

基于冻结过程分析高压脉冲电场辅助 对冷冻苹果品质的影响

段智英¹ 刘憬璇² 李丽丽¹ 张 茹³

(1. 山西农业大学基础部, 山西 太谷 030801; 2. 河南工业大学国际教育学院, 河南 郑州 450001;
3. 汉阳大学设计学院, 韩国 首尔 15599)

摘要: [目的] 探究高压脉冲电场处理对冷冻苹果品质的影响。[方法] 以苹果样品为试验材料, 采用高压脉冲电场处理方法, 通过观测苹果样品冻结曲线、冻结时间和微观组织结构的变化, 分析高压脉冲电场对苹果样品冻结过程和细胞结构的影响。测量苹果样品解冻后质构参数、汁液流失率、营养成分以及色泽等品质指标, 分析高压脉冲电场对冻结苹果解冻品质的影响及其机理。[结果] 高压脉冲电场处理缩短了苹果样品冻结时通过最大冰晶生成区的时间; 1 000 V/cm, 60 μ s, 15 个的高压脉冲电场处理的苹果样品微观组织细胞孔隙空间相对较小, 减缓了冻结对细胞结构的破坏; 1 000 V/cm, 60 μ s, 15 个和 1 250 V/cm, 90 μ s, 30 个的高压脉冲电场处理的苹果样品解冻后的凝聚性、回复性均显著提高, 汁液流失率显著减小, 苹果的含糖和含钙量显著提高; 1 000 V/cm, 60 μ s, 15 个的高压脉冲电场处理的苹果样品解冻后未发生褐变且色泽鲜亮。[结论] 适当的高压脉冲电场处理可减缓冻结对苹果产生的损伤, 提升冷冻苹果的品质。

关键词: 高压脉冲电场; 苹果; 冻结过程; 微观结构; 品质

Effect of high-voltage pulsed electric field on the quality of frozen apple based on freezing process

DUAN Zhiying¹ LIU Jingxuan² LI Lili¹ ZHANG Ru³

(1. Department of Basic Sciences, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;
2. School of International Education, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;
3. College of Design, Hanyang University, Seoul 15599, Korea)

Abstract: [Objective] To explore the effect of high-voltage pulsed electric field (HPEF) treatment on the quality of frozen apples. [Methods] Apple samples are treated with HPEFs. Then, the freezing curve, freezing time, and microstructures of apple samples are observed to analyze the effect of HPEFs on the freezing process and cell structure of apple samples. Additionally, the texture parameters, drip loss rate, nutrient composition, and color of frozen apple samples after thawing are measured to analyze the effect of HPEFs on the quality of frozen apples and its mechanism. [Results] It is found that HPEF treatment can shorten the time to pass the maximum ice crystal formation zone. The pore space is relatively small in apple samples treated under the conditions of 1 000 V/cm, 60 μ s, and 15 HPEFs, which slows down the cell structure damage by freezing. After thawing, the cohesiveness, resilience, as well as sugar and calcium content are significantly increased, while the drip loss rate is significantly reduced in the apple samples treated under the conditions of 1 000 V/cm, 60 μ s, and 15 HPEFs, as well as 1 250 V/cm, 90 μ s, and 30 HPEFs. After thawing, no brown stain occurs, and color remains bright in the

基金项目: 山西省重点研发计划项目(编号: 202102020101012); 山西农业大学科技创新提升工程项目(编号: CXGC2025035)

通信作者: 张茹(1998—), 女, 汉阳大学在读博士研究生。E-mail: zru2022@163.com

收稿日期: 2025-03-06 **改回日期:** 2025-08-06

引用格式: 段智英, 刘憬璇, 李丽丽, 等. 基于冻结过程分析高压脉冲电场辅助对冷冻苹果品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 15-22.

Citation: DUAN Zhiying, LIU Jingxuan, LI Lili, et al. Effect of high-voltage pulsed electric field on the quality of frozen apple based on freezing process[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 15-22.

apple samples treated under the conditions of 1 000 V/cm, 60 μ s, and 15 HPEFs. **[Conclusion]** The results show that proper HPEF treatment can slow down the freezing damage on apples, improving the quality of frozen apples.

Keywords: high-voltage pulsed electric field (HPEF); apple; freezing process; microstructure; quality

苹果中富含维生素、矿物质和多酚类成分。作为天然抗氧化剂,多酚具有防癌、抗动脉硬化等多种医学疗效^[1];维生素 C 具有加强免疫力、预防缺铁性贫血和帕金森综合征的功能^[2]。中国苹果的种植面积和产量均居世界第一^[3],2022 年全国苹果总产量达 4 757.2 万 t,占世界苹果总产量的 40% 以上^[4-5]。常温下,新鲜苹果贮藏期较短,容易腐烂变质。低温环境可以抑制微生物的繁殖,降低果实中与呼吸作用相关的酶活性,减慢腐烂速度,且冷冻贮藏具有成本低、无环境污染等特点,常用冷却降温方法来延长苹果的贮藏期^[6]。

