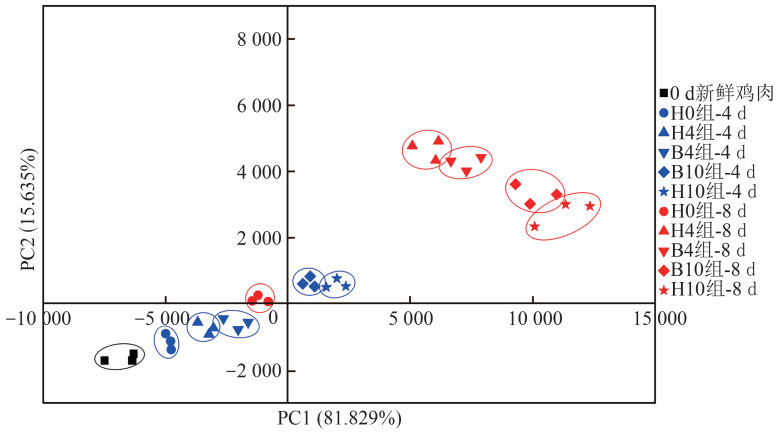



图 2　不同贮藏温度下冷鲜鸡肉的电子鼻主成分分析

Fig. 2　Principal component analysis of electronic nose data for chilled chicken stored under different temperatures

H10 组在整个贮藏期间分别下降了 9.90%、12.97%、15.76%、17.98%、19.36%。结果表明，冷藏过程中的温度波动加速了鸡肉持水力的下降。这与 Yu 等[10]的研究结果一致，他们指出温度波动（0~4 ℃）显著加速了鲑鱼持水力的下降。

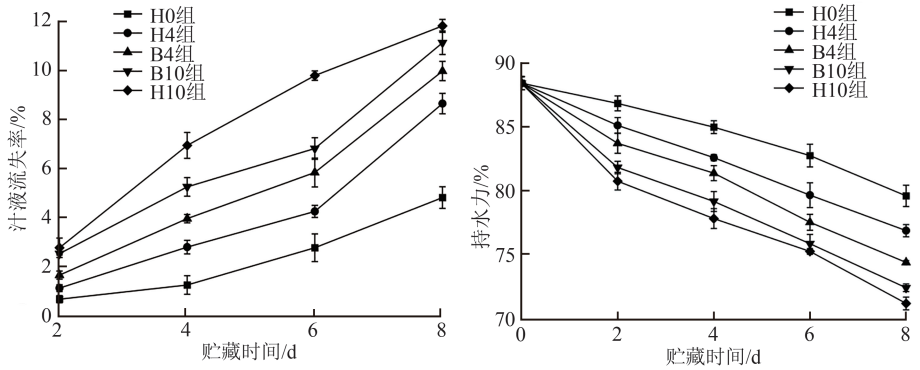



图 3　不同贮藏温度下冷鲜鸡肉汁液流失率和持水力的变化

Fig. 3　Changes in juice loss rate and water-holding capacity of chilled chicken stored under different temperatures

### 2.4　温度波动对冷鲜鸡质构的影响

肉的质构不仅影响其品质，还对消费者的选择产生重要影响。不同贮藏温度下鸡肉的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性变化趋势一致，均随贮藏时间的延长而显著降低（$P$<0.05），见表 2。表明随着鸡肉品质的劣变，其质构也逐渐变差。在贮藏过程中，肉的质构特性下降主要是由于内源酶的作用以及微生物活动导致肌原蛋白、骨架蛋白的降解所致[20]。在相同贮藏时间下，不同组鸡肉的质构指标存在显著差异（$P$<0.05）。随着贮藏时间的延长，B10 和 B4 组鸡肉的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性的下降幅度均显著大于恒温贮藏的 H0 组和 H4 组（$P$<0.05）。表明温度波动加速了鸡肉组织分解和内部结构破坏，从而不利于冷鲜鸡肉在贮藏过程中质构的保持。

### 2.5　温度波动对冷鲜鸡肉 TBARS 值的影响

TBARS 值是衡量肉类脂肪氧化的一个重要指标[21]。随着贮藏时间的延长，5 组鸡肉的 TBARS 值均呈现出逐渐升高的趋势（见图 4），表明在贮藏过程中鸡肉品质劣变伴随着脂肪氧化。另外，在相同贮藏时间下，5 组鸡肉的 TBARS 值存在明显差异。贮藏 8 d 时，H10、B10 组鸡肉样品 TBARS 值分别达到了 0.67、0.61 mg/kg，明显高于其他 3 组；B4 组的 TBARS 值比 H4 组高 19.54%。在整个贮藏期间，H0 组的 TBARS 值增长速率明显慢于其他组，表明 0 ℃低温能够明显抑制鸡肉中的脂质氧化；而 0~

