

## 电场辅助冰温和超冰温贮藏对生鲜牛肉品质的影响

徐毓谦, 谢菲菲, 张德权, 李欣, 王素, 方菲, 刘珊珊, 侯成立\*

(中国农业科学院农产品加工研究所 农业农村部农产品质量安全收贮运管控重点实验室 北京 100193)

**摘要** 为研究电场辅助冰温和超冰温贮藏对生鲜牛肉品质的影响,以牛米龙肉为试验材料,分析电场(设备输出电压 3 300~4 000 V,电流 0.04 A)辅助冰温(-1 ℃)、超冰温(-3 ℃)和非电场(对照组)条件下贮藏 0,7,14,21,28,35 d 牛肉 pH 值、色泽、菌落总数、挥发性盐基氮(TVB-N)含量、硫代巴比妥酸(TBARS)含量、蒸煮损失、质构、 $T_2$  弛豫时间及挥发性气味的变化。结果表明,在贮藏 35 d 时,-1 ℃+电场组的 pH 值为 5.84、TBARS 值为 0.55 mg MDA/kg、蒸煮损失为 31.84%,显著低于-1 ℃组的 5.97、0.60 mg MDA/kg 和 36.19%( $P<0.05$ );-1 ℃+电场组  $a^*$  值为 10.22,显著高于-3 ℃组(7.83)和-3 ℃+电场组(9.63)。贮藏 21 d 时,-1 ℃+电场和-3 ℃+电场组的菌落总数分别为 4.87 lg(CFU/g)和 5.04 lg(CFU/g),TVB-N 含量为 10.03 mg/100 和 10.15 mg/100 g,显著低于各自的对照组[5.36 lg(CFU/g)和 5.43 lg(CFU/g),10.85 mg/100 g 和 10.50 mg/100 g];同样的,在贮藏第 28 天,-1 ℃+电场组  $P_{21}$ (86.93)和-3 ℃+电场组  $P_{21}$ (89.69)显著高于各自对照组(84.94 和 86.87, $P<0.05$ )。-3 ℃+电场组硬度在贮藏到 35 d 时为 84.95 kg,显著高于-3 ℃组(77.71 kg, $P<0.05$ )。在同一贮藏时间点,冰温组与超冰温组牛肉间各品质指标差异不显著( $P>0.05$ ),电场处理组牛肉色泽、弹性、凝聚性、咀嚼性及恢复性与对照组相比均无显著差异( $P>0.05$ )。结论:电场辅助冰温、超冰温贮藏可有效改善牛肉的品质和新鲜度,延缓品质劣变。

**关键词** 电场;冰温;超冰温;牛肉;品质

**文章编号** 1009-7848(2024)05-0321-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.05.027

我国是肉类生产与消费大国,肉类总产量和总消费量位居世界第一<sup>[1]</sup>。其中,牛肉是我国主要的肉类食品,是人类日常膳食中的重要组成部分,因营养物质丰富,具有高蛋白、低脂肪的特点而深受消费者的喜爱<sup>[2]</sup>。冰温保鲜是将生鲜农产品置于 0 ℃以下,冰点以上的温度范围内的贮藏技术<sup>[3]</sup>。超冰温保鲜是指将生鲜农产品贮藏在冰点以下,过冷点以上的温度范围内的贮藏技术<sup>[4]</sup>。冰温、超冰温贮藏保鲜技术在保持细胞的完整性,降低呼吸速率,抑制酶活性及抑制微生物生长方面效果显著<sup>[5]</sup>,可用于生鲜农产品保鲜<sup>[6]</sup>。然而,冰温、超冰温贮藏条件较难控制,温度范围较狭窄,限制了大规模的产业应用<sup>[7]</sup>。

近年来,随着肉品低温贮藏技术的更新迭代,效率高耗能小的电场技术受到广泛关注<sup>[8]</sup>,不同学者针对电场保鲜开展了相关研究<sup>[9]</sup>。Qi 等<sup>[10]</sup>研究发现高压静电场对三文鱼、猪肉和香肠中金黄色葡

萄球菌有强抑制作用。Xie 等<sup>[11]</sup>利用低压电场辅助冷冻成品牛排,结果发现低压静电场可以减少冷冻过程中牛排的微观结构损伤和蛋白质结构变化。Rahbari 等<sup>[12]</sup>利用高压静电场解冻冷冻鸡胸肉,与常规静态空气解冻相比,高压静电场显著减少了解冻时间和汁液损失,且蛋白质变性最小。Qian 等<sup>[13]</sup>研究了低压电场解冻对牛肉肌纤维蛋白理化性质变化及品质的影响,结果表明低压电场能有效降低牛肉品质损失,加快牛肉解冻过程中蛋白质的复性,显著缩短解冻时间。岑剑伟等<sup>[14]</sup>研究发现在高压静电场结合冰温气调组合条件下贮藏的罗非鱼片,可有效抑制微生物活动,将挥发性盐基氮与  $K$  值维持在较低水平,且鱼肉硬度减弱更加缓慢,保持了新鲜鱼片的品质,货架期也得到有效延长。综上,电场技术可改善肉品品质,减少肉品在冻结及解冻过程中的损失。然而,目前关于电场技术研究主要集中在冷冻与解冻方面,在冰温、超冰温方面研究较少。

本研究以生鲜牛肉为试验材料,探究电场辅助冰温、超冰温贮藏过程牛肉品质的变化,为电场在冰温、超冰温保鲜上的应用提供数据支持。

**收稿日期:** 2023-05-19

**基金项目:** 国家农业科技创新工程院所重点任务(CAAS-ASTIP-G2022-IFST-02)

**第一作者:** 徐毓谦,女,博士生

**通信作者:** 侯成立 E-mail: houchengli@163.com

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

选取北京穆香源清真肉类有限公司提供的22~24月龄、胴体质量约为400 kg的6头西门塔尔公牛为试验材料。经屠宰热剔骨后取下左侧米龙肉吊挂在冷却间(0~4℃)中冷却24 h。去除可见脂肪和筋膜组织,分装入无菌袋后置于布满冰袋的保温箱(0~4℃)中,2 h内运回实验室。

pH校准液(pH=7,pH=4),赛默飞世尔科技(中国)有限公司;硫代巴比妥酸,上海源叶生物科技有限公司;三氯乙酸,上海麦克林生化科技有限公司;平板计数琼脂,北京陆桥技术股份有限公司;氯仿,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;丁基羟基茴香醚、盐酸、氢氧化钠,国药集团化学试剂北京有限公司;轻质氧化镁,北京普益华科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

Testo 205 便携式 pH 计,德国德图公司;CM-700D 型便携式色差计,日本柯尼卡美能达公司;HH-4S 数显恒温水浴锅,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司;TA-XT plus<sup>®</sup>质构分析仪,英国 Stable Micro System 公司;ML204 电子天平,梅特勒-托力多仪器(上海)有限公司;PEN 3.5 电子鼻,德国 Airsense 公司;DENBA-2.0 鲜度保持电场装置(由电场发生装置 220 V,50 Hz 和放电板 140 mm×120 mm 组成,输出电压为 3 300~4 000 V、电流为 0.04 A),日本 AGUA 商事株式会社;MIR-154-PC 低温恒温培养箱,松下健康医疗器械株式会社;GQZ60-02XG 相温型保鲜箱,天津捷盛东辉保鲜科技有限公司;SW-CJ-2FD 垂直单向流洁净工作台,苏州安泰空气技术有限公司;DHP-600 电热恒温培养箱,天津市中环试验电炉有限公司;NMI20-040H-I 核磁共振成像分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;KJELTEC8100 全自动凯氏定氮仪,丹麦 FOSS 集团有限公司;SpectraMax190 全波长酶标仪,美国 Molecular Devices 公司。

### 1.3 方法

1.3.1 样品准备 剔除6头牛米龙肉上的可见脂肪、筋膜和结缔组织,将其分割为10 cm×5 cm×3 cm长方体肉块,每块约200 g,采用保鲜膜托盘包装后【PE, O<sub>2</sub> 透过率为(10 600±20)% cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·24

h·atm)],分至4个处理组进行贮藏:电场辅助冰温(-1℃)、普通冰温(-1℃)、电场辅助超冰温(-3℃)、普通超冰温贮藏(-3℃)。分别在第0,7,14,21,28,35 d取样,进行pH值、色泽、蒸煮损失、质构、菌落总数、T<sub>2</sub> 弛豫时间测定,并将剩余样品置于液氮中冻存,用于挥发性盐基氮、硫代巴比妥酸及挥发性气味的电子鼻测定。

本试验所采用的 DENBA-2.0 鲜度保持电场装置由电场发生装置和放电板组成,放电板在冰温和超冰温恒温箱内产生交变电场,放电板水平放置,肉样与放电板间隔 20 cm 平行放置。