目前,常用的物理方法如磁场辅助^[7]、电场辅助^[8]、超声波处理^[9-10]、真空喷雾^[11]、真空热风^[12]、超高压^[13]、微波^[14]、红外线^[15]等均可提高冻结果蔬品质。物理场在冷冻/解冻方面具有较大的应用潜力。高压脉冲电场(HPEF)是一种非热处理技术,因其作用于食品后不会产生对人体有害的自由基物质、能够保持食物的营养特征且具有传递均匀、能耗低和处理时间极短等优点^[16],在食品杀菌以及灭酶和汁液提取方面被广泛应用^[17-20]。HPEF 处理方法是一种新兴的、可持续的、环保的处理方法,是 21 世纪食品加工技术领域的最新技术之一^[21]。脉冲电场辅助可提升低温解冻猪肉品质^[22],提高苹果干的复水率^[23],增强虾肉的抗氧化活性并提高蛋白质品质^[21],还可有效提高种子萌发率和营养价值^[24]。表明 HPEF 处理可提升食品品质。Wiktor 等^[25]研究指出,脉冲电场可以改变冻融产品的质地。Ben Ammar 等^[26-27]研究发现,运用 HPEF 处理方法可提高果蔬的冻干速率和品质。但 HPEF 技术对果蔬冻结过程的影响研究较少。Jalté 等^[28]研究发现,HPEF 预处理缩短了土豆片冷冻时间,但未进行冻结土豆品质和影响机理研究。杜慧慧等^[29]研究指出,HPEF 预处理可减缓马铃薯在冻融过程中的颜色和硬度,但未进行微观机理分析。目前,有关 HPEF 对果蔬冷冻结晶过程、细胞微观结构和营养成分等影响的研究尚未见报道。

研究拟采用 HPEF 预处理方法,以苹果为试验材料,观测苹果冻结过程参数、微观细胞结构和解冻苹果质构参数、汁液流失率、营养成分以及色泽等品质指标的变化,结合冻结理论^[30-31],探究 HPEF 处理方法对冷冻苹果品质的影响及其机理,为果蔬冷冻和解冻工艺参数优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红富士苹果:山西农业大学果树研究所;

葡萄糖:分析纯,天津化学试剂厂;

标准抗坏血酸:分析纯,上海永叶生物科技有限公司;

高压脉冲电场产生器:ECM830 型,美国 BTX 公司;

热电偶仪:UT321 型,上海优利得电子有限公司;

物性分析仪:TA.XT.Plus 型,英国 Stable Micro System 公司;

冻干机:JDG-02 型,兰州科近真空冻干技术有限公司;

电子天平:CP1502 型,奥豪斯上海有限公司;

体视显微镜:LEICAMZ9s 型,德国莱卡公司;

原子吸收分光光度计:AAS8513 型,山东霍尔德电子科技有限公司;

扫描电子显微镜:CJEOL JEM-6490LV 型,日本电子光学实验室;

离子溅射镀膜仪:JEOL JFC-1600 型,日本电子光学实验室;

立式低温冰箱:DW-40L188 型,青岛海尔电冰箱有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 材料制备 新鲜苹果洗净后去皮,取相同部位切成 10 mm $\times$ 17 mm $\times$ 17 mm 的方块,高压脉冲电场处理后于-40 $^{\circ}$ C 冷冻 12 h。解冻条件:5 $^{\circ}$ C 解冻 6 h。

1.2.2 高压脉冲电场参数 高压脉冲电场发生器产生的脉冲波形为单极矩形波,脉冲强度为 5~3 000 V/cm,作用时间为 10~200 μ s,脉冲个数为 1~99 个。试验时将苹果样品放于电极室处理。根据前期研究^[32-34],高压脉冲电场参数选择弱 1 000 V/cm,60 μ s,15 个;中 1 250 V/cm,90 μ s,30 个;强 1 500 V/cm,120 μ s,45 个进行处理。

1.2.3 冻结曲线 测温仪电偶探头插入苹果样品中心,将样品置于-40 $^{\circ}$ C 冰箱后开始监测样品温度变化,当样品温度不再变化,提取样品时间-温度冻结曲线,观察冻结过程不同阶段的时间变化情况。每个处理重复 3 次。

1.2.4 电镜样品制备 采用观察冷冻干燥后样品的微观结构代替冷冻样品的微观结构。将冷冻的样品置于冻干机内进行冻干试验。干燥过程中,升华阶段加热板温度

为 70 ℃,真空度为 40~45 Pa,解析阶段加热板温度为 90 ℃,真空度为 30~35 Pa。冻干后的样品进行切片,用戊二醛(pH 7.2,质量分数 3%)固定样本 24 h。用乙醇(体积分数 30%~100%)梯度脱水,每级 15 min。真空干燥法干燥,叔丁醇(体积分数 100%)置换 2 次。将低温真空干燥器内抽真空升华 2~3 h。离子溅射仪对样品喷金后进行电镜扫描。每个处理重复 2 次。