表2　不同贮藏温度下冷鲜鸡肉的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性变化

Table 2　Changes in hardness, elasticity, cohesiveness, and chewiness of chilled chicken during storage at different temperatures

| 组别 | 贮藏时间/d | 硬度/g | 弹性 | 内聚性 | 咀嚼型 |
|---|---|---|---|---|---|
| H0 | 0 | 5 272.44±66.12$^{Aa}$ | 0.78±0.03$^{Aa}$ | 0.58±0.01$^{Aa}$ | 2 394.18±37.37$^{Aa}$ |
| | 2 | 5 011.54±89.47$^{Ba}$ | 0.70±0.01$^{Ba}$ | 0.55±0.01$^{Ba}$ | 1 904.67±45.12$^{Ba}$ |
| | 4 | 4 530.82±93.35$^{Ca}$ | 0.64±0.03$^{Ca}$ | 0.53±0.01$^{Ca}$ | 1 521.76±71.30$^{Ca}$ |
| | 6 | 4 228.81±127.25$^{Da}$ | 0.55±0.03$^{Da}$ | 0.51±0.01$^{Da}$ | 1 172.18±91.18$^{Da}$ |
| | 8 | 3 995.62±66.50$^{Ea}$ | 0.44±0.01$^{Ea}$ | 0.49±0.01$^{Da}$ | 857.60±26.88$^{Ea}$ |
| H4 | 0 | 5 272.44±66.12$^{Aa}$ | 0.78±0.03$^{Aa}$ | 0.58±0.01$^{Aa}$ | 2 394.18±37.37$^{Aa}$ |
| | 2 | 4 775.28±85.01$^{Bb}$ | 0.67±0.02$^{Bab}$ | 0.53±0.01$^{Bb}$ | 1 688.88±26.65$^{Bb}$ |
| | 4 | 4 259.96±54.55$^{Cb}$ | 0.56±0.02$^{Cb}$ | 0.48±0.01$^{Cb}$ | 1 142.14±46.66$^{Cb}$ |
| | 6 | 4 033.63±85.54$^{Db}$ | 0.50±0.02$^{Db}$ | 0.48±0.01$^{Cb}$ | 968.79±22.97$^{Db}$ |
| | 8 | 3 734.28±136.67$^{Eb}$ | 0.40±0.01$^{Eb}$ | 0.44±0.01$^{Db}$ | 663.76±46.87$^{Eb}$ |
| B4 | 0 | 5 272.44±66.12$^{Aa}$ | 0.78±0.03$^{Aa}$ | 0.58±0.01$^{Aa}$ | 2 394.18±37.37$^{Aa}$ |
| | 2 | 4 680.92±63.36$^{Bbc}$ | 0.65±0.02$^{Bb}$ | 0.52±0.01$^{Bb}$ | 1 579.44±59.41$^{Bc}$ |
| | 4 | 4 041.94±123.08$^{Cc}$ | 0.52±0.02$^{Cc}$ | 0.45±0.01$^{Cc}$ | 949.77±39.58$^{Cc}$ |
| | 6 | 3 749.44±70.63$^{Dc}$ | 0.47±0.01$^{Dc}$ | 0.43±0.01$^{Dc}$ | 750.99±16.20$^{Dc}$ |
| | 8 | 3 421.98±82.66$^{Ec}$ | 0.37±0.01$^{Ec}$ | 0.41±0.01$^{Dc}$ | 523.17±20.02$^{Ec}$ |
| B10 | 0 | 5 272.44±66.12$^{Aa}$ | 0.78±0.03$^{Aa}$ | 0.58±0.01$^{Aa}$ | 2 394.18±37.37$^{Aa}$ |
| | 2 | 4 586.40±84.80$^{Bc}$ | 0.55±0.01$^{Bc}$ | 0.48±0.01$^{Bc}$ | 1 211.95±51.06$^{Bd}$ |
| | 4 | 3 698.67±70.31$^{Cd}$ | 0.48±0.01$^{Cd}$ | 0.42±0.01$^{Cd}$ | 743.65±5.12$^{Cd}$ |
| | 6 | 3 255.32±113.12$^{Dd}$ | 0.39±0.02$^{Dd}$ | 0.39±0.01$^{Dd}$ | 501.58±22.27$^{Dd}$ |
| | 8 | 3 107.06±53.18$^{Ed}$ | 0.33±0.01$^{Ed}$ | 0.37±0.01$^{Ed}$ | 378.82±10.30$^{Ed}$ |
| H10 | 0 | 5 272.44±66.12$^{Aa}$ | 0.78±0.03$^{Aa}$ | 0.58±0.01$^{Aa}$ | 2 394.18±37.37$^{Aa}$ |
| | 2 | 4 407.08±43.11$^{Bd}$ | 0.52±0.01$^{Bc}$ | 0.47±0.01$^{Bc}$ | 1 072.12±13.12$^{Be}$ |
| | 4 | 3 351.71±90.66$^{Ce}$ | 0.44±0.02$^{Ce}$ | 0.42±0.01$^{Cd}$ | 609.20±23.21$^{Ce}$ |
| | 6 | 3 118.92±98.90$^{Dd}$ | 0.35±0.02$^{De}$ | 0.38±0.01$^{Dd}$ | 409.20±27.65$^{De}$ |
| | 8 | 2 842.90±113.70$^{Ee}$ | 0.31±0.01$^{Ee}$ | 0.35±0.01$^{Ed}$ | 304.52±2.49$^{Ee}$ |