#### 1.3.2 指标测定

1.3.2.1 pH 值 采用便携式 pH 计进行测定。用 pH 值标准缓冲液(pH=7,pH=4)校准后,直接插入牛肉中约 1.5 cm 深,测量其 pH 值,每个样品测定 3~4 次,结果取平均值。

1.3.2.2 色泽 校准好色差计后,在表面随机选择 4 个位点直接测定并记录其亮度值(L\*)、红度值(a\*)、黄度值(b\*),结果取平均值。

1.3.2.3 菌落总数 根据《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》(GB 4789.2-2016)<sup>[15]</sup>进行菌落总数计数。称取(10±0.5)g 牛肉置于 90 mL 生理盐水的无菌袋内,用拍击式均质器拍打 1~2 min,制成 1:10 的样品匀液,并制备一系列 10 倍稀释液。选取 2 个适宜稀释度的样品溶液 1 mL,每个稀释度做 2 个平皿,加入 15~20 mL 平板计数琼脂培养基,待凝固后,于(36±1)℃培养(48±2)h。

1.3.2.4 挥发性盐基氮 根据《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》(GB 5009.228-2016)<sup>[16]</sup>中的半微量定氮法进行测定。

1.3.2.5 硫代巴比妥酸 参考 Liang 等<sup>[17]</sup>的方法,取 2 g 绞碎的牛肉放入 50 mL 离心管中,加入 3 mL 1%的硫代巴比妥酸溶液以及 17 mL 2.5%的三氯乙酸和盐酸的混合液和 1 mL 丁基羟基茴香醚,将混合物在沸水中加热 30 min,然后流水冷却至室温取上清液 3 mL 与等量氯仿混合,在 3 000×g 离心 10 min,最后在波长 532 nm 处测定上清液的吸光度,结果以 mg MAD/kg 形式表示,计算方法见式(1)。

$$\text{TBARS}(\text{mg MAD/kg}) = \frac{A_{532\text{nm}}}{m} \times 9.48 \quad (1)$$

式中,  $A_{532\text{nm}}$ ——样液在波长 532 nm 处测定的吸光度;  $m$ ——称取样品的质量; 9.48——硫代巴比妥酸反应产物的稀释因子与摩尔消光系数【152 000 L/(mol·cm)】得出的常数。

1.3.2.6 蒸煮损失和质构 参考 Yan 等<sup>[18]</sup>的方法, 称取(60 ± 0.5)g 牛肉块, 质量记为  $m_1$ , 放于蒸煮袋内排出袋内空气, 使肉块表面与蒸煮袋紧贴, 密封袋口并置于 71 °C 的水浴中浸泡 35 min 后, 将装有牛肉的袋子取出并用冷流水冷却 30 min, 将牛肉取出经滤纸擦去表面水分后的质量记为  $m_2$ , 计算方法见式(2)。

$$\text{蒸煮损失}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

将牛肉放入 4 °C 冰箱过夜, 沿肌纤维方向切成约 1 cm × 1 cm × 1 cm 的小块, 质构分析仪测定条件为: 探头型号为 P50 探头, 测前速度 2.0 mm/s, 测中速度 1.0 mm/s, 测后速度 2.0 mm/s, 时间间隔 5 s。测定硬度、弹性、咀嚼性、凝聚性和恢复性, 每个样品测 6~10 次, 结果取平均值。

1.3.2.7  $T_2$  弛豫时间 利用 LF-NMR 测定水分状态, 参考王旭等<sup>[19]</sup>的方法将牛肉规格稍作修改, 牛肉切成约 2 cm × 2 cm × 1 cm 的立方体置于测样管中, 测定氢质子低场核磁共振波谱。试验参数如下: 磁场强度 0.5 T; 质子共振频率 23 MHz; 自旋回波序列 (Spin echo, SF) = 23 MHz; 90 度脉冲 (P90) = 9 μs; 180 度脉冲 (P180) = 18 μs; 采样点数 (TD) = 59 990; 脉冲重复时间 (TR) = 3 000 ms; 累加采集次数 (NS) = 16; 回波次数 (Echo count) = 2 000。磁共振共振峰补偿 (CPMG) 指数衰减曲线采用 Multi Exp Inv Analysis 软件进行反演, 得到  $T_2$  值。

1.3.2.8 电子鼻 参考赵莹鑫等<sup>[20]</sup>的方法, 称取牛肉 (3.0 ± 0.1)g 于风味瓶中, 密封并室温静置 30 min, 传感器洗脱时间为 180 s, 采样时间为 60 s, 取 58~60 s 数据分析电子鼻 10 个传感器阵列对样品挥发性气味的响应情况。

#### 1.4 数据处理

试验结果通过 Excel 软件和 Origin 2018 64bit 进行数据处理及作图, 采用 SPSS 22.0 软件

对数据进行双因素方差分析, 选用 Duncan's 法进行多重比较分析, 结果以平均值 ± 标准差表示, 以  $P < 0.05$  作为差异显著性判断标准; 通过一般线性回归模型 (GLM) 分析贮藏时间及不同处理对牛肉品质影响的交互作用。

表 1 电子鼻传感器阵列及其性能特点

| 传感器序号 | 传感器型号 | 高灵敏度气体类型      |
|-------|-------|---------------|
| 1     | W1C   | 对苯类芳香成分敏感     |
| 2     | W5S   | 对氮氧化物敏感       |
| 3     | W3C   | 对氨类、芳香成分敏感    |
| 4     | W6S   | 对氢化物敏感        |
| 5     | W5C   | 对短链烷烃芳香成分敏感   |
| 6     | W1S   | 对甲基类敏感        |
| 7     | W1W   | 对硫化物敏感        |
| 8     | W2S   | 对醇类、醛酮类敏感     |
| 9     | W2W   | 对有机硫化物、芳香成分敏感 |
| 10    | W3S   | 对长链烷烃敏感       |

表 2 电场辅助冰温/超冰温贮藏牛肉各品质指标交互作用

| 指标       | P 值    |        |             |
|----------|--------|--------|-------------|
|          | 贮藏时间   | 不同处理   | 贮藏时间 × 不同处理 |
| pH 值     | < 0.01 | < 0.05 | > 0.05      |
| $L^*$    | < 0.01 | < 0.05 | > 0.05      |
| $a^*$    | < 0.01 | < 0.01 | < 0.05      |
| $b^*$    | < 0.01 | > 0.05 | > 0.05      |
| 菌落总数     | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01      |
| TVB-N    | < 0.01 | < 0.05 | > 0.05      |
| TBARS    | < 0.01 | < 0.05 | > 0.05      |
| 蒸煮损失     | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01      |
| $P_{20}$ | < 0.05 | > 0.05 | > 0.05      |
| $P_{21}$ | < 0.01 | < 0.01 | > 0.05      |
| $P_{22}$ | < 0.01 | < 0.01 | > 0.05      |
| 硬度       | < 0.01 | < 0.05 | < 0.05      |
| 弹性       | < 0.05 | < 0.05 | > 0.05      |
| 凝聚性      | < 0.05 | > 0.05 | > 0.05      |
| 咀嚼性      | < 0.05 | < 0.05 | > 0.05      |
| 恢复性      | < 0.05 | > 0.05 | > 0.05      |

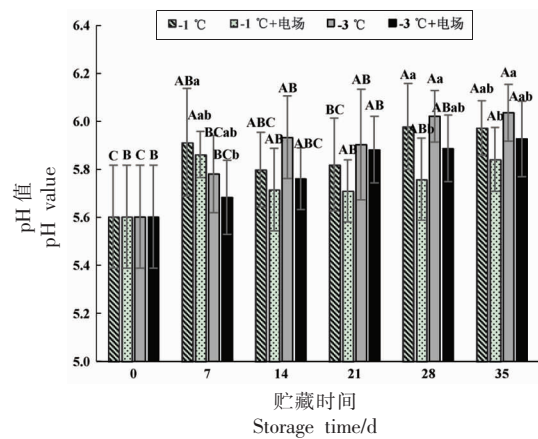
## 2 结果与分析

### 2.1 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉 pH 值的影响

电场辅助冰温、超冰温贮藏对生鲜牛肉 pH 值的影响结果见图 1。在整个贮藏期间,各处理组牛肉 pH 值整体呈现上升趋势,其原因可能是随着贮藏时间的延长,在内源酶和微生物的作用下蛋白质被分解产生含氮类物质导致 pH 值上升。在整个贮藏期内,-1℃组和-3℃组牛肉 pH 值均无显著性差异( $P>0.05$ )。在贮藏第 7~21 天期间,电场组与对照组之间无显著差异( $P>0.05$ )。在贮藏第 28,35 天时,-1℃+电场组牛肉 pH 值显著低于-1℃组和-3℃组 ( $P<0.05$ ),且对照组牛肉 pH 值略高于电场处理组,其原因可能是在贮藏后期电场抑制了牛肉中细菌的生长繁殖,减缓了胺类物质的生成速率,张珊等<sup>[21]</sup>利用电场处理凡纳滨对虾,在贮藏期间对细菌生长有抑制作用,与本研究结果吻合。

