

不同强度DENBA+电场辅助处理冻结草莓后对其解冻品质影响的比较

张鑫华¹, 殷睿¹, 郝义², 李斌¹, 于居盟³, 杨娜¹, 姜晗¹, 孙希云^{1*}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866) (2. 辽宁省果树科学研究所, 辽宁营口 115009)

(3. 辽宁营口东盛实业有限公司, 辽宁营口 115000)

摘要: DENBA+ 技术可利用高压静电, 通过共振食品细胞中的水分子使其更为活性化, 达到保持营养成分完整、延迟氧化、实现食材保鲜的目的, 可与食品速冻保鲜配合使用。为系统地考察外加 DENBA+ 静电场对冻藏草莓超声解冻后品质的影响, 该实验以丹东九九草莓作为研究对象, 通过对比分析感官评价、色差、硬度、汁液流失率、可溶性固形物、总糖、总酚等 7 项指标, 探究草莓在外加不同强度 DENBA+ 静电场条件下冻结对其解冻品质的影响。实验结果表明, 经外加高低电场辅助草莓冻结解冻品质均优于空白对照组, 且与 2 000 V 高强度 DENBA+ 电场辅助冻结相比, 经外加 500 V 低强度 DENBA+ 电场辅助冻结后, 感官评价综合分数最高, 色差下降 1.70%, 硬度提高 22.45%, 汁液流失率下降 27.72%; 可溶性固形物含量提高 8.16%、总糖含量提高 4.79%、总酚含量提高 9.90%, 上述各项指标低电场辅助处理较高电场辅助处理效果更优且差异显著 ($P<0.05$), 其解冻特性呈现相对较好的状态, 综合分析得出 500 V 的低电场辅助冻藏草莓的品质较优。

关键词: DENBA+ 静电场; 草莓; 冻藏; 超声解冻; 品质

文章编号: 1673-9078(2024)02-160-167

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.2.0252

Comparison on the Effects of DENBA at Different Intensities+Electric Field-assisted Treatment on the Thawing Quality of Frozen Strawberries

ZHANG Xinhua¹, YIN Rui¹, HAO Yi², LI Bin¹, YU Jumeng³, YANG Na¹, JIANG Han¹, SUN Xiyun^{1*}

(1.College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)(2.Liaoning Institute of Pomology, Yingkou 115009, China)(3.Liaoning Tunc Sheng Technology corporation, Yingkou 115000, China)

Abstract: DENBA+ technology can use high-voltage static electricity to resonate the water molecules in food cells to make them more active, so as to maintain complete nutrients, delay oxidation, and preserve the freshness of ingredients (which can be used in combination with food quick-freezing preservation). In order to systematically investigate the effects of DENBA+ electrostatic field on the quality of frozen strawberries after ultrasonic thawing, in this experiment, Dandong

引文格式:

张鑫华,殷睿,郝义,等.不同强度DENBA+电场辅助处理冻结草莓后对其解冻品质影响的比较[J].现代食品科技, 2024,40(2):160-167.

ZHANG Xinhua, YIN Rui, HAO Yi, et al. Comparison on the effects of DENBA at different intensities+electric field-assisted treatment on the thawing quality of frozen strawberries [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(2): 160-167.

收稿日期: 2023-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2100803); 辽宁省农业攻关及产业化项目(2020JH2/10200036); 辽宁省教育厅重点攻关项目(LJKZZ20220089); 大学生创新创业训练计划项目—创新训练项目(202210157029)

作者简介: 张鑫华(2000-), 男, 本科, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: 3514078713@qq.com

通讯作者: 孙希云(1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 健康食品营养与制造, E-mail: sun_xiyun@163.com

Jiujiu strawberries was taken as the research object. The effect of freezing on the thawing quality of strawberries under the conditions involving different intensities of DENBA+ electrostatic field through comparing and analyzing seven indicators, including sensory score, color difference, hardness, juice loss rate, soluble solids, total sugars, and total phenolics. The experimental results showed that the freezing and thawing quality of strawberries assisted by high and low electric field were better than those of the blank control group. Compared with 2 000 V high-intensity DENBA+electric field-assisted freezing, the fruits after 500 V low-intensity DENBA+electric field-assisted freezing had the highest comprehensive score of sensory evaluation, while the color difference decreased by 1.70%, the hardness increased by 22.45%, the juice loss rate decreased by 27.72%, with the soluble solids content, total sugar content and total phenolic content increasing by 8.16%, 4.79% and 9.90%, respectively. There were significant difference in the above indicators between the low-intensity electric field-assisted approach and the high-intensity electric field-assisted approach, with the former being better ($P<0.05$) and leading to better thawing characteristics. Comprehensive analysis showed that the quality of 500 V low electric field-assisted frozen strawberries was better.