注：不同小写字母表示不同组相同时间差异显著（$P$<0.05）；不同大写字母表示同一组同一指标差异显著（$P$<0.05）。

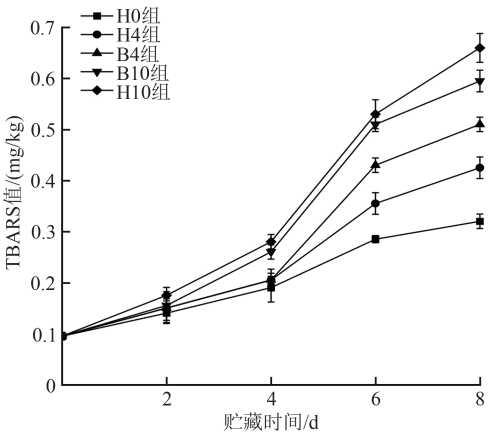



图4　不同贮藏温度下冷鲜鸡肉TBARS值变化

Fig. 4　Changes in TBARS values of chilled chicken at different storage temperatures

4 ℃和0~10 ℃温度波动均会加速鸡肉中的脂质氧化，从而加快鸡肉品质劣变。陈紫婷等[22]研究认为TBARS值低于0.66 mg/kg的肉为新鲜肉。然而，尽管只有H10组的鸡肉在第8天时超过了这一限值，但根据TVB-N值的结果来看，该组鸡肉在第2天就已经超过了TVB-N限值（15 mg/100 g），表明此时鸡肉已经腐败变质。这可能是由于鸡胸肉脂肪含量较少而蛋白质含量较多，因此更容易受到微生物活动影响而不是脂肪过氧化导致其腐败变质[23]。由此可见，在评估鸡肉新鲜度时不能仅依赖单一指标TBARS值，而应该结合TVB-N值、菌落总数等多个参数进行综合评估。

### 2.6　温度波动对冷鲜鸡肉微生物的影响

不同贮藏温度下冷鲜鸡肉样品的菌落总数变化见图5。5组冷鲜鸡肉的菌落总数均随贮藏时间的延长而明显增加。在贮藏后期观察到菌落总数增长速度有所减缓，这可能是由于随着微生物持续生长，鸡肉内的营养物质逐渐被消耗完，并且一些代谢产物开始积累，从而抑致了微生物的生长[24]。

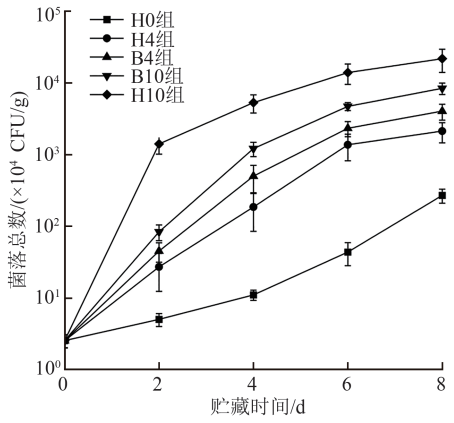



图 5　不同贮藏温度下冷鲜鸡肉菌落总数的变化

Fig. 5　Changes in total viable count of chilled chicken stored under different temperatures

鸡肉样品的初始菌落总数为 $2.53\times10^4$ CFU/g，表明试验所用冷鲜鸡肉样品较新鲜。H10、B10、B4、H4组的菌落总数分别在第2、4、6、6天超过了国际食品微生物标准委员会（ICMSF）规定的微生物限值（$1\times10^7$ CFU/g）；而H0组的菌落总数在整个贮藏期始终未超过该限值，与TVB-N值的结果一致。另外，在整个贮藏期，各组菌落总数均表现为H0组<H4组<B4组<B10组<H10组。这与俞滢洁[25]关于贮藏温度波动（0~4 ℃）对三文鱼微生物生长影响的研究结果一致。表明0 ℃低温可以显著抑制微生物的生长，而温度波动则会促进冷鲜鸡肉中微生物生长，加速其品质劣变，并缩短货架期。

李忠辉等[26]研究表明，冷鲜鸡在贮藏过程中的主要腐败菌为假单胞菌、热死环丝菌、乳酸菌和肠杆菌。作者进一步分析了不同贮藏温度下冷鲜鸡肉中假单胞菌、热杀索丝菌、肠杆菌和乳酸菌的变化，结果见图6。新鲜鸡肉中的假单胞菌菌落数最高，为 $8.97\times10^3$ CFU/g；其次是热杀索丝菌和乳酸菌，分别为 $1.50\times10^4$ CFU/g 和 $1.10\times10^3$ CFU/g；