### 2.2 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉色泽的影响

电场辅助冰温、超冰温贮藏过程中牛肉表面色泽  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  变化如表 3 所示,随着贮藏时间延长,所有处理组牛肉  $L^*$  值和  $a^*$  值整体呈下降趋



注:不同大写字母表示同一贮藏条件下不同时间点 pH 值差异显著 ( $P<0.05$ );不同小写字母表示同一时间点不同贮藏条件下 pH 值差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 1 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉 pH 值的影响

Fig.1 Effects of electric field-assisted controlled freezing point/ supercooling storage on pH value of beef

势, $b^*$  值呈上升趋势。贮藏第 28 天,4 个处理组牛肉表面颜色均发生了不同程度褐变和绿变,表明牛肉在贮藏过程中色泽逐渐发生劣变,新鲜度逐渐降低。 $a^*$  值的变化与肌红蛋白的氧化和高铁肌红蛋白的形成有关,肌肉组织的氧化程度加剧及

表 3 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉贮藏期间色泽的影响

Table 3 Effects of electric field -assisted controlled freezing point/ supercooling storage on color of beef

| 时间/d | 指标    | 处理组                        |                            |                             |                             |
|------|-------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|      |       | -1℃                        | -1℃+电场                     | -3℃                         | -3℃+电场                      |
| 0    | $L^*$ | 39.63 ± 1.47 <sup>A</sup>  | 39.63 ± 1.47 <sup>A</sup>  | 39.63 ± 1.47 <sup>A</sup>   | 39.63 ± 1.47 <sup>A</sup>   |
|      | $a^*$ | 14.06 ± 0.63 <sup>A</sup>  | 14.06 ± 0.63 <sup>AB</sup> | 14.06 ± 0.63 <sup>A</sup>   | 14.06 ± 0.63 <sup>A</sup>   |
|      | $b^*$ | 13.65 ± 0.78 <sup>AB</sup> | 13.65 ± 0.78 <sup>A</sup>  | 13.65 ± 0.78 <sup>ABC</sup> | 13.65 ± 0.78 <sup>AB</sup>  |
| 7    | $L^*$ | 36.64 ± 1.62 <sup>B</sup>  | 36.93 ± 2.91 <sup>B</sup>  | 38.09 ± 3.48 <sup>A</sup>   | 39.79 ± 1.50 <sup>A</sup>   |
|      | $a^*$ | 13.70 ± 2.15 <sup>AB</sup> | 13.91 ± 2.05 <sup>B</sup>  | 13.98 ± 1.75 <sup>A</sup>   | 15.06 ± 1.86 <sup>A</sup>   |
|      | $b^*$ | 13.41 ± 1.35 <sup>AB</sup> | 12.61 ± 2.33 <sup>A</sup>  | 12.59 ± 1.97 <sup>BC</sup>  | 13.93 ± 1.5 <sup>AB</sup>   |
| 14   | $L^*$ | 36.13 ± 1.86 <sup>B</sup>  | 37.36 ± 1.35 <sup>B</sup>  | 37.11 ± 1.81 <sup>AB</sup>  | 37.87 ± 0.85 <sup>B</sup>   |
|      | $a^*$ | 15.66 ± 2.52 <sup>AB</sup> | 15.85 ± 2.10 <sup>A</sup>  | 14.49 ± 1.02 <sup>A</sup>   | 14.84 ± 1.05 <sup>A</sup>   |
|      | $b^*$ | 13.56 ± 2.18 <sup>AB</sup> | 13.57 ± 1.01 <sup>A</sup>  | 13.22 ± 1.75 <sup>ABC</sup> | 13.8 ± 0.99 <sup>AB</sup>   |
| 21   | $L^*$ | 35.64 ± 1.09 <sup>B</sup>  | 36.00 ± 2.06 <sup>B</sup>  | 35.48 ± 0.74 <sup>B</sup>   | 36.38 ± 1.47 <sup>B</sup>   |
|      | $a^*$ | 13.33 ± 1.95 <sup>Ba</sup> | 13.44 ± 1.56 <sup>Ba</sup> | 11.41 ± 1.82 <sup>Bab</sup> | 10.96 ± 1.77 <sup>BCb</sup> |
|      | $b^*$ | 12.61 ± 1.42 <sup>B</sup>  | 12.78 ± 0.82 <sup>A</sup>  | 12.15 ± 2.17 <sup>C</sup>   | 12.26 ± 1.88 <sup>B</sup>   |
| 28   | $L^*$ | 33.38 ± 1.16 <sup>C</sup>  | 33.43 ± 1.53 <sup>C</sup>  | 32.92 ± 1.91 <sup>C</sup>   | 33.79 ± 1.54 <sup>C</sup>   |
|      | $a^*$ | 12.36 ± 1.76 <sup>B</sup>  | 13.12 ± 1.31 <sup>B</sup>  | 11.58 ± 1.60 <sup>B</sup>   | 11.69 ± 0.98 <sup>B</sup>   |
|      | $b^*$ | 13.82 ± 2.02 <sup>AB</sup> | 13.04 ± 2.46 <sup>A</sup>  | 14.94 ± 1.50 <sup>A</sup>   | 14.17 ± 0.72 <sup>A</sup>   |
| 35   | $L^*$ | 30.28 ± 1.12 <sup>D</sup>  | 29.72 ± 1.35 <sup>D</sup>  | 31.52 ± 1.77 <sup>C</sup>   | 31.46 ± 1.46 <sup>D</sup>   |
|      | $a^*$ | 9.99 ± 0.96 <sup>Ca</sup>  | 10.22 ± 1.05 <sup>Ca</sup> | 7.83 ± 0.96 <sup>Cb</sup>   | 9.63 ± 0.69 <sup>Ca</sup>   |
|      | $b^*$ | 15.12 ± 1.54 <sup>A</sup>  | 14.50 ± 1.44 <sup>A</sup>  | 14.30 ± 0.88 <sup>AB</sup>  | 14.67 ± 1.68 <sup>A</sup>   |

注:不同大写表示同一贮藏条件下不同时间点色泽差异显著 ( $P<0.05$ );不同小写字母表示同一时间点不同贮藏条件下色泽差异显著 ( $P<0.05$ )。

大量微生物生长繁殖,促进了呈褐色的高铁肌红蛋白形成,肉中所含蛋白质会被微生物分解生成硫化物,这些物质与肌红蛋白结合,促进暗绿色硫代肌红蛋白的生成,使肉品绿变<sup>[22]</sup>。贮藏第 35 天,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组的  $a^*$  值与  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  组差异显著 ( $P<0.05$ ), 在其余同一贮藏时间点,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  组和  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  组牛肉  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值无显著性差异 ( $P>0.05$ ); 在同一贮藏温度下,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组和  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组的  $L^*$  在贮藏 7, 14, 21, 28 d 时高于对照组 ( $P<0.05$ ),  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组的  $a^*$  值均高于对照组 ( $P<0.05$ ),  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组在贮藏 7, 14, 28, 35 d 时高于对照组 ( $P<0.05$ )。贮藏第 35 天,  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组的  $a^*$  值与  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  组差异显著 ( $P<0.05$ )。胡斐斐等<sup>[23]</sup>研究电场辅助猪肉冻藏,发现电场处理组与对照组相比色泽差异不明显。本研究中电场处理影响色泽的原因需要深入的研究。

### 2.3 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉菌落总数的影响

电场辅助冰温、超冰温贮藏过程中菌落总数的影响见图 3, 牛肉菌落总数初始值为  $3.8\text{ lg}$  (CFU/g), 随着贮藏时间的延长, 各处理组牛肉菌落总数呈上升趋势。贮藏第 35 天时, 各处理组牛肉菌落总数均已超过  $6\text{ lg}$  (CFU/g), 说明牛肉已经发生腐败变质。在整个贮藏期内,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  组和  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  组牛肉菌落总数在贮藏第 7 天和 35 天时具有显著性差异 ( $P<0.05$ ), 其余贮藏时间均无显著性差异 ( $P>0.05$ )。贮藏第 14 天,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组牛肉菌落总数显著低于  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  组及  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  组 ( $P<0.05$ ); 贮藏第 21 天,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组及  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组牛肉菌落总数均低于其对照组, 且  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}+\text{电场}$  组也显著低于  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  组 ( $P<0.05$ ), 这与岑剑伟等<sup>[14]</sup>在罗非鱼片上研究发现电场处理组菌落总数低于对照组的结果一致。同一贮藏温度下, 相较于对照组, 电场辅助对细菌的生长繁殖有一定的抑制作用, 可能是因为在外加电场作用下, 空气发生电离, 产生微量的臭氧负离子等强氧化物质, 在一定程度上抑制了微生物的生长繁殖<sup>[24]</sup>。