Key words: DENBA+ electrostatic field; strawberry; frozen storage; ultrasonic thawing; quality

草莓作为传统“三莓”之一，凭借其鲜美红嫩的外观与酸甜可口的滋味倍受喜爱。因其外观、口感、香味与营养等优势，素有“水果皇后”的美誉。由于草莓具有外皮较薄难以保护果肉、收获期短、采摘后呼吸强度较大等特点，在运输与贮藏中易受到机械损伤、病原微生物侵染。因此，草莓采后需采取适当的保鲜、冻藏以保持其品质以备后续加工利用，以延长草莓产业链。

冷冻作为传统的物理保藏手段，应用广泛。近年来，人们发现速冻处理可以形成更为细小的冰晶，对细胞组织损伤小，能最大程度保留食品原有的品质、口感和营养^[1]。现阶段除冷库冻藏外，草莓速冻处理主要以利用冷冻介质直接接触实现。液氮喷淋在其中实现效果最好，但存在消耗较大、易导致食品龟裂、需要特定设备且成本较高等缺陷，对食品的外观与营养成分影响较大^[2]。因冻藏技术存在上述缺陷，目前需要一种新的冷冻方式或辅助处理方法代替传统单一的冻结方式。

外加静电场是一种可用于辅助保藏的物理处理方式，相较于其他辅助技术，其特点在于无化学和辐照残留^[3]。在过去的研究中，人们对鲜切甘蓝、玉米、鲜切西兰花及柿子等经高压静电场处理后冷藏特性进行测定，发现其具有延长货架期并延缓色泽劣变与硬度下降等功效^[3-5]。通过对高压静电场处理辅助白蘑菇冻结过程进行研究，发现其具有利于降低冰晶粒度并抑制冰晶数量的快速增加的作用^[6]，与果蔬的速冻处理具有良好的协同性，近年来广受关注。随着电场辅助贮藏方式研究不断深入，静电场辅助食品冷冻保存已受到广泛研究，近年来其可行性进一步得到验证，且该方法具有价格低廉、适

用性强、易于实现等特点，同时可对食品起到降低质构损失的作用^[7,8]。王伟强等^[9]发现，DENBA+静电波保鲜技术可利用高压静电，通过共振食品细胞中的水分子使其更为活性化，达到保持营养成分完整、延迟氧化、实现食材保鲜熟成的目的，可与食品速冻保鲜配合使用。然而，目前将DENBA+技术辅助草莓等果蔬冻藏保鲜的研究目前较少。

不同的解冻方式对果实的品质也会造成影响。超声解冻作为新兴技术，实验表明对处理后的红萝卜能产生较好的颜色与营养结构保留，有着较好的解冻效果^[10]。刘雪梅等^[11]实验结果表明，就物理特性而言，微波解冻与超声解冻的效果对比室温解冻和流水解冻较优，花色苷等营养指标的对比中超声解冻也优于其他三种，故在前人研究的基础上，本次实验采取超声解冻的方式。

为了使草莓在解冻后能够保持更好的品质，本实验将DENBA+静电场应用到草莓冻结过程中，并采用超声波进行解冻，通过比较高低强度对草莓解冻品质的影响，以寻求一个最佳的电场处理条件，以期为进一步提升草莓的解冻品质提供一个有力措施。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

草莓 (*Fragaria ananassa* Duch)，品种为丹东九九，采自辽宁省丹东市，将其放置于泡沫箱内常温运输至实验室。

体积分数98%的浓硫酸、体积分数98%的浓盐酸、氢氧化钠、体积分数98%的乙醇溶液、葡萄糖、体积分数2%的草酸、蒽酮、福林-酚、没食子酸、碳酸钠，国药集团化学试剂有限公司，实验试剂均

为分析纯。

1.2 仪器与设备

DENBA 电板, 辽宁省果蔬科学研究所磁场冷库; JZC-3TSC 型电子天平, 福州科迪电子有限公司产品; SK5200LH 超声波解冻仪, 上海科导超声仪器有限公司; TP-01 热电偶, 苏州泰世电子有限公司; TA-XT21 型物性分析仪, 牡丹江市机械研究所; WB-20001XA 全自动测色色差仪, 北京新恒能分析仪器有限公司; PAL-1 型数显糖度仪, 日本 ATAGO 公司; UV-1600 型紫外可见分光光度计, 上海美普达仪器有限公司; HH-6 型恒温水浴锅, 邢台德延科技有限公司; GL-20G-H 型冷冻离心机, 上海安亨科学仪器厂。