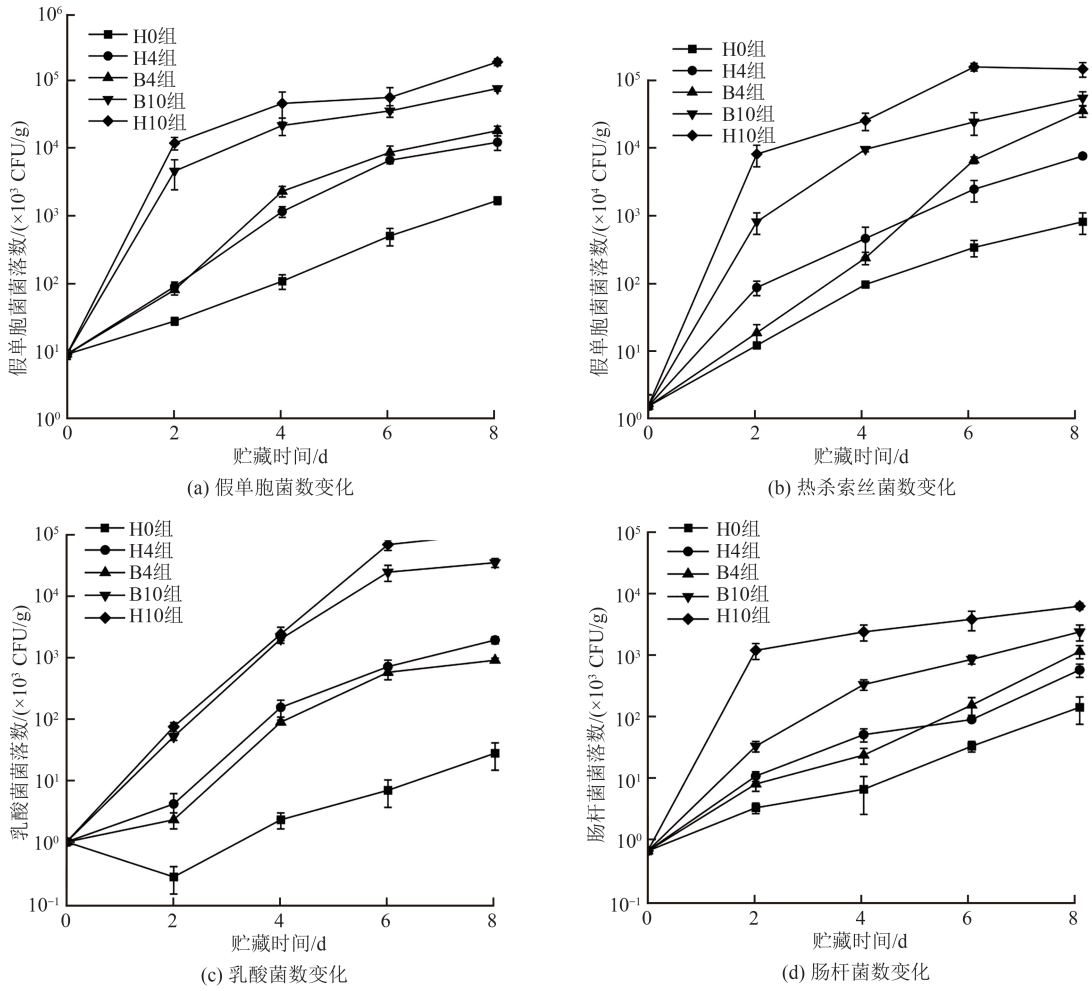


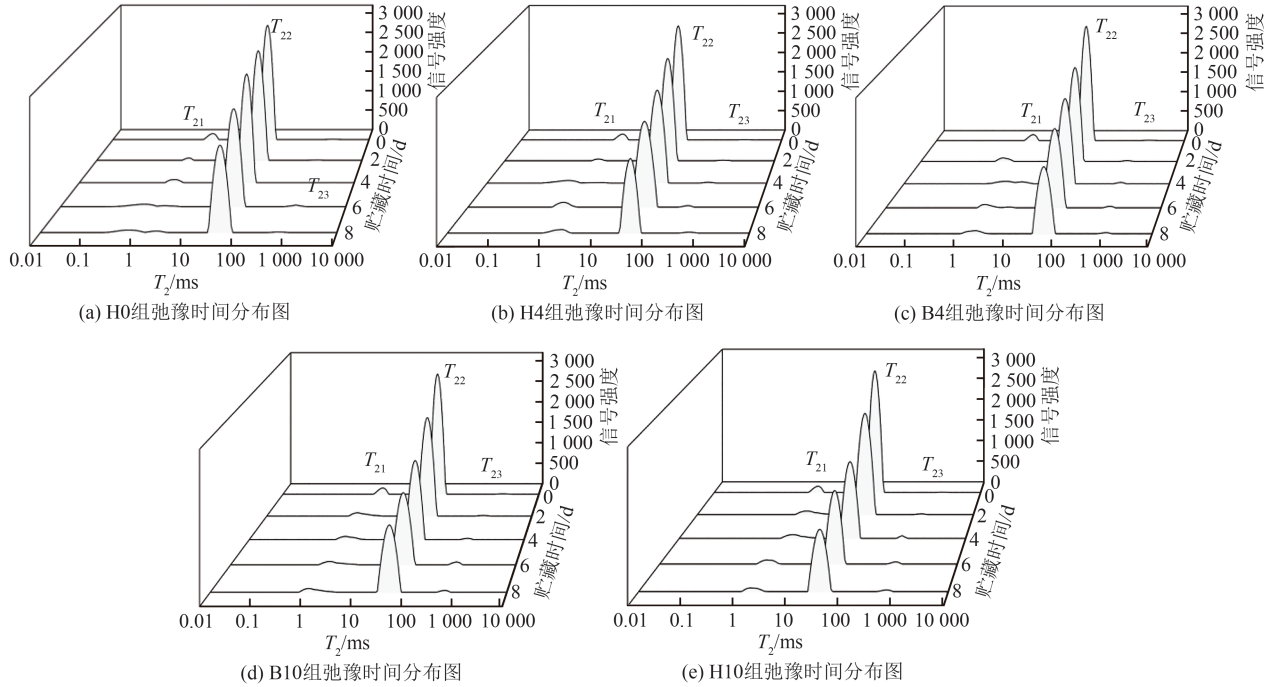

图 6　不同贮藏温度下冷鲜鸡肉4种优势腐败菌的变化

Fig. 6　Changes in four dominant spoilage bacteria in chilled chicken at different storage temperatures