### 2.4 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉 TVB-N 含量的影响

电场辅助冰温、超冰温贮藏过程中牛肉 TVB-N 含量变化情况见图 4, 随贮藏时间延长, 牛肉 TVB-N 含量显著上升 ( $P<0.05$ ); 贮藏第 35 天, 各

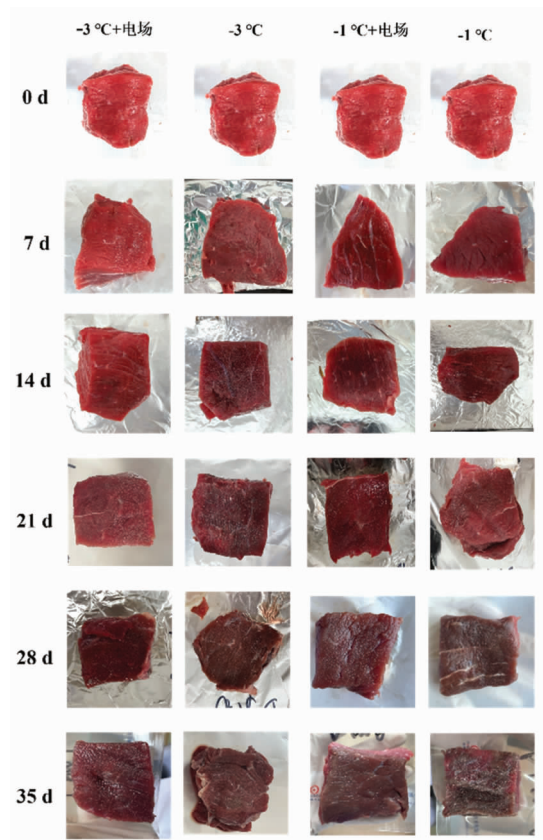
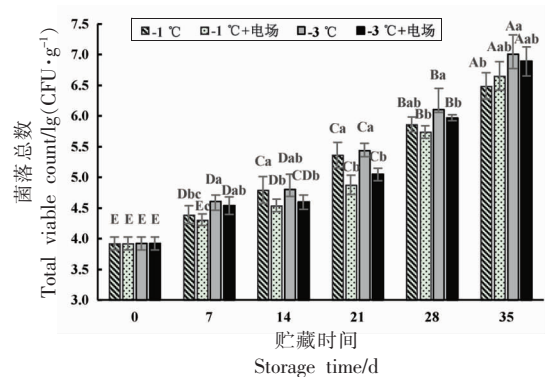


图 2 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉贮藏期间色泽的影响

Fig.2 Effects of electric field -assisted controlled freezing point/ supercooling storage on color of beef



注: 不同大写字母表示同一贮藏条件下不同时间点菌落总数差异显著 ( $P<0.05$ ); 不同小写字母表示同一时间点不同贮藏条件菌落总数差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 3 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉菌落总数的影响

Fig.3 Effects of electric field -assisted controlled freezing point/ supercooling storage on total viable count of beef

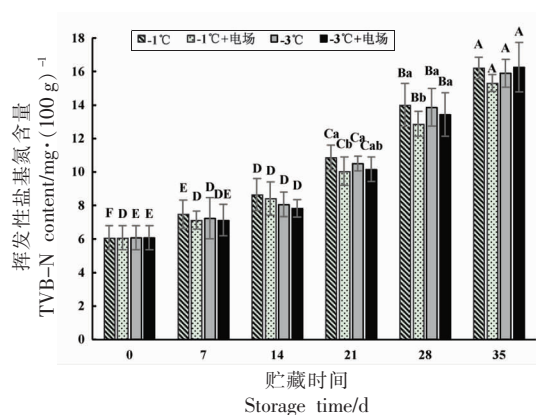
处理组牛肉 TVB-N 含量均超过 15 mg/100 g,说明牛肉已腐败变质。在整个贮藏期内,-1℃组和-3℃组牛肉菌落总数均无显著性差异 ( $P>0.05$ );电场处理组牛肉 TVB-N 含量均低于对照组,其中贮藏第 21 天和 28 天,-1℃+电场组样品 TVB-N 含量显著低于-1℃和-3℃组 ( $P<0.05$ )。张家玮等<sup>[25]</sup>研究发现静电场辅助微冻期间带鱼 TVB-N 含量的产生受到一定程度的抑制,与本试验结果一致,这主要是因为在外加电场的作用下,空气中产生的臭氧负离子,在一定程度上可抑制细菌的生长繁殖,进而减少氨及胺类等碱性含氮物质的累积<sup>[26]</sup>。

## 2.5 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉 TBARS 值的影响

电场辅助冰温、超冰温贮藏过程中 TBARS 值变化情况见图 5,由于随贮藏时间延长,TBARS 值显著上升 ( $P<0.05$ ),说明牛肉脂肪氧化程度逐渐加剧。在整个贮藏期内,-1℃组和-3℃组牛肉 TBARS 值均无显著性差异 ( $P>0.05$ )。贮藏第 35 天,-1℃+电场组牛肉 TBARS 值显著低于-1℃组 ( $P<0.05$ );贮藏第 0~28 天,电场组与对照组 TBARS 值无显著性差异 ( $P>0.05$ ),说明在此期间电场辅助冰温、超冰温贮藏对生鲜肉脂肪氧化程度无显著影响。

## 2.6 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉蒸煮损失的影响

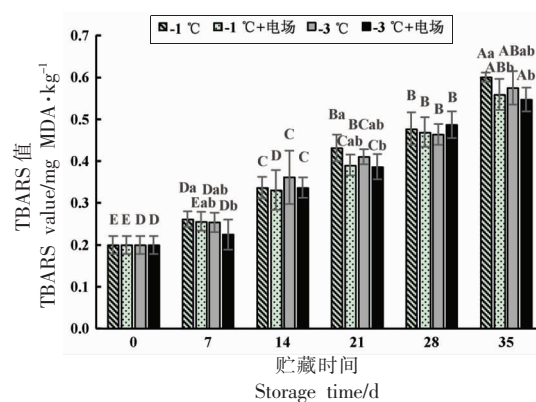
电场辅助冰温、超冰温贮藏过程中牛肉蒸煮损失变化情况见图 6,随着贮藏时间的延长,各处理组牛肉蒸煮损失呈增长趋势。贮藏 28 d 时,-1℃组和-3℃组牛肉蒸煮损失无显著性差异 ( $P>0.05$ ),其余贮藏时间点-3℃组蒸煮损失显著低于-1℃组。同一贮藏温度下,电场组蒸煮损失均低于对照组,贮藏第 7,14,35 天,-1℃+电场组蒸煮损失均显著低于-1℃组 ( $P<0.05$ );贮藏第 28 天,-3℃+电场组蒸煮损失均显著低于-3℃组 ( $P<0.05$ ),这与张珊等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。肉品在冰温和超冰温贮藏过程中,在内源性蛋白酶系统的作用下,肌原纤维蛋白会发生变性,水分子结构及其与肌肉蛋白的结合状态发生改变,水分大量流失<sup>[27]</sup>。加入电场处理后,电场改变水分子的移动方向,水分子的偶极矩、内能及氢键结构等均发生改变,从而引发极性分子的运动轨迹发生改变,氢键结构



注:不同大写字母表示同一贮藏条件下不同时间点 TVB-N 含量差异显著 ( $P<0.05$ );不同小写字母表示同一时间点不同贮藏条件 TVB-N 含量差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 4 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉 TVB-N 含量的影响

Fig.4 Effects of electric field -assisted controlled freezing point/ supercooling storage on TVB-N content of beef

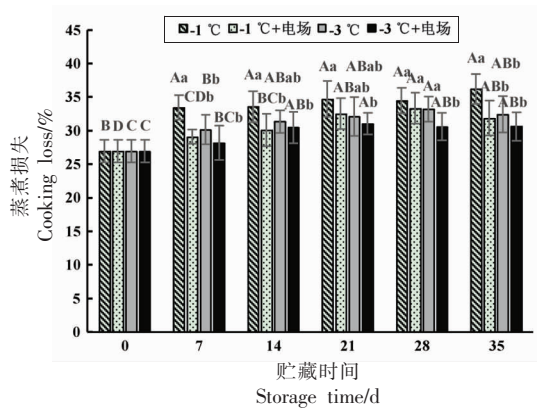


注:不同大写字母表示同一贮藏条件下不同时间点 TBARS 值差异显著 ( $P<0.05$ );不同小写字母表示同一时间点不同贮藏条件 TBARS 值差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 5 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉 TBARS 值的影响

Fig.5 Effects of electric field -assisted controlled freezing point/ supercooling storage on TBARS value of beef