1.2.5 质构测定 采用质地多面分析法(TPA)获得解冻苹果样品的硬度、咀嚼性、弹性、回复性、凝聚性等参数。测试时使用 P/36 R 圆柱探头,设置测前、中、后速度分别为 1, 5, 5 mm/s,两次压缩中间停顿,停顿时间 5 s,触发值 0.004 9 N。每个处理重复 8 次。

1.2.6 汁液流失率的测定 HPEF 处理后的苹果样品置于一 40 ℃冰箱冷冻 12 h 后取出称取质量,放置于 5 ℃冰箱解冻 6 h 后用滤纸吸去样品表面液汁后再次称取质量,汁液流失率的计算公式如式(1)所示。每个处理重复 3 次。

$$R = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R ——汁液流失,%;

m_1 ——冷冻 12 h 后样品的质量,mg;

m_2 ——解冻后样品质量,mg。

1.2.7 营养成分测量 测量解冻后苹果样品的总糖、钙、铁和维生素 C 含量。总糖含量测定采用斐林试剂法^[35],钙含量测定采用 EDTA 滴定法^[34],铁含量测定采用原子吸收法^[34],维生素 C 含量测定用 2,6-二氯酚靛酚法^[34]。每个处理重复 3 次。

1.2.8 色泽 取解冻后苹果样品直接观察颜色变化,每处理取 3 个样品。

1.3 数据处理

采用 SPSS 27.0 软件进行质构参数、汁液流失率和营养成分分析和显著性分析,字母不同表示差异显著($P < 0.05$);采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 苹果的冻结曲线

图 1 为其中一次苹果样品的冻结曲线。冻结过程中,苹果样品温度先快速下降后保持不变,之后又降至冰箱内温度,所有样品经 1 h 后完成冻结。各冻结曲线中温度保持不变的部分时间长度明显不同。在冻结理论中,将冻结过程温度保持不变的阶段称为最大冰晶生成区。

图 2 为苹果样品冻结时通过最大冰晶生成区的时间,与未处理样品相比,经 HPEF 处理后苹果样品的最大冰晶生成区的时间显著缩短,1 250 V/cm, 90 μ s, 30 个的 HPEF 处理时间最短,1 000 V/cm, 60 μ s, 15 个和 1 500 V/cm,

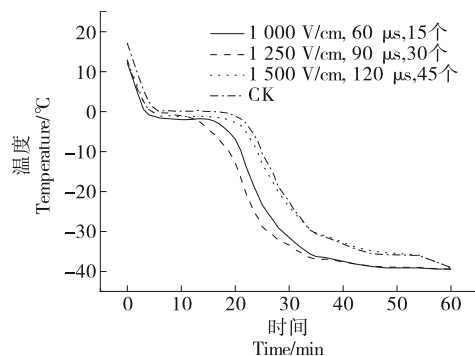


图 1 苹果冻结曲线

Figure 1 Freezing curves of apples

120 μ s, 45 个的 HPEF 处理时间无显著差异。Wiktor 等^[25]研究发现,脉冲电场处理可以使苹果冷冻的相变过程缩短 33%。HPEF 处理可以改变苹果冻结过程通过最大冰晶生成区的时间。按照冻结理论^[30-31],在冻结过程中,通过最大冰晶生成区时间越短,在果蔬内形成的冰晶尺寸越小,冰晶分布变得更均匀,对果蔬微观组织细胞结构的损伤将大大降低,可以保持果蔬的品质不被破坏。

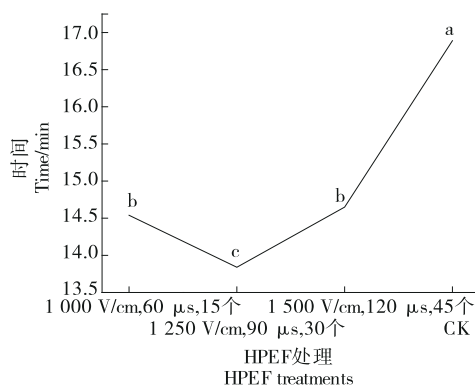


图 2 最大冰晶生成区时间

Figure 2 Time of maximum ice crystal formation zone

2.2 苹果微观结构

图 3 为不同处理冻干苹果样品的电镜图^[33]。冻干样品冰晶升华后在细胞结构中形成孔隙空间。孔隙空间可反映出冻结时细胞内冰晶的分布和大小。相较于未处理样品,1 000 V/cm, 60 μ s, 15 个的细胞结构中无明显大的孔隙,1 250 V/cm, 90 μ s, 30 个的细胞结构中孔隙空间稍有增大,但不显著,1 500 V/cm, 120 μ s, 45 个的细胞结构中孔隙空间明显增大。结晶理论^[30-31]指出,溶液冻结时,由于水和离子冻结温度不同,水先形成冰晶,溶液浓度增大到饱和溶液时,离子析出。HPEF 处理可以改变溶液结晶行为^[31,33],减弱了水分子聚集状态,且离子获得了能量;冷冻结时,一方面由于水分子聚集度降低抑制了水