1.3 实验方法

1.3.1 草莓原料预处理

挑选大小均匀, 无病虫害与机械损伤, 七、八成成熟的草莓果实作为实验材料分成若干份, 分别测定初始性状。实验中共计使用 270 个草莓果实 [处理 (3) × 重复 (3) × 重复包含果实数 (30)]。实验过程中分别将草莓平行放置于输出电压为 2 000 V 高电场与 500 V 低电场条件下冻结, 对照组置于恒温恒湿箱中做相同冻结处理。冻结时温度为 -18~-20 ℃, 冷冻 1 h 后取出, 随机抽取草莓果实解冻进行指标测定。

1.3.2 草莓原料解冻处理

参照刘雪梅等^[11]方法并稍作修改。

将样品装入自封袋置于超声波解冻仪中, 频率控制为 800 kHz, 水温设置 18 ℃。利用热电偶跟踪样品中心温度至 4 ℃作为解冻终点停止解冻进行试验。除测定样本外, 剩余解冻后样本置于 4 ℃冰箱中冷藏, 以备进行营养指标的跟踪测定。

1.3.3 指标测定

1.3.3.1 感官评价

邀请 10 名试吃员, 通过品尝对处理后的草莓的色泽、香气、质地、滋味进行鉴评, 每项以 100 分为满分进行评定, 并记录成绩, 最终结果去掉各项标准的最高分和最低分, 计算出平均值, 具体评价标准见表 1。

1.3.3.2 硬度测定

参照李丽^[12]的方法并稍做修改。

取解冻后的样本分别利用 TA-XT2 型物性分

析仪在 strain 测试模式进行硬度整果测定, 以最大峰值力 (Fmax) 作为草莓硬度的指标。测定参数: 预压速度 3.0 mm/s, 测试速度 1.0 mm/s, 压后上行速度 5.0 mm/s, 触发力 10 g, 压缩变形程度 25%。

表 1 经处理后草莓果实感官评分标准

Table 1 Sensory scoring criteria for strawberry fruit after treatment

评价指标	评价标准	分数/分
色泽	颜色呈明亮的鲜红色, 最接近新鲜草莓应有的色泽	85~100
	颜色较鲜艳, 较为接近新鲜草莓应有的色泽	70~84
	果实呈红褐色, 不能体现新鲜草莓应有的色泽	<70
香气	具有浓郁的草莓香气	85~100
	具有略淡的草莓香气	70~84
	基本失去草莓香气或有异味	<70
质地	软硬适中, 咀嚼性好, 口感细腻	85~100
	质地略软, 咀嚼性差, 口感粗糙	70~84
	质地软烂, 难以咀嚼, 口感差	<70
滋味	具有草莓特有的酸甜口感	85~100
	具有一定的酸甜口感但味道转淡	70~84
	酸甜味道不明显或有异味口感	<70

1.3.3.3 色差测定

参照张延琦等^[13]等方法并稍作修改。

采用全自动测色色差仪对解冻样品进行色泽指标 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值的测定并计算总色差 ΔE 。其中 L^* 表示亮度, 在 0~100 范围内, L^* 越大代表亮度越高; a^* 值表征草莓色泽红、绿属性, a^* 值为正则颜色偏红, 为负则颜色偏绿; b^* 值是表征草莓色泽黄、蓝属性, b^* 值为正则颜色偏黄, 为负则颜色偏蓝。色差 (ΔE) 按如下公式计算。

测定时每组试验取 3 个果实, 通过对草莓赤道部位测定、根据公式计算色差、每组设置 3 次平行实验取平均值。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (1)$$

式中:

L_0^* ——为新鲜样品的亮度;

L^* ——为处理后样品的亮度;

a_0^* ——为新鲜样品的红度;

a^* ——为处理后样品的红度;

b_0^* ——为新鲜样品的黄度;

b^* ——为处理后样品的黄度。

1.3.3.4 汁液流失率测定

汁液流失率 w 测定采用称重法。

$$w = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

m_0 ——为样品原质量, g;

m_1 ——为解冻后质量, g。

1.3.3.5 可溶性固形物测定

参考田雪婷等^[14]方法, 将草莓去果柄并切块榨汁, 取出汁液用滤纸过滤, 直接用以校准 PAL-1 型数显糖度仪测定, 重复读数三次。选取每次相差不超过 0.000 2 的数据, 最终取平均值作为结果。