趋于稳定<sup>[28]</sup>,说明电场辅助冰温、超冰温贮藏一定程度上可提高牛肉的持水力。Qian 等<sup>[13]</sup>的研究表明静电场可以促进解冻过程中的肌原纤维蛋白复性,维持蛋白质与水的结合能力。这可能解释了加入电场处理后,蛋白质和水分子间的作用力加强,肌肉中水的流动性降低,减少了不易流动水的流失,达到稳定肉品持水力的目的<sup>[29]</sup>。



注:不同大写字母表示同一贮藏条件下不同时间点蒸煮损失差异显著 ( $P<0.05$ );不同小写字母表示同一时间点不同贮藏条件蒸煮损失差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 6 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉蒸煮损失的影响  
Fig.6 Effects of electric field -assisted controlled freezing point/ supercooling storage on cooking loss of beef

2.7 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉  $T_2$  弛豫时间的影响

电场辅助冰温、超冰温贮藏过程中弛豫面积百分比  $P_2$  变化情况见表 4,随着贮藏时间的延长,

结合水弛豫面积百分比  $P_{2b}$  呈现显著变化,-1℃组和-1℃+电场组贮藏 14 天时  $P_{2b}$  含量最高,随后逐渐降低,-3℃组和-3℃+电场组在贮藏 35 天时  $P_{2b}$  含量最高 ( $P<0.05$ );-1℃处理组和-1℃+电场处理组不易流动水弛豫面积百分比  $P_{21}$  随着贮藏时间的延长显著降低 ( $P<0.05$ ),-3℃处理组和-3℃+电场处理组的  $P_{21}$  分别在贮藏 14 天和贮藏 7 天时有短暂的上升,但总体呈现下降趋势;各组的自由水弛豫面积百分比  $P_{22}$  显著增大 ( $P<0.05$ ),-3℃处理组和-3℃+电场处理组的  $P_{22}$  对应  $P_{21}$  的百分比变化,分别在贮藏 14 d 和贮藏 7 d 天出现小的波动,但总体呈现增大趋势,这是因为在贮藏过程中,一系列生理反应导致肌纤维结构变松散,使得纤丝、肌原纤维及肌细胞膜之间的不易流动水向着自由水迁移,自由水不断流失<sup>[30]</sup>。在贮藏后期(14,21,28,35 d),-3℃组牛肉  $P_{21}$  高于-1℃组,其中第 21 天和 28 天,-3℃组牛肉  $P_{21}$  显著高于-1℃组 ( $P<0.05$ ),说明超冰温处理组的水分迁移程度低于冰温处理组;对比加入电场前、后的各处理组,在贮藏第 7,14,28 天,-3℃+电场组  $P_{21}$  显著

表 4 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉弛豫峰面积百分比  $P_2$  的影响

Table 4 Effects of electric field -assisted controlled freezing point/ supercooling storage on  $P_2$  of beef

| 时间/d | 指标       | 处理组                         |                             |                             |                            |
|------|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|      |          | -1℃                         | -1℃+电场                      | -3℃                         | -3℃+电场                     |
| 0    | $P_{2b}$ | 4.44 ± 0.27 <sup>B</sup>    | 4.44 ± 0.27 <sup>AB</sup>   | 4.44 ± 0.27 <sup>ABC</sup>  | 4.44 ± 0.27 <sup>AB</sup>  |
|      | $P_{21}$ | 93.66 ± 1.21 <sup>A</sup>   | 93.66 ± 1.21 <sup>A</sup>   | 93.66 ± 1.21 <sup>A</sup>   | 93.66 ± 1.21 <sup>A</sup>  |
|      | $P_{22}$ | 1.90 ± 1.15 <sup>C</sup>    | 1.90 ± 1.15 <sup>B</sup>    | 1.90 ± 1.15 <sup>C</sup>    | 1.90 ± 1.15 <sup>D</sup>   |
| 7    | $P_{2b}$ | 3.23 ± 0.35 <sup>Ca</sup>   | 3.17 ± 0.52 <sup>Ba</sup>   | 4.19 ± 1.46 <sup>ABCa</sup> | 3.55 ± 0.84 <sup>Ba</sup>  |
|      | $P_{21}$ | 91.76 ± 2.58 <sup>Abc</sup> | 93.35 ± 2.42 <sup>ab</sup>  | 90.46 ± 1.73 <sup>Bc</sup>  | 94.50 ± 1.75 <sup>Aa</sup> |
|      | $P_{22}$ | 5.01 ± 2.75 <sup>BCa</sup>  | 3.48 ± 2.04 <sup>Bab</sup>  | 5.34 ± 2.58 <sup>Ba</sup>   | 1.94 ± 1.94 <sup>Bb</sup>  |
| 14   | $P_{2b}$ | 5.96 ± 0.65 <sup>Aa</sup>   | 4.29 ± 0.85 <sup>ABa</sup>  | 3.53 ± 0.80 <sup>BCa</sup>  | 3.69 ± 1.28 <sup>Bb</sup>  |
|      | $P_{21}$ | 90.26 ± 1.96 <sup>ABb</sup> | 91.03 ± 0.99 <sup>ABb</sup> | 91.87 ± 2.19 <sup>ABb</sup> | 94.07 ± 1.43 <sup>Aa</sup> |
|      | $P_{22}$ | 3.78 ± 2.19 <sup>Cab</sup>  | 4.68 ± 1.55 <sup>Ba</sup>   | 4.60 ± 2.02 <sup>Ba</sup>   | 2.24 ± 1.70 <sup>CDb</sup> |
| 21   | $P_{2b}$ | 5.11 ± 1.19 <sup>Ba</sup>   | 4.63 ± 0.98 <sup>Aa</sup>   | 3.29 ± 0.49 <sup>Cb</sup>   | 4.44 ± 0.48 <sup>ABa</sup> |
|      | $P_{21}$ | 86.76 ± 1.81 <sup>BCb</sup> | 90.34 ± 1.69 <sup>Ba</sup>  | 91.04 ± 1.75 <sup>Ba</sup>  | 91.69 ± 1.00 <sup>Ba</sup> |
|      | $P_{22}$ | 8.14 ± 1.78 <sup>Ba</sup>   | 5.03 ± 1.24 <sup>Bb</sup>   | 5.67 ± 1.80 <sup>Bb</sup>   | 3.87 ± 1.10 <sup>BCb</sup> |
| 28   | $P_{2b}$ | 3.08 ± 0.18 <sup>Cb</sup>   | 3.30 ± 0.59 <sup>Bb</sup>   | 4.85 ± 1.37 <sup>Aa</sup>   | 4.98 ± 0.54 <sup>Aa</sup>  |
|      | $P_{21}$ | 84.94 ± 2.36 <sup>CDc</sup> | 86.93 ± 1.02 <sup>Cb</sup>  | 86.87 ± 1.85 <sup>Cb</sup>  | 89.69 ± 0.98 <sup>Ca</sup> |
|      | $P_{22}$ | 11.98 ± 5.31 <sup>Aa</sup>  | 9.77 ± 2.29 <sup>Aa</sup>   | 8.28 ± 1.71 <sup>Aab</sup>  | 5.33 ± 0.55 <sup>Bb</sup>  |
| 35   | $P_{2b}$ | 2.82 ± 0.53 <sup>Cb</sup>   | 3.95 ± 1.93 <sup>ABab</sup> | 4.59 ± 0.71 <sup>ABa</sup>  | 4.78 ± 0.98 <sup>Aa</sup>  |
|      | $P_{21}$ | 82.71 ± 3.39 <sup>Bb</sup>  | 85.65 ± 3.93 <sup>Ca</sup>  | 85.50 ± 1.94 <sup>Ca</sup>  | 87.87 ± 2.21 <sup>Ba</sup> |
|      | $P_{22}$ | 14.46 ± 3.42 <sup>Aa</sup>  | 10.29 ± 5.33 <sup>Ab</sup>  | 9.91 ± 2.45 <sup>Ab</sup>   | 7.35 ± 2.06 <sup>Ab</sup>  |

注:不同大写字母表示同一贮藏条件下不同时间点弛豫峰面积百分比  $P_2$  差异显著 ( $P<0.05$ );不同小写字母表示同一时间点不同贮藏条件弛豫峰面积百分比  $P_2$  差异显著 ( $P<0.05$ )。

高于-3℃组( $P<0.05$ );而-1℃+电场组在贮藏后期21 d和28 d时 $P_{21}$ 显著高于-1℃组( $P<0.05$ );且在贮藏第7天,-1℃+电场组 $P_{21}$ 显著高于-3℃组( $P<0.05$ ),在其余贮藏时间点,-1℃+电场组 $P_{21}$ 与-3℃组无显著差异( $P>0.05$ )。研究表明,肌肉对不易流动水的保持能力决定肉的保水性,相较于-3℃组和-1℃组,电场处理后的样品保水能力更强,这可能是由于电场释放的电荷可使无序的水分子结构转为有序的树枝状<sup>[31]</sup>,水分子排列有序,提高了肌纤维束间隙的水分子稳定性。此前由于贮藏时间长所引起的水分外流,转向相继流入肌纤维和蛋白中,被重新吸收<sup>[13]</sup>,说明电场辅助冰温、超冰温贮藏的牛肉样品保水性更强,这也进一步验证了蒸煮损失的试验结果。