分子的定向排列形成冰晶,另一方面由于水分子获得了较高的能量,可以挣脱晶体生长的界面的束缚而重新回到液相状态,最终改变冰晶的组成结构和晶粒大小。HPEF处理溶液后,由于水分子团簇结构的破坏和离子吸收能量,冻结后的冰晶不再是以纯水冰晶的晶体结构,离子不再是被直接析出,而是形成水分子与溶液离子在一起的含盐冰晶体结构^[31,36-37]。苹果内部成分比溶液复杂,不同的HPEF强度处理后苹果内部冻结形成的冰晶结构和晶粒大小不同,按结晶理论,1 000 V/cm,60 μ s,15个的HPEF处理后苹果样品冻结过程形成的晶粒较小,苹果细胞结构相对更完整,冻结对细胞结构的破坏性减小,1 500 V/cm,120 μ s,45个的HPEF处理后苹果样品冻结过程形成的晶粒显著变大,冻结对苹果细胞结构的破坏性较大,表明适当的HPEF处理可以减缓冻结过程冰晶对苹果细胞微观结构造成的损伤。

2.3 苹果解冻后的质构

由图4可知,与未处理样品相比,HPEF处理样品的凝聚性、回复性均显著升高,黏着性、弹性和咀嚼性无显著性差异;1 250 V/cm,90 μ s,30个处理的硬度显著提高,而1 000 V/cm,60 μ s,15个和1 500 V/cm,120 μ s,45个处理

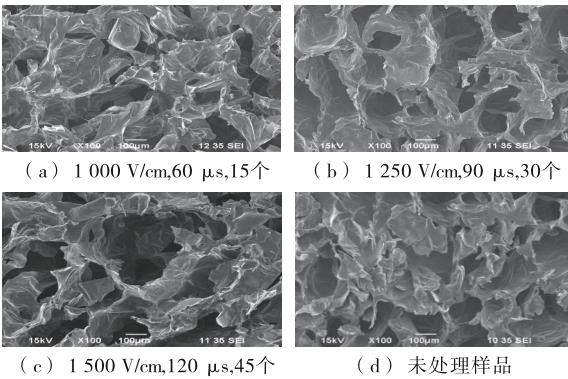


图3 不同处理冻干苹果电镜图
Figure 3 SEM of freeze-dried apples treat in different methods

的硬度无显著性差异。综合所有参数,1 250 V/cm,90 μ s,30个的HPEF处理后苹果样品的硬度、凝聚性、回复性均显著提高。有研究指出,果蔬样品的硬度值与其细胞结构和细胞壁的完整性紧密相关^[38],冻结过程对细胞微观结构的坍塌和形态的变化最终体现为解冻后硬度的变化,凝聚性也反映了细胞之间的结合力大小,使样品维持完整的性质^[39]。回复性反映了样品在受到压缩时迅速恢