肠杆菌菌落数最低，为699.05 CFU/g。这4种优势腐败菌变化趋势与菌落总数一致，随着贮藏时间的延长而逐渐增加，并且均表现出温度依赖性；其中H10组鸡肉中4种菌的增长速度最快，而H0组最慢。B4组的乳酸菌菌落数在贮藏过程中始终低于H4组。这可能是由于乳酸菌是一种嗜热菌，而B4组存在0 ℃低温，对其增长有抑制作用。B4组的热杀索丝菌菌落数在前期也低于H4；但在贮藏后期（第4~8天），0~4 ℃的温度波动促进了热杀索丝菌的繁殖；到第8天时，B4组中的热杀索丝菌菌落数已经是H4组的4.66倍。另外，肠杆菌菌落数变化也呈现出类似的趋势。综上所述，低温条件下的温度波动对乳酸菌增长有抑制作用，但会促进假单胞菌的繁殖，且随着贮藏时间的延长，还会促进热杀索丝菌和肠杆菌的增长；高温条件下的温度波动促进了这4种腐败菌的增长，不利于鸡肉品质的保持。

### 2.7　温度波动对冷鲜鸡肉水分分布及状态的影响

通过低场核磁共振技术检测并分析样品的弛豫时间来探索鸡肉内部水分分布和状态的变化。所有鸡肉样品的水分弛豫时间（$T_2$）反演图谱均显示出3个峰，见图7。从左至右分别代表3种不同状态的水，分别为$T_{21}$（0.1~10 ms）、$T_{22}$（10~100 ms）、$T_{23}$（100~1 000 ms）。其中$T_{21}$代表与大分子紧密结合的结合水，$T_{22}$代表位于肌原纤维网络中的固定水，$T_{23}$代表肌原纤维外容易流失的自由水[27]。




(a) H0组弛豫时间分布图　(b) H4组弛豫时间分布图　(c) B4组弛豫时间分布图

(d) B10组弛豫时间分布图　(e) H10组弛豫时间分布图

图7　不同贮藏温度下冷鲜鸡肉弛豫时间（$T_2$）分布图

Fig. 7　Distribution diagram of relaxation time ($T_2$) of chilled chicken during storage at different temperatures

随着贮藏时间的延长，5组样品均表现为$T_{22}$信号强度逐渐下降，而$T_{23}$的信号强度逐渐升高，且H10、B10组$T_{22}$下降幅度明显大于其他3组。表明随着贮藏时间的延长，鸡肉样品中的固定水质量分数逐渐减少，自由水质量分数逐渐增加，水分发生了迁移，且温度波动加速了水分迁移。这一结果与汁液流失率的结果一致，即由于自由水质量分数增加，更容易流失，从而导致各组汁液流失率增加。

不同贮藏温度下冷鲜鸡肉中3种水的峰面积比例变化见表3。在整个贮藏过程中，结合水的峰面积比例变化较小，这是由于结合水与蛋白质分子紧密结合，不受温度变化和机械应力的影响。在贮藏前期，5组鸡肉样品中固定水的峰面积比例均逐渐下降，而自由水的峰面积比例逐渐增加，且不同组间存在显著差异（$P$<0.05）。在贮藏末期，固定水和自由水的峰面积比例有所增加，这可能是由于水分流失导致3种水的峰面积比例发生重排。在贮藏过程中，B10组和B4组固定水的峰面

表 3　不同贮藏温度下冷鲜鸡肉各峰面积比例变化

Table 3　Changes in the proportion of relaxation area of chilled chicken stored under different temperatures