## 2.8 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉质构的影响

电场辅助冰温、超冰温贮藏下牛肉质构的变

化情况见表5。随着贮藏时间的延长,不同处理组牛肉的硬度均呈现先降低后上升又降低的趋势。贮藏第7天,各处理组牛肉硬度显著降低( $P<0.05$ ),其主要原因可能是牛肉的成熟过程导致肌原纤维的肌动蛋白被分离,包围在每个肌原纤维周围的肌质网状结构崩溃,可溶性肌浆蛋白大部分被分解导致肉嫩度增加,硬度下降<sup>[32]</sup>;贮藏第7~21天内,各处理组牛肉硬度均呈上升趋势,可能是由于结构蛋白质被降解,二硫键、疏水键等结构键的数量减少,不易流动水发生迁移,保水性下降,导致硬度增加<sup>[33]</sup>;贮藏21天后,各处理组牛肉硬度开始降低,可能是由于肌肉在内源性蛋白酶和微生物的作用下,蛋白质分解加剧,肌原纤维结构变得松软,这与许立兴等<sup>[34]</sup>在羊肉中的研究结果一致。在整个贮藏期内,各处理组的牛肉弹性、凝聚性及恢复性随贮藏时间的延长无显著变化( $P>0.05$ )。咀嚼性是肉硬度、弹性及凝聚性的综合

表5 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉质构的影响

Table 5 Effects of electric field -assisted controlled freezing point/ supercooling storage on texture of beef

| 时间/d | 贮藏条件   | 硬度/kg                        | 弹性                         | 凝聚性                        | 咀嚼性/kg                          | 恢复性                       |
|------|--------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 0    | -1℃    | 102.87 ± 6.54 <sup>A</sup>   | 0.42 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 0.50 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 21.39.67 ± 3.01 <sup>AB</sup>   | 0.20 ± 0.01 <sup>B</sup>  |
|      | -1℃+电场 | 102.87 ± 6.54 <sup>B</sup>   | 0.42 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 0.50 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 21.39.67 ± 3.01 <sup>B</sup>    | 0.20 ± 0.01 <sup>B</sup>  |
|      | -3℃    | 102.87 ± 6.54 <sup>B</sup>   | 0.42 ± 0.02 <sup>C</sup>   | 0.50 ± 0.02 <sup>B</sup>   | 21.39.67 ± 3.01 <sup>BC</sup>   | 0.20 ± 0.01 <sup>B</sup>  |
|      | -3℃+电场 | 102.87 ± 6.54 <sup>B</sup>   | 0.42 ± 0.02 <sup>B</sup>   | 0.50 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 21.39.67 ± 3.01 <sup>B</sup>    | 0.20 ± 0.01 <sup>B</sup>  |
| 7    | -1℃    | 84.55 ± 5.64 <sup>Ca</sup>   | 0.44 ± 0.03 <sup>A</sup>   | 0.53 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 19.94.24 ± 2.22 <sup>B</sup>    | 0.21 ± 0.01 <sup>AB</sup> |
|      | -1℃+电场 | 86.76 ± 1.50 <sup>Ca</sup>   | 0.45 ± 0.06 <sup>A</sup>   | 0.51 ± 0.04 <sup>A</sup>   | 20.70.36 ± 2.55 <sup>B</sup>    | 0.21 ± 0.01 <sup>AB</sup> |
|      | -3℃    | 72.29 ± 2.95 <sup>Cb</sup>   | 0.46 ± 0.04 <sup>AB</sup>  | 0.52 ± 0.03 <sup>AB</sup>  | 19.84.89 ± 1.87 <sup>BC</sup>   | 0.21 ± 0.02 <sup>B</sup>  |
|      | -3℃+电场 | 83.98 ± 2.98 <sup>Ca</sup>   | 0.45 ± 0.08 <sup>AB</sup>  | 0.52 ± 0.05 <sup>A</sup>   | 20.89.51 ± 2.86 <sup>B</sup>    | 0.25 ± 0.06 <sup>A</sup>  |
| 14   | -1℃    | 95.51 ± 8.42 <sup>ABa</sup>  | 0.42 ± 0.01 <sup>Aa</sup>  | 0.53 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 21.68.96 ± 3.58 <sup>AB</sup>   | 0.22 ± 0.02 <sup>AB</sup> |
|      | -1℃+电场 | 102.64 ± 3.46 <sup>Ba</sup>  | 0.43 ± 0.04 <sup>A</sup>   | 0.51 ± 0.04 <sup>A</sup>   | 23.19.87 ± 3.38 <sup>A</sup>    | 0.21 ± 0.02 <sup>AB</sup> |
|      | -3℃    | 119.38 ± 8.14 <sup>4a</sup>  | 0.49 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 0.57 ± 0.04 <sup>A</sup>   | 27.71.27 ± 5.38 <sup>A</sup>    | 0.26 ± 0.02 <sup>B</sup>  |
|      | -3℃+电场 | 111.43 ± 6.45 <sup>4a</sup>  | 0.43 ± 0.02 <sup>AB</sup>  | 0.52 ± 0.05 <sup>A</sup>   | 25.08.46 ± 2.81 <sup>A</sup>    | 0.22 ± 0.03 <sup>AB</sup> |
| 21   | -1℃    | 100.03 ± 7.22 <sup>4b</sup>  | 0.45 ± 0.04 <sup>Aa</sup>  | 0.52 ± 0.03 <sup>Aa</sup>  | 24.09.85 ± 3.84 <sup>A</sup>    | 0.23 ± 0.03 <sup>A</sup>  |
|      | -1℃+电场 | 114.77 ± 6.41 <sup>4a</sup>  | 0.43 ± 0.03 <sup>Ab</sup>  | 0.50 ± 0.04 <sup>Ab</sup>  | 24.71.07 ± 1.30 <sup>A</sup>    | 0.21 ± 0.02 <sup>AB</sup> |
|      | -3℃    | 111.17 ± 5.36 <sup>4a</sup>  | 0.46 ± 0.04 <sup>ABa</sup> | 0.52 ± 0.03 <sup>ABa</sup> | 24.84.89 ± 1.87 <sup>A</sup>    | 0.21 ± 0.02 <sup>B</sup>  |
|      | -3℃+电场 | 109.43 ± 5.84 <sup>4a</sup>  | 0.43 ± 0.04 <sup>ABb</sup> | 0.53 ± 0.02 <sup>Aa</sup>  | 24.89.71 ± 2.32 <sup>A</sup>    | 0.22 ± 0.02 <sup>AB</sup> |
| 28   | -1℃    | 89.06 ± 6.75 <sup>BCc</sup>  | 0.46 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 0.55 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 22.35.24 ± 3.03 <sup>ABb</sup>  | 0.24 ± 0.03 <sup>A</sup>  |
|      | -1℃+电场 | 101.12 ± 4.48 <sup>Bab</sup> | 0.45 ± 0.01 <sup>A</sup>   | 0.53 ± 0.03 <sup>A</sup>   | 23.31.72 ± 3.00 <sup>ABab</sup> | 0.22 ± 0.02 <sup>A</sup>  |
|      | -3℃    | 97.28 ± 4.51 <sup>Bb</sup>   | 0.48 ± 0.02 <sup>A</sup>   | 0.53 ± 0.05 <sup>AB</sup>  | 23.34.19 ± 3.04 <sup>Bab</sup>  | 0.22 ± 0.03 <sup>B</sup>  |
|      | -3℃+电场 | 104.84 ± 6.18 <sup>ABa</sup> | 0.50 ± 0.06 <sup>A</sup>   | 0.53 ± 0.03 <sup>A</sup>   | 26.39.65 ± 2.43 <sup>4a</sup>   | 0.22 ± 0.02 <sup>AB</sup> |
| 35   | -1℃    | 86.15 ± 5.02 <sup>Ca</sup>   | 0.42 ± 0.06 <sup>A</sup>   | 0.44 ± 0.21 <sup>A</sup>   | 20.15.66 ± 2.20 <sup>Ba</sup>   | 0.22 ± 0.01 <sup>AB</sup> |
|      | -1℃+电场 | 90.72 ± 5.89 <sup>Ca</sup>   | 0.45 ± 0.07 <sup>A</sup>   | 0.54 ± 0.04 <sup>A</sup>   | 20.53.18 ± 2.22 <sup>Ba</sup>   | 0.23 ± 0.02 <sup>A</sup>  |
|      | -3℃    | 77.71 ± 5.91 <sup>Cb</sup>   | 0.44 ± 0.04 <sup>BC</sup>  | 0.52 ± 0.06 <sup>AB</sup>  | 17.58.51 ± 3.73 <sup>Cab</sup>  | 0.22 ± 0.03 <sup>B</sup>  |
|      | -3℃+电场 | 84.95 ± 4.22 <sup>Ca</sup>   | 0.45 ± 0.08 <sup>AB</sup>  | 0.51 ± 0.07 <sup>A</sup>   | 15.72.70 ± 2.75 <sup>Cb</sup>   | 0.23 ± 0.04 <sup>AB</sup> |