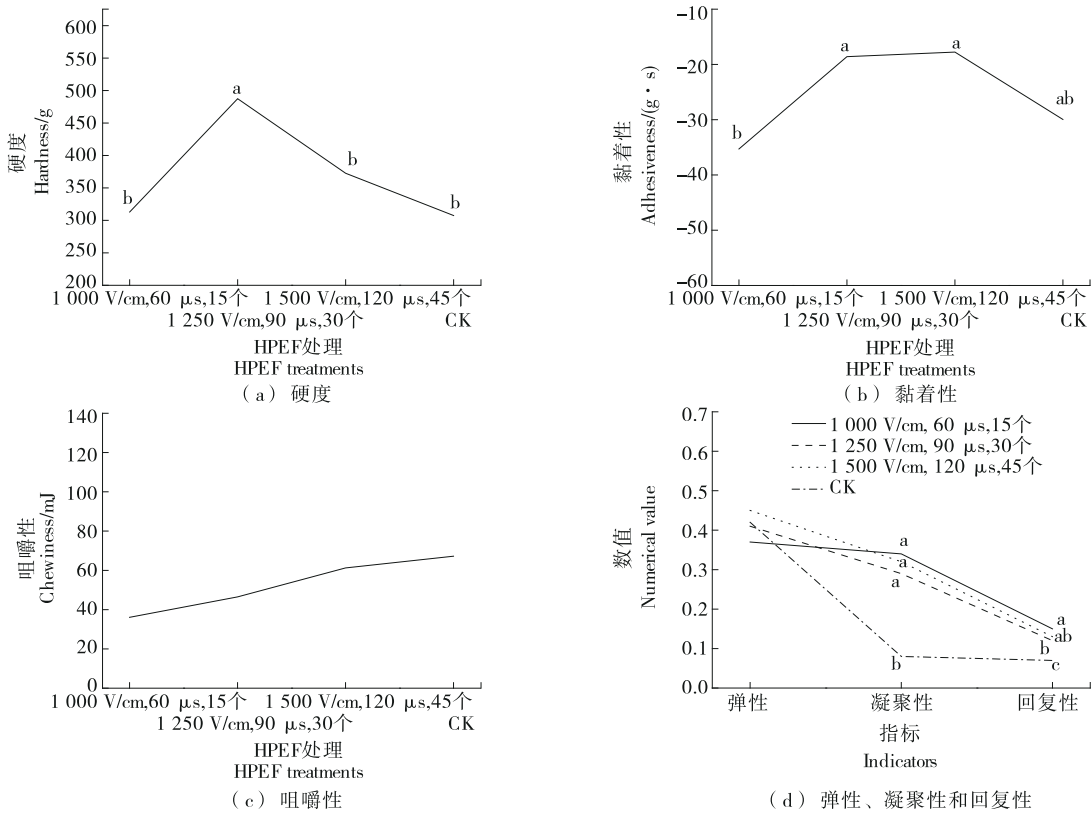


图4 苹果TPA参数的影响
Figure 4 Effect on apple TPA parameters

复变形的能力,如果组织破坏严重,回复性趋于0。HPEF处理后苹果样品回复性显著提高。1 000 V/cm, 60 μ s, 15个和1 250 V/cm, 90 μ s, 30个的HPEF处理冻结苹果样品细胞结构相对完整,1 000 V/cm, 60 μ s, 15个处理样品的凝聚性、回复性提高,1 250 V/cm, 90 μ s, 30个处理显著提高了解冻后苹果样品的硬度、凝聚性和回复性。

2.4 汁液流失率

由图5可知,相比未处理样品,1 500 V/cm, 120 μ s, 45个处理后汁液流失率显著升高,1 000 V/cm, 60 μ s, 15个和1 250 V/cm, 90 μ s, 30个处理后汁液流失率显著减小。冷冻食品解冻后流出液体,一部分原因与细胞、组织受到损伤有关。冻结过程苹果样品细胞结构越完整,解冻后的汁液就不易透过细胞膜流失,汁液流失率越小。由于1 000 V/cm, 60 μ s, 15个的HPEF处理冻结苹果样品相比未处理样品细胞结构完整,因此解冻后的汁液流失率减小。1 250 V/cm, 90 μ s, 30个的HPEF处理冻结苹果样品与未处理苹果样品细胞结构无显著变化,但1 250 V/cm, 90 μ s, 30个的HPEF处理后苹果样品的硬度、凝聚性和回复性均显著提高,硬度值与其细胞结构和细胞壁的完整性紧密相关^[38],说明1 250 V/cm, 90 μ s, 30个的HPEF处理冻结苹果样品比未处理样品细胞结构更完整,细胞功能更完整,因此解冻后的汁液流失率减小。1 500 V/cm, 120 μ s, 45个的HPEF处理冻结苹果样品细胞结构相比未HPEF处理的细胞结构破坏严重,解冻后的汁液就容易透过被破坏的细胞膜向外流失,汁液流失率显著增大。苹果成分复杂,汁液流失率还与冻结前处理、样品新鲜度、冷冻时间等因素有关,具体机理需进一步研究。

2.5 营养成分

由表1可知,与未处理样品相比,HPEF处理后苹果样品的铁含量无显著变化。1 000 V/cm, 60 μ s, 15个和1 250 V/cm, 90 μ s, 30个处理后苹果的含糖和含钙量显著提高,铁、V_C含量无显著变化;1 500 V/cm, 120 μ s, 45个处理后苹果样品的V_C含量显著减少,其他元素无显著变化。果蔬中总糖、维生素、矿物质等含量可反映果蔬的营养品质。汁液中包含营养成分,因此营养成分含量与汁液流

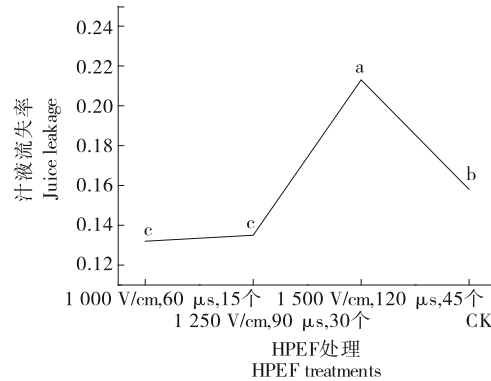


图5 苹果汁液流失率

Figure 5 Apple drip loss rates

失率有关,汁液流失率越大,汁液越多,损失的营养成分就越多。1 000 V/cm, 60 μ s, 15个和1 250 V/cm, 90 μ s, 30个的HPEF处理苹果样品细胞结构损伤小,汁液流失率低,所以苹果样品的含糖和含钙量显著提高。

2.6 色泽

由图6可知,1 500 V/cm, 120 μ s, 45个处理的苹果样品明显褐变且体积减小;未处理样品有轻微的褐变;1 000 V/cm, 60 μ s, 15个处理的样品为正常苹果,色泽鲜亮;1 250 V/cm, 90 μ s, 30个处理的样品边缘稍有褐变。苹果褐变与抗氧化物质有关,也与微观组织结构有关。1 500 V/cm, 120 μ s, 45个HPEF处理的苹果样品冷冻后微观组织细胞结构被破坏,汁液流失严重,抗氧化物质随汁液流出减少,抗氧化能力降低,所以褐变严重;相反,1 000 V/cm, 60 μ s, 15个HPEF处理的苹果样品冷冻后微观组织细胞结构相对完整,汁液流失减少,所以苹果色泽鲜亮。