| 状态 | 分组 | 峰面积比例/% | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 d | 2 d | 4 d | 6 d | 8 d |
| 结合水 | H0组 | $5.15\pm0.05^{Ab}$ | $5.21\pm0.13^{Cab}$ | $5.31\pm0.10^{Bab}$ | $5.38\pm0.04^{Da}$ | $5.39\pm0.02^{Ba}$ |
| | H4组 | $5.15\pm0.05^{Ac}$ | $5.31\pm0.10^{BCb}$ | $5.45\pm0.03^{Bb}$ | $5.85\pm0.06^{Ba}$ | $5.31\pm0.06^{Bb}$ |
| | B4组 | $5.15\pm0.05^{Ad}$ | $5.41\pm0.06^{ABCc}$ | $5.84\pm0.13^{Ab}$ | $6.20\pm0.04^{Aa}$ | $5.94\pm0.09^{Ab}$ |
| | B10组 | $5.15\pm0.05^{Ad}$ | $5.57\pm0.09^{Ab}$ | $5.88\pm0.01^{Aa}$ | $5.93\pm0.05^{Ba}$ | $5.32\pm0.08^{Bc}$ |
| | H10组 | $5.15\pm0.05^{Ac}$ | $5.53\pm0.05^{ABb}$ | $5.87\pm0.04^{Aa}$ | $5.60\pm0.09^{Cb}$ | $5.26\pm0.05^{Bc}$ |
| 固定水 | H0组 | $94.74\pm0.04^{Aa}$ | $94.61\pm0.12^{Aab}$ | $94.48\pm0.08^{Abc}$ | $94.32\pm0.01^{Acd}$ | $94.22\pm0.04^{Ad}$ |
| | H4组 | $94.74\pm0.04^{Aa}$ | $94.46\pm0.08^{ABb}$ | $94.25\pm0.05^{Bc}$ | $93.76\pm0.08^{Bd}$ | $93.84\pm0.07^{Bd}$ |
| | B4组 | $94.74\pm0.04^{Aa}$ | $94.34\pm0.07^{Bb}$ | $93.83\pm0.15^{Cc}$ | $93.29\pm0.07^{Cd}$ | $93.15\pm0.06^{Cd}$ |
| | B10组 | $94.74\pm0.04^{Aa}$ | $94.09\pm0.07^{Cb}$ | $93.58\pm0.04^{Dc}$ | $93.03\pm0.15^{Dd}$ | $93.26\pm0.03^{Cd}$ |
| | H10组 | $94.74\pm0.04^{Aa}$ | $93.91\pm0.02^{Cb}$ | $93.26\pm0.07^{Ed}$ | $93.41\pm0.02^{Cc}$ | $93.19\pm0.01^{Cd}$ |
| 自由水 | H0组 | $0.11\pm0.01^{Ad}$ | $0.19\pm0.02^{Cc}$ | $0.21\pm0.02^{Db}$ | $0.30\pm0.03^{Cb}$ | $0.39\pm0.03^{Da}$ |
| | H4组 | $0.11\pm0.01^{Ae}$ | $0.24\pm0.02^{Cd}$ | $0.29\pm0.02^{Cc}$ | $0.39\pm0.02^{BCb}$ | $0.85\pm0.02^{Ca}$ |
| | B4组 | $0.11\pm0.01^{Aae}$ | $0.25\pm0.00^{Cd}$ | $0.33\pm0.01^{Cc}$ | $0.51\pm0.03^{Bb}$ | $0.92\pm0.03^{Ca}$ |
| | B10组 | $0.11\pm0.01^{Aae}$ | $0.34\pm0.02^{Bd}$ | $0.54\pm0.04^{Bc}$ | $1.04\pm0.10^{Ab}$ | $1.46\pm0.05^{Ba}$ |
| | H10组 | $0.11\pm0.01^{Aad}$ | $0.56\pm0.03^{Ac}$ | $0.86\pm0.03^{Ac}$ | $0.99\pm0.11^{Ab}$ | $1.55\pm0.03^{Aa}$ |

注：不同小写字母表示同一行差异显著（$P<0.05$），不同大写字母表示相同指标同一列差异显著（$P<0.05$）。

积比例下降幅度明显快于H0组和H4组，进一步证实了贮藏过程中的温度波动会加速鸡肉中固定水向自由水的迁移。这种水分迁移现象与鸡肉肌原纤维结构的变化密切相关，由于贮藏过程中微生物的繁殖会导致鸡肉肌原纤维蛋白和骨架蛋白降解，从而导致肌原纤维结构破坏，使得原本束缚在肌原纤维网络中的固定水释放出来，转变为更容易流失的自由水，从而降低了鸡肉的持水性，对其品质产生不利影响。

## 2.8　温度波动对冷鲜鸡肉微观结构的影响

在评估肉的质量时，其微观结构对于肉的保水能力和结构具有至关重要的影响[28]。不同温度贮藏过程中肌原纤维的扫描电镜结果见图8。新鲜鸡肉样品的肌原纤维排列紧密且整齐，肌束保持完整。H0组鸡肉样品的肌原纤维结构在整个贮藏期间均保存完好，无明显变化。而随着贮藏时间的延长，其他4组样品的微观结构均发生明显变化，表现为肌束间空隙逐渐增加，肌原纤维的完整性逐渐

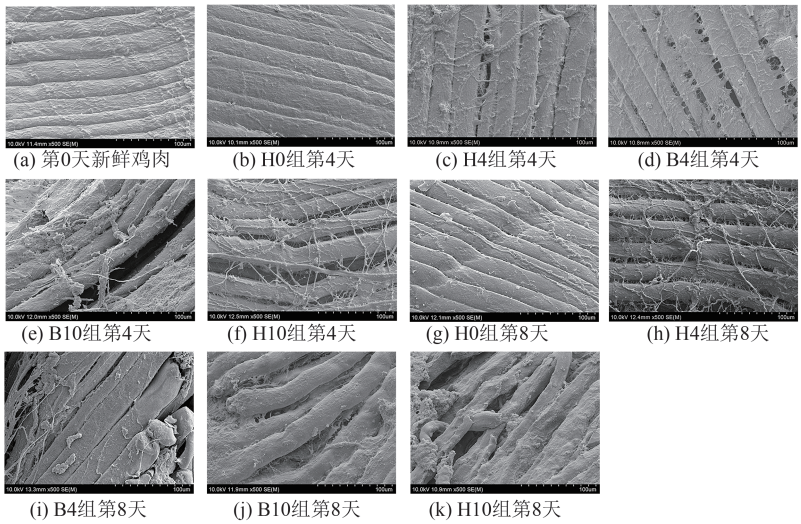



图 8　不同贮藏温度下冷鲜鸡肉的扫描电子显微镜图

Fig. 8　Scanning electron microscopy images of chilled chicken during storage at different temperatures