注:不同大写字母表示同一贮藏条件下不同时间点质构差异显著( $P<0.05$ );不同小写字母表示同一时间点不同贮藏条件下质构差异显著( $P<0.05$ )。



体现,随着贮藏时间的延长,咀嚼性呈先增大后降低的趋势,与硬度变化趋势接近。在在贮藏 14 d 和 28 d 时,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  组的硬度显著低于  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  组牛肉硬度 ( $P<0.05$ ), 其它贮藏时间无显著差异 ( $P>0.05$ )。在贮藏第 7, 28, 35 d,  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ +电场组硬度均显著高于  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  组 ( $P<0.05$ ), 表明在电场辅助的条件下, 内源性蛋白酶系统作用被限制, 蛋白酶量减少和酶催化活性降低减缓蛋白降解速率, 相较于未加电场组, 肌纤维的排列更加紧致, 间隙小, 对肉的硬度有一定的维持作用<sup>[14]</sup>, 这与胡斐斐等<sup>[35]</sup>研究结果相吻合。此外, 低压静电场释放的带电粒子, 可作用于肌肉蛋白, 使分子链展开, 蛋白质分子内部的非极性氨基酸残基暴露出来, 与水分子的结合能力提高<sup>[36]</sup>, 肌肉细胞免于被物理破坏, 完整性提高, 从而使肉呈现较高的硬度。

## 2.9 电场辅助冰温/超冰温贮藏对牛肉挥发性气味的影响

随贮藏时间延长传感器对不同处理组牛肉挥

发性气味的响应情况如图 7 所示, 4 个处理组牛肉的电子鼻传感器响应雷达图轮廓相似。结果显示, 贮藏第 7, 21, 28, 35 天可明显区分不同处理组牛肉挥发性气味, 说明此时 10 个传感器 W1W、W2W、W5S、W6S、W3S、W2S、W1S、W1C、W5C 对牛肉挥发性气味敏感, 其中, 起到主要区分作用的是传感器 W1W、W2W、W5S、W1S, 表明检测到了硫化物、有机硫化物、芳香成分、氮氧化合物、甲基类等物质。随贮藏时间的延长, 传感器 W1W、W5S 及 W1S 响应强度逐渐增加, 表明硫化物、氮氧化合物及甲基类等物质逐渐增多, 新鲜度逐渐降低, 这与赵莹鑫等<sup>[20]</sup>对不同时间包装羊肉的研究结果一致。贮藏第 7, 21, 28, 35 天,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  组牛肉对 W1W 传感器响应强度均高于  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ +电场组,  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  组牛肉对 W1W 传感器响应强度均高于  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ +电场组, 说明电场辅助冰温、超冰温贮藏在一定程度上可减少牛肉贮藏过程中硫化物的产生。

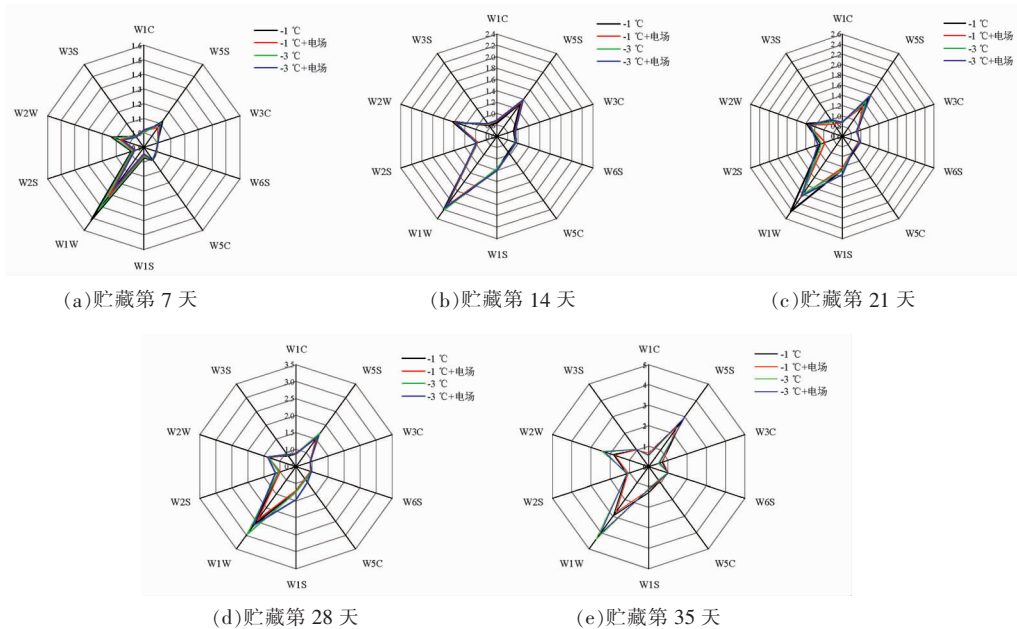


图 7 电场辅助冰温/超冰温贮藏期间牛肉风味雷达指纹图谱

Fig.7 Radar map of flavor components of electric field-assisted controlled freezing point/supercooling storage

## 3 结论

冰温、超冰温贮藏的托盘包装牛肉货架期可达 28 d。与未加电场组相比, 电场辅助牛肉冰温/超冰温贮藏可有效抑制牛肉在贮藏期间菌落总数上升和 TVB-N 含量增加; 同时电场处理可降低牛

肉蒸煮损失, 减少不易流动水的流失, 对牛肉的硬度有一定的维持作用, 并且在一定程度上可减少硫化物的产生。综上, 电场辅助冰温、超冰温贮藏在一定程度上可有效保持牛肉的品质和新鲜度, 延缓品质劣变。

## 参 考 文 献

- [1] 张德权, 侯成立. 热鲜肉与冷却肉品质差异之管见[J]. 肉类研究, 2020, 34(5): 83-90.  
ZHANG D Q, HOU C L. Humble opinion on the quality difference between hot meat and chilled meat[J]. Meat Research, 2020, 34(5): 83-90.
- [2] 侯成立, 李欣, 王振宇, 等. 不同部位牦牛肉氨基酸、脂肪酸含量分析与营养价值评价[J]. 肉类研究, 2019, 33(2): 52-57.  
HOU C L, LI X, WANG Z Y, et al. Amino acid and fatty acid composition and nutritional value evaluation of different yak meat cuts[J]. Meat Research, 2019, 33(2): 52-57.
- [3] 李培迪, 李欣, 李铮, 等. 冰温贮藏对宰后肌肉成熟进程的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 554-562.  
LI P D, LI X, LI Z, et al. Effects of controlled freezing point storage on aging from muscle to meat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3): 554-562.
- [4] LIU D K, XU C C, GUO C X, et al. Sub-zero temperature preservation of fruits and vegetables: A review[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 275: 109881.
- [5] LI X, ZHANG Y, LI Z, et al. The effect of temperature in the range of -0.8 to 4 °C on lamb meat color stability[J]. Meat Science, 2017, 134: 28-33.
- [6] LU X, ZHANG Y M, ZHU L X, et al. Effect of superchilled storage on shelf life and quality characteristics of *M. longissimus lumborum* from Chinese Yellow cattle[J]. Meat Science, 2019, 149: 79-84.
- [7] 张博博, 孙钦, 许朝阳, 等. 超冰温技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(6): 227-232.  
ZHANG B B, SUN Q, XU C Y, et al. Research advance on controlled supercooling-point technology[J]. Storage and Process, 2020, 20(6): 227-232.
- [8] 段欣, 薛文通, 张惠. 高压静电场处理在食品中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2008, 29(10): 297-300.  
DUAN X, XUE W T, ZHANG H. Development and research progress of high-voltage electric field in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(10): 297-300.
- [9] 贾红玲, 周振勇, 阿曼古丽·朱马汉, 等. 高压静电场(HVEF)在肉类保鲜中的应用研究进展[J]. 草食家畜, 2019(2): 19-22.  
JIA H L, ZHOU Z Y, OMANGULI Z M H, et al. Study on the application of high voltage electrostatic field (HVEF) in meat preservation[J]. Grass-Feeding Livestock, 2019(2): 19-22.
- [10] QI M Y, ZHAO R Q, LIU Q Y, et al. Antibacterial activity and mechanism of high voltage electrostatic field (HVEF) against *Staphylococcus aureus* in medium plates and food systems[J]. Food Control, 2021, 120: 107566.
- [11] XIE Y, CHEN B, GUO J, et al. Effects of low voltage electrostatic field on the microstructural damage and protein structural changes in prepared beef steak during the freezing process[J]. Meat Science, 2021, 179: 108527.
- [12] RAHBARI M, HAMDAMI N, MIRZAEI H, et al. Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 216: 98-106.
- [13] 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.
- [14] 岑剑伟, 蒋爱民, 李来好, 等. 高压静电场结合冰温技术对罗非鱼片贮藏期品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 282-288.  
CEN J W, JIANG A M, LI L H, et al. Effect of high voltage electrostatic field combined with modified atmosphere packaging and controlled freezing-point storage on the quality of tilapia fillet[J]. Food Science, 2016, 37(22): 282-288.
- [15] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
China Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard food microbiological examination determination of total bacterial count: GB 4789.2-2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [16] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食