3 结论

经1 000 V/cm, 60 μ s, 15个和1 250 V/cm, 90 μ s, 30个高压脉冲电场处理后,冻结苹果品质有所提升。综合各指标,1 000 V/cm, 60 μ s, 15个高压脉冲电场处理的效果更佳。1 000 V/cm, 60 μ s, 15个高压脉冲电场处理缩短了苹果样品冻结时经过最大冰晶生成区的时间,冻结形成的冰晶较小,降低了大块冰晶对苹果微观细胞结构造成

表1 不同高压脉冲电场处理后苹果的营养成分

Table 1 Nutrient components of apples treat with different HPEFs

组别	糖/%	钙/%	铁/(mg·kg ⁻¹)	V _C /(10 ⁻² mg·kg ⁻¹)
1 000 V/cm, 60 μ s, 15个	9.027±0.083 ^a	0.048±0.002 ^a	12.291±0.271	3.117±0.111 ^a
1 250 V/cm, 90 μ s, 30个	8.712±0.161 ^{ab}	0.046±0.004 ^a	11.926±0.829	2.957±0.072 ^a
1 500 V/cm, 120 μ s, 45个	8.445±0.120 ^b	0.040±0.005 ^b	10.928±0.959	2.764±0.124 ^b
未处理	8.417±0.226 ^b	0.039±0.001 ^b	11.734±0.264	2.997±0.015 ^a

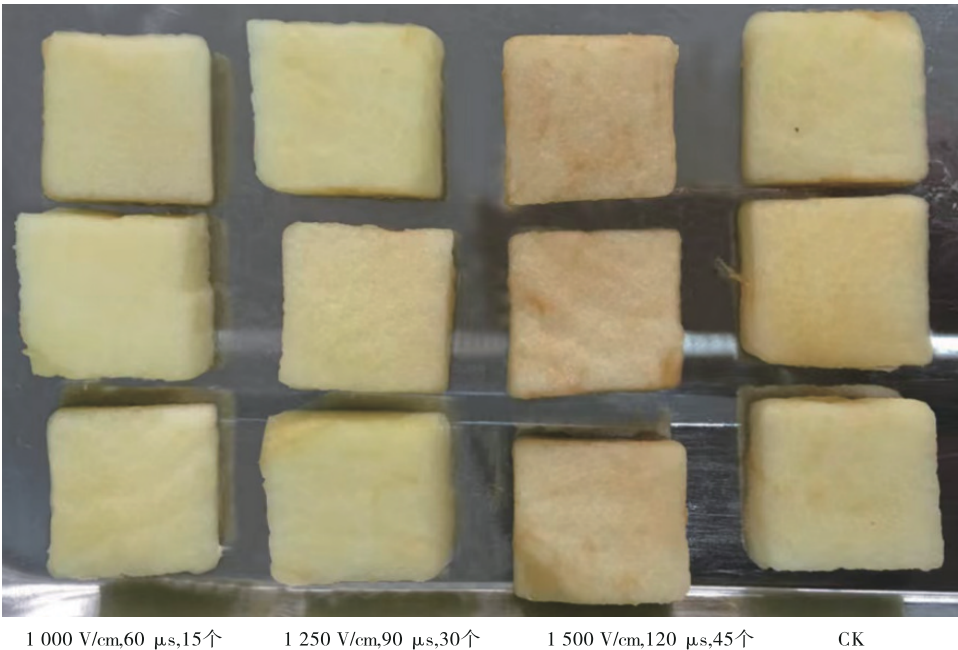


图 6 苹果色泽

Figure 6 Color of apples

的损伤,因此,解冻后苹果样品的凝聚性、回复性相应提高,汁液流失率显著减小,苹果的含糖和含钙量显著提高,抗氧化性增强,色泽鲜亮,大大提高了冷冻苹果的整体品质。高压脉冲电场预处理可以作为一种辅助方法应用于果蔬的冷冻加工中来提高冷冻果蔬的品质。由于果蔬成分复杂,影响其冻结品质因素较多,具体机理仍需进一步深入研究。

参考文献

[1] 李旋,毕金峰,刘璇,等. 苹果多酚的组成和功能特性研究现状与展望[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 328-340.
 LI X, BI J F, LIU X, et al. Research status and prospect on the composition and functional characteristics of apple polyphenols [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 328-340.

[2] 卢素文,郑喧昂,王佳洋,等. 葡萄类黄酮代谢研究进展[J]. 园艺学报, 2021, 48(12): 2 506-2 524.
 LU S W, ZHENG X A, WANG J Y, et al. Research progress on the metabolism of flavonoids in grape[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(12): 2 506-2 524.