1.3.3.6 总糖测定

总糖的测定采用蒽酮比色法, 参考冯文婕等^[15]方法, 结果以 mg/g FW 表示。

1.3.3.7 总酚测定

总酚测定采取福林酚法, 参照牛丽影等^[16]方法, 结果以 mg/g FW 表示。

1.4 数据分析

实验组、对照组所有数据均重复测定 3 次, 结果采用 3 次平行试验的平均值 \pm 标准差表示, 利用单因素方差分析确定显著性。本文采用 Excel 2016 软件进行统计分析计算与标准曲线绘制, 采用 Origin 2021 软件进行图表绘制与对比, 利用 SPSS 软件进行单因素方差分析数据显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓感官评价的影响

由表 2 可见, 经外加电场辅助冻结草莓解冻后果实色泽、香气、质地、滋味均较对照组差异显著 ($P < 0.05$)。对照组处理的草莓果实解冻后感官品质最差。相较而言, 低电场辅助冻结草莓解冻后的果实色泽明亮, 口感细腻, 风味良好, 同新鲜草莓最为接近, 其色泽、香气、质地、滋味以及综合评分均最高, 说明低电场辅助冻结草莓解冻后感官品质最优。

表 2 解冻草莓果实色泽、香气、质地、滋味以及综合评分 (分)

Table 2 Color, aroma, texture, taste and comprehensive score of defrosted strawberry fruit

项目	色泽	香气	质地	滋味	综合评分
低电场	85.80 \pm 0.84 ^a	87.80 \pm 1.48 ^a	84.00 \pm 2.00 ^a	82.40 \pm 2.51 ^a	84.80 ^a
高电场	80.60 \pm 1.14 ^b	83.40 \pm 1.67 ^b	79.00 \pm 1.00 ^b	78.40 \pm 2.07 ^b	80.35 ^b
对照组	74.00 \pm 1.22 ^c	80.00 \pm 0.71 ^c	71.60 \pm 2.07 ^c	75.40 \pm 0.55 ^c	75.25 ^c

注: 同一列不同字母代表具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.2 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓色差的影响

草莓的色泽是令消费者产生挑选与购买时第一印象的重要作用, 越鲜红的色泽越容易被消费者接受, 且与果实的品质密切相关。果蔬在冻藏过程中, 由于不可控制的环境条件影响, 往往会发生水分流失与 pH 变化导致褐变。其中, 导致果蔬褐变的主要原因包括酶促褐变与非酶褐变, 而多酚氧化酶是影响酶促褐变的主要酶之一。经研究表明, 影响水果汁液成分褐变的主要因素为抗坏血酸的降解与美拉德反应^[17]。

由图 1 结果可知, 对照组草莓色差为 76.27, 高电场处理草莓色差为 75.37, 低于对照组 1.18%; 低电场处理草莓色差为 74.09, 低于对照组 2.86%; 经外加电场冻藏处理后, 实验组较对照组色差变化更小 ($P < 0.05$), 且低电场的色差变化较高电场降低 1.70% ($P < 0.05$), 解冻后色泽与新鲜草莓更为接近, 因而更适于草莓的冻藏 (见图 2)。此外, 与对照组相比, 外加电场处理的草莓红度 (a^* 值)

变化较小; 高电场处理草莓亮度 (L^* 值) 较低电场处理降低更为明显。这说明外加电场处理易使草莓红色素发生降解, 且高电场处理对草莓褐变有一定风险。DENBA+ 辅助草莓冻结对解冻草莓褐变的抑制作用可能是因为 DENBA+ 处理对影响草莓褐变的多酚氧化酶有抑制作用^[18]。

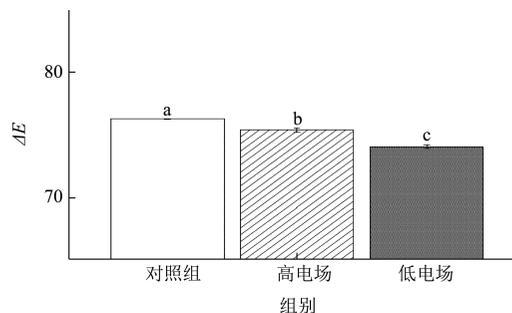


图 1 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓色差的影响
Fig.1 Effect of high and low electric field-assisted freezing process on color difference of strawberries after thawing

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。



图2 不同处理方式解冻后草莓色差对比图

Fig.2 Comparison chart of strawberry color difference after thawing with different treatments