- 品中挥发性盐基氮的测定: GB 5009.228-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard determination of volatile basic nitrogen in food: GB 5009.228-2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [17] LIANG C, ZHANG D Q, WEN X Y, et al. Effects of chilling rate on the freshness and microbial community composition of lamb carcasses[J]. LWT, 2022, 153: 112559.
- [18] YAN T J, HOU C L, WANG Z Y, et al. Effects of chilling rate on progression of rigor mortis in postmortem lamb meat [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131463.
- [19] 王旭, 张德权, 赵莹鑫, 等. 干法成熟过程羊腿肉持水能力与水分迁移规律[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 179-189.
- WANG X, ZHANG D Q, ZHAO Y X, et al. Water-holding capacity and water migration of lamb gigot during dry aging[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(1): 179-189.
- [20] 赵莹鑫, 张德权, 葛岳, 等. 包装方式和宰后不同时间包装对羊肉品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 199-208.
- ZHAO Y X, ZHANG D Q, GE Y, et al. Effects of packaging methods and packaging at different post-mortem times on the quality of lamb meat[J]. Food Science, 2022, 43(15): 199-208.
- [21] 张珊, 林慧敏, 邓尚贵. 低压静电场对凡纳滨对虾保鲜效果的研究[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 141-147.
- ZHANG S, LIN H M, DENG S G. Effect of low voltage electrostatic field on fresh-keeping of *Litopenaeus vannamei* [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 141-147.
- [22] 邬威. 牛肉冷却贮藏期间肉色褐变相关生物标志物的定量蛋白质组学方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- WU W. The study on the quantitative proteomics approaches of biomarkers associated with beef discoloration during chilling storage[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [23] 胡斐斐, 钱书意, 黄峰, 等. 低压静电场辅助短期冻藏对猪肉品质的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(9): 1993-2005.
- HU F F, QIAN S Y, HUANG F, et al. Effect of low voltage electrostatic field-assisted short-term frozen storage on quality of pork[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(9): 1993-2005.
- [24] 孙芳, 李培龙, 孟繁博, 等. 高压静电解冻技术对牛肉品质的影响研究[J]. 中国牛业科学, 2011, 37(6): 13-17.
- SUN F, LI P L, MENG F B, et al. Effect of high-voltage electrostatic field thawing beef on beef quality[J]. China Cattle Science, 2011, 37(6): 13-17.
- [25] 张家玮, 谢超, 余铭, 等. 低压静电场处理对带鱼微冻贮藏期间品质变化影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 277-283.
- ZHANG J W, XIE C, YU M, et al. Effect of low voltage electrostatic field (LVEF) treatment on the quality changes of *Trichiurus lepturus* during micro-frozen storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(23): 277-283.
- [26] SONG J, FAN L H, HILDEBRAND P D, et al. Biological effects of corona discharge on onions in a commercial storage facility[J]. HortTechnology, 2000, 10(3): 608-612.
- [27] MELODY J L, LONERGAN S M, ROWE L J, et al. Early postmortem biochemical factors influence tenderness and water-holding capacity of three porcine muscles1 [J]. Journal of Animal Science, 2004, 82(4): 1195-1205.
- [28] JIA G L, NIRASAWA S, JI X H, et al. Physico-chemical changes in myofibrillar proteins extracted from pork tenderloin thawed by a high-voltage electrostatic field[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 910-916.
- [29] JIA G L, VAN DEN BERG F, HAO H, et al. Estimating the structure of sarcoplasmic proteins extracted from pork tenderloin thawed by a high-voltage electrostatic field [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(4): 1574-1578.
- [30] ESTÉVEZ M, VENTANAS S, HEINONEN M, et al. Protein carbonylation and water-holding capacity of pork subjected to frozen storage: Effect of muscle type, premincing, and packaging[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(10): 5435-5443.
- [31] JOHARI G P. The dipolar correlation factor, the electrostatic field, the dipole moment, and the Coulombic interaction energy of water molecules in

- clathrate hydrates[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1981, 74(2): 1326–1336.
- [32] 李莎莎, 计红芳, 张令文, 等. 冰温保鲜过程中鸡肉品质及微观结构的变化[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(16): 201–207.
- LI S S, JI H F, ZHANG L W, et al. Changes in quality and microstructure of chicken during ice–temperature storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(16): 201–207.
- [33] 梁梦帆, 李思凡. 肌内胶原蛋白与肉嫩度关系研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2019(9): 187–188.
- LIANG M F, LI S F. Progress of research on the relationship between intramuscular collagen and meat tenderness [J]. *China Food Safety Magazine*, 2019 (9): 187–188.
- [34] 许立兴, 薛晓东, 仵轩轩, 等. 微冻及冰温结合气调包装对羊肉的保鲜效果[J]. *食品科学*, 2017, 38 (3): 232–238.
- XU L X, XUE X D, WU X X, et al. Comparative effects of superchilling and ice–temperature combined with modified atmosphere packaging on mutton quality during storage [J]. *Food Science*, 2017, 38 (3): 232–238.
- [35] 胡斐斐, 钱书意, 李侠, 等. 低压静电场辅助冷藏对牛肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 132–138.
- HU F F, QIAN S Y, LI X, et al. Effect of low electrostatic field–assisted chilling storage on quality of beef[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 132–138.
- [36] SHAO J H, DENG Y M, SONG L, et al. Investigation the effects of protein hydration states on the mobility water and fat in meat batters by LF–NMR technique[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2016, 66: 1–6.

### Effects of Electric Field Assisted Controlled Freezing Point Storage and Supercooling Storage on the Quality of Fresh Beef

Xu Yuqian, Xie Feifei, Zhang Dequan, Li Xin, Wang Su, Fang Fei, Liu Shanshan, Hou Chengli\*  
*(Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro–Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193)*

**Abstract** To study the effect of electric field–assisted controlled freezing point storage and supercooling storage on the quality of fresh beef, silverside muscle was used as the test material, to analysis changes in pH value, color, total number of colonies, TVB–N content, TBARS content, cooking loss, texture,  $T_2$  relaxation time and volatile odor of beef storage on days 0, 7, 14, 21, 28, and 35 under electric field (equipment output voltage 3 300–4 000 V, current 0.04 A) assisted controlled freezing point ( $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and supercooling ( $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), and non–electric field storage (control group). The results showed that after 35 days of storage, the pH value of the  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  + electric field group was 5.84, the TBARS value was 0.55 mg MDA/kg, and the cooking loss was 31.84%, significantly lower than the 5.97, 0.60 mg MDA/kg, and 36.19% of the  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  group ( $P<0.05$ ). The  $a^*$  value of the  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  + electric field group was 10.22, significantly higher than that of the  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  group (7.83) and the  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  + electric field group (9.63). When stored for 21 days, the total bacterial count of the  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  + electric field and  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  + electric field groups were 4.87 lg(CFU/g) and 5.04 lg(CFU/g), respectively, and the TVB–N content was 10.03 mg/100 g and 10.15 mg/100 g, significantly lower than their respective control groups of 5.36 lg(CFU/g) and 5.43 lg(CFU/g), and 10.85 mg/100 g and 10.50 mg/100 g ( $P<0.05$ ). Similarly, on the 28th day of storage,  $P_{21}$  (86.93) in the  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  + electric field group and  $P_{21}$  (89.69) in the  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  + electric field group were significantly higher than 84.94 and 86.87 in their respective control groups ( $P<0.05$ ). The hardness of the  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  + electric field group was 84.95 kg after storage for 35 days, significantly higher than that of the  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  group (77.71 kg,  $P<0.05$ ). At the same storage time point, there was no significant difference in various quality indicators between the controlled freezing point storage group and the supercooling storage group ( $P>0.05$ ). Compared with the control group, the beef color, elasticity, cohesion, chewiness and recovery were not significantly different in the electric field treatment group ( $P>0.05$ ). Therefore, electric field assisted controlled freezing point storage and supercooling storage can effectively improve the quality and freshness of beef, and delay the deterioration of quality.

**Keywords** electric field; controlled freezing point temperature; supercooling; beef; quality