[3] 遇艳萍,罗华丽,刘鹏莉,等. 真空冷冻干燥苹果复合果蔬块的工艺研究[J]. 中国果菜, 2023, 43(4): 7-12.
 YU Y P, LUO H L, LIU P L, et al. Research on the process of producing apple chunks compounded with other fruits and vegetables by vacuum freeze-drying technology[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(4): 7-12.

[4] 曲梦锐,刘雨辰,王东营. 壳聚糖—黄精精油复合涂膜对苹果

果实的保鲜功效[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 115-120.
 QU M R, LIU Y C, WANG D Y. Preservation performance of chitosan-*Polygonatum* essential oil composite coating film on apple fruits[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 115-120.

[5] 陈海霞,贾志娟,赵云平. 基于多信息融合和DA-DBN的苹果等级判别[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 138-145.
 CHEN H X, JIA Z J, ZHAO Y P. Apple classification based on multi-information fusion and DA-DBN[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 138-145.

[6] 田津津,徐双喜,张哲,等. 冷冻速度对苹果贮期品质的影响[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2023, 36(1): 60-64.
 TIAN J J, XU S X, ZHANG Z, et al. Effects of freezing rate on quality of apples during storage[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2023, 36(1): 60-64.

[7] 岳丹华,谢媛媛,朱雅情,等. 预处理工艺条件对冻干白萝卜脆片品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(19): 115-123.
 YUE D H, XIE Y Y, ZHU Y Q, et al. Effects of pretreatment conditions on the quality of vacuum freeze-dried white radish crisps[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(19): 115-123.

[8] 郭家刚,杨松,童光祥,等. 低压静电场辅助冷冻对竹笋品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 82-88.
 GUO J G, YANG S, TONG G X, et al. Effect of low voltage electrostatic field-assisted freezing on the quality of bamboo shoots[J]. Food Science, 2022, 43(23): 82-88.

[9] WAGHMARE R, KUMAR M, YADAV R, et al. Application of ultrasonication as pre-treatment for freeze drying: an innovative

- approach for the retention of nutraceutical quality in foods[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134571.
- [10] XU X, ZHANG L, FENG Y B, et al. Ultrasound freeze-thawing style pretreatment to improve the efficiency of the vacuum freeze-drying of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and the quality characteristics of the dried product[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105300.
- [11] CHHABRA N, ARORA M, GARG D, et al. Spray freeze drying-a synergistic drying technology and its applications in the food industry to preserve bioactive compounds[J]. Food Control, 2024, 155: 110099.
- [12] 于宛加, 金鑫, 胡丽娜, 等. 预干燥过程水分分布对热风—真空冷冻干燥桃脆片微观结构与质构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 69-79.
- YU W J, JIN X, HU L N, et al. Effect of water distribution during pre-drying on the microstructure and texture properties of peach crisps produced by hot air-vacuum freeze drying[J]. Food Science, 2023, 44(15): 69-79.
- [13] ZHANG L H, LIAO L, QIAO Y, et al. Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying[J]. Food Chemistry, 2020, 303: 125386.
- [14] 汤梦情, 陈宏伟, 朱蕴兰, 等. 微波真空与真空冷冻组合干燥对芦笋营养与品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(5): 76-81.
- TANG M Q, CHEN H W, ZHU Y L, et al. Effects of microwave vacuum and vacuum freeze drying on nutrition and quality of *Asparagus officinalis*[J]. Food Research and Development, 2019, 40(5): 76-81.
- [15] KHAMPAKOOL A, SOISUNGWAN S, PARK S H. Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: drying kinetics, energy consumption, and texture[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 355-363.
- [16] 邹迪, 范力艺, 武丽达, 等. 脉冲电场在食品保鲜中的应用综述[J]. 现代食品, 2024, 30(6): 74-76.
- ZOU D, FAN L Y, WU L D, et al. A review of the application of pulsed electric field in food preservation[J]. Modern Food, 2024, 30(6): 74-76.
- [17] TOBAJAS A P, AGULLÓ-GARCÍA A, CUBERO J L, et al. Effect of high pressure and pulsed electric field on denaturation and allergenicity of Prp3 protein from peach[J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126745.
- [18] 杨华连, 陈莉, 卢红梅. 超高压与脉冲电场技术在桑葚汁贮藏保鲜中的研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(9): 311-315.
- YANG H L, CHEN L, LU H M. Research progress of ultra-high pressure and pulsed electric field technology in storage and preservation of mulberry juice[J]. The Food Industry, 2019, 40(9): 311-315.
- [19] 金瑾, 秦令祥, 隋志方, 等. 响应面法优化高压脉冲电场协同双酶法提取乳木果油工艺及其品质分析[J]. 中国油脂, 2025, 50(7): 8-12, 33.
- JIN J, QIN L X, SUI Z F, et al. Optimization of high voltage pulse electric field assisted dual enzyme method extraction of shea butter by response surface methodology and its quality analysis[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(7): 8-12, 33.
- [20] 李霜, 李诚, 陈安均, 等. 高压脉冲电场对调理牛肉杀菌效果的研究[J]. 核农学报, 2019, 33(4): 722-731.
- LI S, LI C, CHEN A J, et al. Sterilizing effect of high-voltage pulsed electric fields on prepared beef[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(4): 722-731.
- [21] 杨晨宇, 王肖园, 邓云, 等. 高压脉冲电场处理对中国对虾抗氧化活性和蛋白质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(1): 199-207.
- YANG C Y, WANG X Y, DENG Y, et al. Effects of high intensity pulsed electric field treatment on antioxidant activity and protein properties of *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 199-207.
- [22] 刘品品, 周家华, 张超, 等. 脉冲电场辅助低温解冻对猪肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 343-348.
- LIU P P, ZHOU J H, ZHANG C, et al. Effect of pulsed electric field assisted low temperature thawing on pork quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 343-348.
- [23] WIKTOR A, LANDFELD A, MATYS A, et al. Selected quality parameters of air-dried apples pretreated by high pressure, ultrasounds and pulsed electric field-a comparison study[J]. Foods, 2021, 10(8): 1943.
- [24] 王欣卉, 宋雪健, 张东杰, 等. 发芽对杂粮营养品质及功能性改善的研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 45-52.
- WANG X H, SONG X J, ZHANG D J, et al. Research advances on improvements in nutritional quality and functional properties of multigrains by germination[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 45-52.
- [25] WIKTOR A, SCHULZ M, VOIGT E, et al. The effect of pulsed electric field treatment on immersion freezing, thawing and selected properties of apple tissue[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 146: 8-16.
- [26] BEN AMMAR J, LANOISELLÉ J L, LÉBOVKA N I, et al. Effect of a pulsed electric field and osmotic treatment on freezing of potato tissue[J]. Food Biophysics, 2010, 5(3): 247-254.
- [27] 刘振宇, 郭玉明, 崔清亮. 高压矩形脉冲电场对果蔬干燥速率的影响[J]. 农机化研究, 2010, 32(5): 146-151.
- LIU Z Y, GUO Y M, CUI Q L. The effect of rectangular high-pulsed electric field on drying rate of fruits and vegetables[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5): 146-151.