2.3 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓硬度的影响

草莓果实的硬度与贮藏期密切相关，草莓的硬度也是判断草莓果实品质的重要指标之一。草莓质地柔软多汁，冷冻过程中，草莓组织中的水逐渐结冰，随着冰晶体积的不断增大，导致细胞壁和原生质体等发生不可逆的变化^[19]，致使细胞的结构和功能受到破坏，细胞内电解质外渗，并导致草莓硬度降低。这些物理变化是引起果蔬冷冻伤害的主要原因^[20]，因此处理后的草莓硬度决定了后续草莓贮藏期的长短。草莓经处理后的硬度情况对比如图3所示。

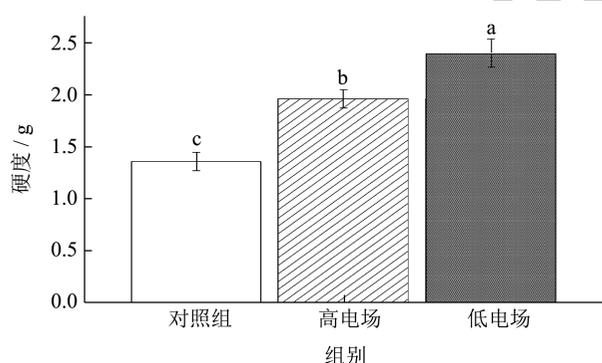


图3 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓硬度的影响

Fig.3 Effect of high and low electric field-assisted freezing process on the firmness of strawberries after thawing

由图3可见，草莓经外加电场冻藏解冻后硬度较不加电场处理硬度具有明显提升。对处理后草莓果实实验组与对照组分别进行测定，对照组草莓平均硬度为1.36 g；外加高电场处理草莓平均硬度为1.96 g ($P < 0.05$)，较对照组上升率为44.12%；低电场处理草莓实验组平均硬度为2.40 g ($P < 0.05$)，较对照组上升率为76.47%。低电场处理草莓硬度较高电场处理草莓硬度提高22.45%。经显著性

分析可知，外加低电场处理较外加高电场处理差异显著 ($P < 0.05$)，因而低电场处理条件下草莓硬度保持较好。通过对比文献推测，草莓解冻后硬度降低的主要原因是在冻结和解冻过程中冰晶刺破草莓细胞，导致草莓细胞壁受损的同时分解组织，进而使解冻后草莓硬度降低^[21]。此外，电场处理对抑制以多聚半乳糖醛酸酶和果胶甲酯酶为主的对细胞壁产生损伤的酶活性也有一定作用，减小草莓细胞壁受破坏程度，延缓其原果胶向可溶性果胶的转变^[22,23]，对草莓硬度的保持也有一定作用。

2.4 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓汁液流失率的影响

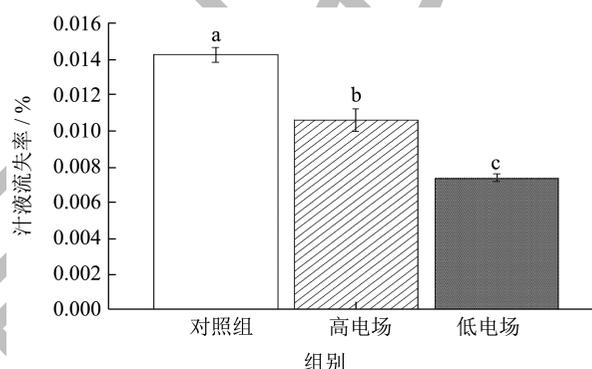


图4 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓汁液流失率的影响

Fig.4 Effect of high and low electric field-assisted freezing process on the weight loss of strawberries after thawing

通过对草莓汁液流失率的测定可探究草莓在冻藏期间冰晶对草莓细胞的破坏程度与其本身的持水能力，进而对处理方式进行评价^[24]。由图4可知，草莓经外加不同电场冻藏处理条件下汁液流失率均有所下降，其中外加低电场处理后草莓汁液流失率下降更为显著。对照组汁液流失率为1.44%，外加高电场处理草莓汁液流失率为1.01% ($P < 0.05$)；外加低电场处理草莓汁液流失率为0.73% ($P < 0.01$)。外加低电场处理草莓较高电场汁液流失率降低27.72%，处理结果差异显著 ($P < 0.05$)，因而外加低电场处理对草莓汁液损失较小，能保有较好品质。冷冻草莓解冻后汁液流失的主要原因是草莓在冻结过程中形成的冰晶粒度较大，对草莓组织产生损伤^[21]。DENBA+辅助草莓冻结降低了其解冻过程中汁液的损失，可能是因为DENBA+处理降低了冰晶形成的粒度，减少了冷冻过程中微观结构的损伤^[25]，从而降低了汁液流失率^[26]。