被破坏。表明0 ℃条件能够明显保护鸡肉组织结构不受损害。这一结果也解释了贮藏期间鸡肉水分的迁移现象，即疏松和破损的肌原纤维结构会导致水分更容易迁移，从而降低了肌肉的持水力，最终导致汁液流失和品质劣变。李学鹏等[29]研究也表明，与4 ℃冷藏相比，0 ℃冷藏可以更有效地抑制虾肉中肌原纤维降解和组织结构破坏。

在第4天时，H10、B10、B4组鸡肉中的肌原纤维间隙相较于其他2组明显变宽，这一差异在贮藏8 d时更加明显，此时H10、B10、B4组的肌纤维束结构完整性受损，发生断裂现象。H4组鸡肉贮藏过程中肌原纤维间隙变宽，但并未出现明显的断裂现象。表明即使在0~4 ℃冷藏环境中，温度波动仍会加速鸡肉组织结构的破坏，不利于维持鸡肉的保水性。

## 3 结论

将冷鲜鸡肉在不同温度条件下贮藏，分析贮藏过程中鸡肉的品质变化。结果表明，与4 ℃恒温贮藏相比，0~4 ℃温度波动会促进冷鲜鸡肉中微生物繁殖，尤其是假单胞菌、热杀索丝菌和肠杆菌；并显著促进了TVB-N值和TBARS值的增加，加速了鸡肉蛋白质分解和脂肪氧化，对鸡肉风味造成了明显的负面影响；0~4 ℃温度波动贮藏比4 ℃恒温贮藏鸡肉的组织结构破坏更明显，加快了鸡肉中固定水向自由水的迁移，降低了鸡肉的保水性，不利于质构的保持。另外，冷藏温度对鸡肉品质有重要影响，温度越高，鸡肉劣变速度越快。冷藏鸡肉品质劣变由快到慢的贮藏温度依次为：恒温10 ℃>0~10 ℃波动>0~4 ℃波动>恒温4 ℃>恒温0 ℃。因此，对于冷鲜鸡肉而言，在恒温0 ℃下进行贮藏的保鲜效果最好；同时，贮藏过程中应避免温度波动，即使是在低温0~4 ℃发生温度波动也会加速鸡肉品质劣变，不利于鸡肉长期保鲜。

## 参考文献


[1] 麦栩滔，王文卓，郑宇航，等. 不同包装方式对冷鲜鸡肉微生物菌群多样性的影响[J]. 食品工业科技，2023，44(13)：367-374.
MAI X T，WANG W Z，ZHENG Y H，et al. Effects of different packaging methods on the microbial diversity in chilled chicken[J]. Science and Technology of Food Industry，2023，44(13)：367-374.(in Chinese)

[2] 高磊，谢晶. 生鲜鸡肉保鲜技术研究进展[J]. 食品与机械，2014，30(5)：310-315.
GAO L，XIE J. Progress on preservation technologies for fresh chicken[J]. Food & Machinery，2014，30(5)：310-315.(in Chinese)

[3] 丁紫璇，王静文，胡海静，等. 基于脉冲光的冰鲜鸡保鲜技术研究[J]. 南京农业大学学报，2023，46(3)：587-594.
DING Z X，WANG J W，HU H J，et al. Research on chilled chicken wing preservation technology based on pulsed light[J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2023，46(3)：587-594.(in Chinese)

[4] 王倩，唐敏敏，孙芝兰，等. 冰鲜鸡预冷过程中微生物菌群多样性动态分析[J]. 食品工业科技，2021，42(23)：110-117.
WANG Q，TANG M M，SUN Z L，et al. Dynamic anlysis of microbial community diversity in chilled chicken during pre-cooling[J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42(23)：110-117.(in Chinese)

[5] GRUNERT T，STEPHAN R，EHLING-SCHULZ M，et al. Fourier Transform Infrared Spectroscopy enables rapid differentiation of fresh and frozen/thawed chicken[J]. Food Control，2016，60：361-364.

[6] MCCONNELL J A，SCHAFFNER D W. Validation of mathematical models for *Salmonella* growth in raw ground beef under dynamic temperature conditions representing loss of refrigeration[J]. Journal of Food Protection，2014，77(7)：1110-1115.

[7] 唐梦君，周倩，张小燕，等. 冷鲜鸡在微冻贮藏过程中的菌群结构变化[J]. 现代食品科技，2023，39(9)：81-87.
TANG M J，ZHOU Q，ZHANG X Y，et al. Changes in microbial community structure of chilled chicken during A partially frozen storage[J]. Modern Food Science and Technology，2023，39(9)：81-87.(in Chinese)

[8] VAIKOUSI H，BILIADERIS C G，KOUTSOUMANIS K P. Applicability of a microbial Time Temperature Indicator (TTI) for monitoring spoilage of modified atmosphere packed minced meat[J]. International Journal of Food Microbiology，2009，133(3)：272-278.

[9] MAI X T，WANG W Z，ZHANG X X，et al. Mathematical modeling of the effects of temperature and modified atmosphere packaging on the growth kinetics of *Pseudomonas lundensis* and *Shewanella putrefaciens* in chilled chicken[J]. Foods，2022，11(18)：2824.