- [28] JALTÉ M, LANOISELLÉ J L, LÉBOVKA N I, et al. Freezing of potato tissue pre-treated by pulsed electric fields[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2009, 42(2): 576-580.
- [29] 杜慧慧, 李可兴, 刘采云, 等. 预处理及解冻方法对马铃薯冻融品质的影响[J]. *包装工程*, 2023, 44(17): 41-49.
- DU H H, LI K X, LIU C Y, et al. Effect of pretreatment and thawing method on freezing and thawing quality of potato[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(17): 41-49.
- [30] PETZOLD G, AGUILERA J M. Ice morphology: fundamentals and technological applications in foods[J]. *Food Biophysics*, 2009, 4(4): 378-396.
- [31] 马亚红, 钟力生, 胡慧玉, 等. 交变电场作用下离子碰撞对 NaCl 溶液冰晶结构的影响[J]. *低温工程*, 2012(6): 14-17.
- MA Y H, ZHONG L S, HU H Y, et al. Effects of ion collision on ice structure of NaCl solution under alternating electric field [J]. *Cryogenics*, 2012(6): 14-17.
- [32] 吴亚丽. 高压脉冲电场对苹果崩塌温度的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(8): 138-140, 147.
- WU Y L. Study on the effect of pulsed electric field pretreatment on collapse temperature of apple tissue[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(8): 138-140, 147.
- [33] 段智英. 高压脉冲电场预处理对果蔬冻结工艺与冻干速率的作用机理研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2017: 45-58.
- DUAN Z Y. Study the influential mechanism of HPEF on freezing and vacuum freeze-drying process of fruits and vegetables[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2017: 45-58.
- [34] 王冉. 高压脉冲电场预处理对果蔬品质的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2013: 10-19.
- WANG R. Effect of high pulsed electric field on quality of fruits and vegetables[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2013: 10-19.
- [35] 吴德光, 胡智慧, 刘广新, 等. 甘蔗糖蜜料酒制备工艺优化及品质分析[J]. *食品与机械*, 2021, 37(12): 155-160.
- WU D G, HU Z H, LIU G X, et al. Preparation technology optimization and quality analysis of sugarcane molasses cooking wine[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(12): 155-160.
- [36] SUN W, XU X B, ZHANG H, et al. Effects of dipole polarization of water molecules on ice formation under an electrostatic field[J]. *Cryobiology*, 2008, 56(1): 93-99.
- [37] MA Y H, ZHONG L S, ZHANG H, et al. Effect of applied electric field on the formation and structure of ice in biomaterials during freezing[C]// 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Potsdam, Germany: IEEE, 2010: 1-4.
- [38] TORREGGIANI D, BERTOLO G. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(2/3): 247-253.
- [39] 任朝晖, 张昆明, 李志文, 等. 质地多面分析(TPA)法评价葡萄贮藏期间果肉质参数参数的研究[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(7): 375-378.
- REN Z H, ZHANG K M, LI Z W, et al. Study on the evaluation of texture parameters of grape berry during storage by using texture profile analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(7): 375-378.