2.5 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓可溶性固形物的影响

草莓中的可溶性固形物主要包括维生素、矿物质、可溶性糖与酸性物质等营养成分，是可溶于水的所有化合物的总称。通过测定可溶性固形物可以判断经冻藏处理草莓果实成熟程度的变化与营养成分的损失情况、衡量果实营养价值，并依此判断其耐冻能力，进而推断其是否适合冻藏处理。草莓经处理后可溶性固形物对比情况如图 5 所示。

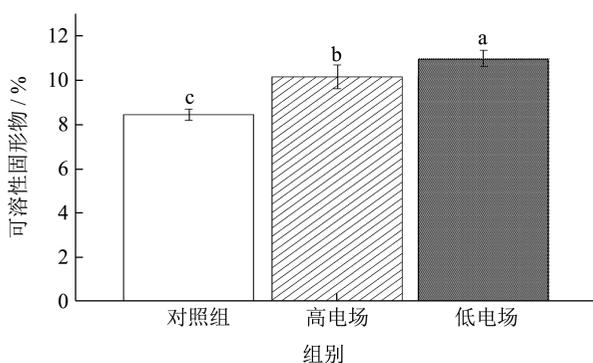


图 5 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓可溶性固形物的影响
Fig.5 Effect of high and low electric field-assisted freezing process on the total soluble solid content of strawberries after thawing

经测定可得，对照组草莓可溶性固形物含量为 8.47%，经高电场处理草莓可溶性固形物含量为 10.17% ($P < 0.05$)，较对照组提升 20.07%；经低电场处理草莓可溶性固形物含量为 11.00% ($P < 0.01$)，较对照组提高 29.87%。外加低电场处理草莓可溶性固形物含量较外加高电场可溶性固形物含量提升 8.16% ($P < 0.05$)，故外加低电场处理对草莓可溶性固形物提高效果更佳。外加 DENBA+ 辅助冻结的草莓解冻后可溶性固形物含量高于对照组的原因可能是 DENBA+ 产生的电磁波降低了草莓冻结过程中的冰晶粒度，抑制冰晶数量的快速增加，减少了冰晶对草莓组织的破坏^[27]，使可溶性固形物得到了更好的保留。

2.6 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓总糖的影响

草莓的总糖是指草莓中可溶性单糖与低聚糖的总量，通过测定草莓的总糖含量可对其感官质量、组织形态与营养价值等贮藏特性作出判断，进而评价其贮藏效果。吴玉婷等^[28]研究表明，低温静电场处理对贵妃红桃总糖含量损失降低有一定功效，可以提升贵妃红桃贮藏品质。草莓解冻后总糖情况对比如图 6 所示。

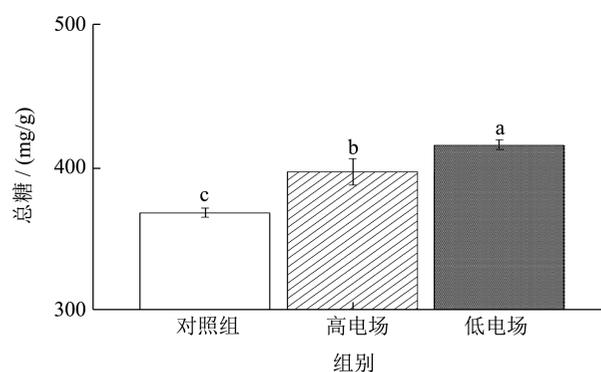


图 6 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓总糖的影响

Fig.6 Effect of high and low electric field-assisted freezing process on the total sugar content of strawberries after thawing

经数据测定与计算可得出，对照组草莓总糖含量为 368.94 mg/g，经高电场处理草莓总糖含量为 397.45 mg/g ($P < 0.05$)，较对照组提高为 7.73%；经低电场处理草莓总糖含量为 416.48 mg/g ($P < 0.05$)，较对照组提高 12.89%。外加低电场处理草莓总糖含量较外加高电场处理草莓总糖含量提升 4.79% ($P < 0.05$)，通过对比可知，在外加低电场条件下的冻藏效果更优。这是由于静电场处理能有效降低草莓果实新陈代谢的速率，抑制其呼吸强度，从而减少草莓总糖的损失^[24]。还可能由于 DENBA+ 处理减少了草莓细胞损伤，降低了汁液流失率，抑制了酶活性，从而抑制了草莓解冻过程中发生的糖代谢反应^[18]。