[10] YU Y J，YANG S P，LIN T，et al. Effect of cold chain logistic interruptions on lipid oxidation and volatile organic compounds of salmon (*Salmo salar*) and their correlations with water dynamics[J]. Frontiers in Nutrition，2020，7：155.

[11] 黄文博，谢晶，罗超，等. 冷链物流中温度波动对美国红鱼

品质变化的影响[J]. 食品科学,2016,37(18):268-274.
HUANG W B, XIE J, LUO C, et al. Effect of temperature fluctuation on quality changes of red drum (*Sciaenops ocellatus*) in cold chain logistics[J]. Food Science,2016,37(18):268-274.(in Chinese)

[12] WANG X Y, XIE J. Water dynamics and microbial communities of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) during simulated cold chain logistics[J]. Journal of Food Safety,2020,40(2):e12766.

[13] 何向丽,卢东岚. 空气解冻温度对猪里脊肉品质的影响[J]. 肉类研究,2020 ,34(02):92-98.
HE X L,LU D L. Effect of air-thawing temperature on quality of pork tenderloin meat[J]. Meat Research, 2020,34(02):92-98.(in Chinese)

[14] LIU F, YANG N, ZHANG L T, et al. Effect of weak magnetic field on the water-holding properties, texture, and volatile compounds of pork and beef during frozen storage[J]. Food Bioscience,2023,53:102667.

[15] 赵天娇. 不同冷链模式对冷鲜鸡品质影响及消费者喜好度与冷鲜鸡品质的相关性研究[D]. 南京:南京农业大学,2020.

[16] LUZARDO S, SAADOUN A, CABRERA M C, et al. Effect of beef long-storage under different temperatures and vacuum-packaging conditions on meat quality, oxidation processes and microbial growth[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2024,104(2):1143-1153.

[17] CHENG S S, WANG X H, YANG H M, et al. Characterization of moisture migration of beef during refrigeration storage by low-field NMR and its relationship to beef quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2020,100(5):1940-1948.

[18] NANDI S, GUHA P. Development, characterization and application of starch-based film containing polyphenols of *Piper betle* L. waste in chicken meat storage[J]. Food Chemistry,2024,431:137103.

[19] LING Y Z, ZHOU M Z, QIAO Y, et al. Effects of ozone water combined with ultra-high pressure on quality and microorganism of catfish fillets (*Lctalurus punctatus*) during refrigeration[J]. Frontiers in Nutrition,2022,9:880370.

[20] 李媛,张晓洁,马良,等. 兔皮明胶/迷迭香酸复合膜在猪肉冷藏保鲜中的应用效果[J]. 食品科学,2019,40(19):281-287.
LI Y, ZHANG X J, MA L, et al. Application of rabbit skin gelatin/rosmarinic acid composite film in pork quality preservation during cold storage[J]. Food Science,2019, 40(19):281-287.(in Chinese)

[21] SUJIWO J, KIM D, JANG A. Relation among quality traits of chicken breast meat during cold storage: correlations between freshness traits and torrymeter values[J]. Poultry Science,2018,97(8):2887-2894.

[22] 陈紫婷,孙智达. 光氧化与氧气对牛肉保鲜过程中品质以及蛋白理化性质的影响[J]. 肉类研究,2023,37(10):30-36.
CHEN Z T, SUN Z D. Effects of photooxidation and oxygen on beef quality and physicochemical properties of protein during storage[J]. Meat Research,2023,37(10): 30-36.(in Chinese)

[23] CHANDRA MOHAN C, RADHA KRISHNAN K, BABUSKIN S, et al. Active compound diffusivity of particle size reduced *S. aromaticum* and *C. cassia* fused starch edible films and the shelf life of mutton (*Capra aegagrus hircus*) meat[J]. Meat Science,2017,128:47-59.

[24] CHEN Q S, HU W W, SU J, et al. Nondestructively sensing of total viable count (TVC) in chicken using an artificial olfaction system based colorimetric sensor array[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 168: 259-266.

[25] 俞滢洁. 三文鱼在冷链物流过程中微生物、脂质氧化及水分迁移变化规律研究[D]. 上海:上海海洋大学,2021.

[26] 李忠辉,姚开,贾冬英,等. 冷鲜鸡胸肉主要腐败菌的分离及低温贮藏对货架期的影响[J]. 食品与发酵工业,2011,37(1):167-170.
LI Z H,YAO K,JIA D Y,et al. Isolation of predominant spoilage bacteria in chilled chicken breast and evaluation of the shelf life at low storage temperatures[J]. Food and Fermentation Industries,2011,37(1):167-170.(in Chinese)

[27] SUN R X, XU W C, XIONG L M, et al. The combined effects of ultrasound and plasma-activated water on microbial inactivation and quality attributes of crayfish during refrigerated storage[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023,98:106517.

[28] LAGHI L, VENTURI L, DELLAROSA N, et al. Water diffusion to assess meat microstructure[J]. Food Chemistry,2017,236:15-20.

[29] 李学鹏,陈杨,王金厢,等. 中国对虾冷藏过程中肌肉组织结构与蛋白质生化性质的变化[J]. 中国食品学报,2014,14(5):72-79.
LI X P,CHEN Y,WANG J X,et al. Changes in muscle structure and biochemical characteristics of muscle proteins in Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) during refrigerated storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2014,14(5): 72-79.(in Chinese)

(责任编辑:刘冬梅)