2.7 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓总酚的影响

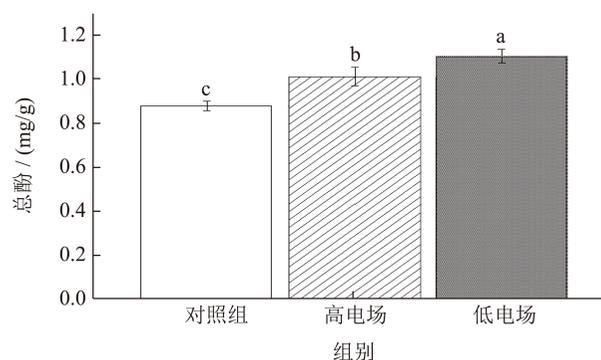


图 7 高低电场辅助冻结过程对解冻后草莓总酚的影响

Fig.7 Effect of high and low electric field-assisted freezing process on the total phenolic content of strawberries after thawing

草莓中含有的多种酚类生物活性成分，也是评价草莓果实贮藏后品质的重要指标之一。酚类物质主要影响草莓的色泽、风味，同时对草莓抗氧化与抗逆性等的提高具有重要作用，长期食用对人体抑

菌、抗衰老、清除自由基等均有良好功效,是草莓中重要的功能成分之一^[23]。吴嗣圣等^[29]实验表明,低温并不能阻止酚类物质的代谢损失与挥发,但外加低电场辅助处理能保留有更多的酚。经处理后草莓总酚情况对比如图7。

经数据测定与计算可得出,对照组草莓总酚含量为0.88 mg/g,经高电场处理草莓总酚含量为1.01 mg/g ($P < 0.05$),高于对照组0.13 mg/g;经低电场处理草莓总酚含量为1.11 mg/g ($P < 0.01$),高于对照组0.23 mg/g。外加低电场处理草莓总酚含量较外加高电场处理草莓总酚含量提升9.90% ($P < 0.05$),因而外加低电场处理可以提升草莓中多酚含量。总酚是苯丙烷的代谢产物,外加DENBA+辅助草莓冻结的草莓解冻后总酚保留较

多的原因可能是DENBA+电场处理阻止了丙二醛(MDA)的积累,延缓了总酚的损失^[30],同时也与DENBA+辅助草莓冻结可以降低草莓组织的损伤,从而减少了总酚的损失有关^[27]。

2.8 低电场辅助冻结草莓解冻品质指标相关性分析

由表3可知,低电场辅助冻结草莓解冻品质指标中,除了色差与汁液流失率、可溶性固形物与总酚、总糖与总酚外,其余各项指标间相关性均表现为极显著($P < 0.01$)。其中硬度与可溶性固形物相关性最高,为0.972,汁液流失率与可溶性固形物相关性最低,为-0.997。

表3 低电场辅助冻结草莓解冻品质指标相关性分析

Table 3 Correlation analysis of thawing quality index of low-electric field-assisted frozen strawberries

	色差	硬度	汁液流失率	可溶性固形物	总糖	总酚
色差	1					
硬度	-0.993**	1				
汁液流失率	-0.016	-0.983**	1			
可溶性固形物	-0.863**	0.972**	-0.997**	1		
总糖	-0.960**	-0.960**	-0.947**	0.926**	1	
总酚	-0.991**	-0.918**	-0.935**	0.232	0.107	1

注:**表示相关性极显著(双尾, $P < 0.01$), *表示相关性显著(双尾, $P < 0.05$)。

3 结论

通过对比500 V和2 000 V外加DENBA+电场辅助草莓冻结解冻后感官评价、色差、硬度、汁液流失率、可溶性固形物、总糖、总酚等7项指标,得出外加DENBA+电场辅助草莓冻结的解冻品质优于对照组,且外加500 V的DENBA+辅助草莓冻结的解冻品质最佳,其感官评价综合评分最高,色泽最接近新鲜草莓,硬度下降最少,汁液流失率最低,可溶性固形物含量、总糖、总酚损失最少。故综合分析,外加500 V的DENBA+辅助草莓冻结的草莓解冻品质最优,该条件更适于辅助草莓冻藏,更利于后续的加工利用。

参考文献

- [1] KAALE L D, EIKEVIK T M. The development of ice crystals in food products during the superchilling process and following storage, a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 39(2): 91-103.
- [2] 赵延峰.干冰喷射速冻草莓的理论模拟与实验研究[D].

天津:天津商业大学,2022.

- [3] LIU C E, CHEN W J, CHANG C K, et al. Effect of a high voltage electrostatic field (HVEF) on the shelf life of persimmons (*Diospyros kaki*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 236-242.
- [4] HUANG Y C, YANG Y H, SRIDHAR K, et al. Synergies of modified atmosphere packaging and high-voltage electrostatic field to extend the shelf-life of fresh-cut cabbage and baby corn [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110559.
- [5] KAO N Y, TU Y F, SRIDHAR K, et al. Effect of a high voltage electrostatic field (HVEF) on the shelf-life of fresh-cut broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 116: 108532.
- [6] FALLAH-JOSHAQANI S, HAMDAMI N, KERAMAT J. Qualitative attributes of button mushroom (*Agaricus bisporus*) frozen under high voltage electrostatic field [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 293: 110384.
- [7] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A. Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 37: 68-73.

- [8] XIE Y, ZHOU K, CHEN B, et al. Applying low voltage electrostatic field in the freezing process of beef steak reduced the loss of juiciness and textural properties [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68: 102600.
- [9] 王伟强,董丹华.DENBA+静电波保鲜技术应用浅析[J]. *新疆农机化*,2017,2:25-27.
- [10] XU B G, CHEN J A, YUAN J, et al. Effect of different thawing methods on the efficiency and quality attributes of frozen red radish [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 101(8): 3237-3245.
- [11] 刘雪梅,孟宪军,李斌,等.不同解冻方法对速冻草莓品质的影响[J]. *食品科学*,2014,35(22):276-281.
- [12] 李丽.速冻草莓品质评价体系的建立研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [13] 张延琦,赵金红,倪元颖.不同预处理方式对速冻草莓冻藏品质的影响[J]. *食品工业*,2016,37(5):145-150.
- [14] 田雪婷,吴晗笑,王雷,等.1-MCP处理对采后‘澳洲青苹’苹果叶绿素降解的影响[J]. *果树学报*,2020,37(5): 734-742.
- [15] 冯文婕,阙斐,陈岭,等.茶多酚-壳聚糖复合涂膜液对草莓保鲜效果的研究[J]. *现代农业科技*,2016,22:260-262.
- [16] 牛丽影,胡丽丽,李大婧,等.草莓脯贮藏期间非酶褐变的化学途径分析[J]. *食品科学*,2022,43(17):248-254.
- [17] PARAVISINI L, PETERSON D G. Mechanisms non-enzymatic browning in orange juice during storage [J]. *Food Chemistry*, 2019, 289: 320-327.
- [18] SAMARANAYAKE C P, MOK J H, HESKITT B F, et al. Nonthermal inactivation of polyphenol oxidase in apple juice influenced by moderate electric fields: Effects of periodic on-off and constant exposure electrical treatments [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 77: 102955.
- [19] 邓云,杨宏顺,李红梅,等.冷冻食品质量控制与品质优化[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [20] SEMENOV G V, KRASNOVA I S, KHVYLIA S I, et al. Freezing and freeze-drying of strawberries with an additional effect of micro-vibrations [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58: 3192-3198.
- [21] HAJJI W, GLIGUEM H, BELLAGHA S, et al. Structural and textural improvements of strawberry fruits by partial water removal prior to conventional freezing process [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16: 3344-3353.
- [22] 王静宇,赵薇,马孟雨,等.草莓采后生理变化及其保鲜技术研究进展[J]. *安徽农业科学*,2021,49(6):39-42.
- [23] 徐纯.低压静电场结合低温对草莓保鲜机理研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [24] 鲁礼明,张中俊,李芳,等.不同冻结方式对水果形态结构破坏情况的实验研究[J]. *日用电器*,2020,11:52-56,70.
- [25] JIANG Q Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Application of physical field-assisted freezing and thawing to mitigate damage to frozen food [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 103(5): 2223-2238.
- [26] RODRÍGUEZ A C, OTERO L, COBOS J A, et al. Electromagnetic freezing in a widespread frequency range of alternating magnetic fields [J]. *Food Engineering Reviews*, 2019, 11: 93-103.
- [27] LI D M, ZHU Z W, SUN D W. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75: 46-55.
- [28] 吴玉婷,谢超,周卓颖,等.基于低压静电场协同低温对贵妃红桃保鲜效果的影响[J]. *食品工业*,2022,43(11):167-172.
- [29] 吴嗣圣,陈姗姗,余铭.冻结方式和冻藏条件对冻藏水蜜桃果浆品质的影响[J]. *保鲜与加工*,2021,21(1):99-104.
- [30] YAN M, YUAN B, XIE Y, et al. Improvement of postharvest quality, enzymes activity and polyphenoloxidase structure of postharvest *agaricusbisporus* in response to high voltage electric field [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 166: 111230.