

预处理及解冻方法对马铃薯冻融品质的影响

杜慧慧¹, 李可兴², 刘彩云^{1*}, 李黛妍¹, 周彬¹, 阿布都·沙拉穆¹,
玉米提·依沙克¹, 李保国¹

(1.上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200082; 2.上海大学 生命科学学院, 上海 200901)

摘要: **目的** 提高马铃薯冻融后的品质, 为 PEF 预处理在蔬菜冷冻领域的应用提供理论依据。**方法** 探讨预处理方法(脉冲电场、热处理)和解冻方法(常温解冻、水里解冻、冰箱解冻)对马铃薯冷冻-解冻过程及品质的影响, 分析冰晶成核温度、融化温度、汁液损失比、色泽、硬度等理化指标, 并通过低场核磁共振仪分析冻融后样品不同状态下水分间的迁移情况。**结果** 热烫和高压脉冲电场(Pulsed Electric Field, 简称 PEF)预处理均可显著降低冷冻时间、提高冰晶成核温度。PEF 预处理样品在最大冰晶体形成带的滞留时间相较于对照组样品降低了 26.3%。在不同解冻方式下, PEF 预处理和热烫预处理均可降低马铃薯冻融后的汁液损失。在常温下解冻, 对照组、热烫组、PEF 预处理组的汁液损失率分别为 24.12%、17.39%、15.53%。PEF 预处理和热烫预处理可减缓食品在冻融过程中的颜色和硬度的变化进程。**结论** PEF 预处理可以改善冻融后马铃薯的品质, 可为 PEF 在果蔬冷冻领域的应用提供理论参考。

关键词: 马铃薯; 脉冲电场; 热烫; 冷冻; 解冻

中图分类号: TS255.36 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)17-0041-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.006

Effect of Pretreatment and Thawing Method on Freezing and Thawing Quality of Potato

DU Hui-hui¹, LI Ke-xing², LIU Cai-yun^{1*}, LI Dai-yan¹, ZHOU Bin¹,
SHALAMU·Abdu¹, YISHAKE·Yumiti¹, LI Bao-guo¹

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China; 2. School of Life Sciences, Shanghai University, Shanghai 200901, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the quality of potato after freezing and thawing and provide theoretical basis for the application of PEF pretreatment in vegetable freezing. The effect of pretreatment methods (pulse electric field and blanching) and thawing methods (room temperature thawing, water thawing and refrigerator thawing) on potato freezing-thawing process and quality was discussed, the physicochemical indicators such as ice crystal nucleation temperature, melting temperature, water loss ratio, color, hardness, etc. were analyzed and the migration of water at different states of samples after freezing and thawing was analyzed by low field nuclear magnetic resonance analyzer. Blanching and PEF (Pulsed Electric Field) pretreatment could significantly reduce the freezing time and increase the ice crystal nucleation temperature. Moreover, the retention time of PEF pretreated samples in the maximum ice crystal formation zone was 26.3% lower than that of the control group. PEF pretreatment and blanching pretreatment could both reduce the water loss of potato after different thawing methods. For room temperature thawing, the water loss ratio of

treated, blanching pretreated and PEF pretreated samples were 24.12%, 17.39% and 15.53% respectively. At the same time, PEF pretreatment and blanching pretreatment could also reduce the color change and hardness change of food during freezing and thawing. PEF pretreatment can improve the quality of potato after freezing and thawing, which provides theoretical reference for the application of PEF in the field of vegetable freezing.

KEY WORDS: potato; pulsed electric field; blanching; freezing; thawing

马铃薯属于茄科, 又称洋芋、土豆等。随着主粮化进程的推进, 马铃薯是继玉米、大米、小麦后的主要农作物。马铃薯营养丰富, 含有纤维素、蛋白质、碳水化合物、矿物质、多种维生素, 且含有谷物中缺乏的赖氨酸和色氨酸。新鲜马铃薯如果放置时间过长, 则容易发生腐败变质, 营养成分易流失, 甚至产生毒素。由于新鲜马铃薯不易储藏, 因此冷冻后的马铃薯、薯片及各类马铃薯加工食品中的全粉和薯干等一系列半成品受到消费者的广泛欢迎。联合国粮食及农业组织将 2008 年定为“国际马铃薯年”, 赞誉马铃薯为被埋没的宝贝, “国际马铃薯年”引发了马铃薯研究的新一轮高潮^[1]。

冷冻是食品保鲜储藏技术中最常用的方法之一。在低温环境下, 果蔬能够长时间保存。虽然冷冻可以延长食品的货架期, 同时起到保鲜作用, 但在整个冷冻过程中存在“最大冰晶体生成带”。若在此区间滞留时间过长, 就会产生尺寸较大的冰晶, 不规则的冰晶会损坏细胞膜及其他细胞器, 导致不良后果的产生, 表现为解冻后汁液大量流失。同时, 一些水溶性的营养成分也会随之流失, 从而影响果蔬的品质^[2]。由于水果和蔬菜的含水率一般较高, 因此在冷冻过程中更易形成大冰晶, 导致水果和蔬菜的品质下降, 如发生褐变、果汁流失和软化等^[3]。

热烫是在高温热水、沸水或常压蒸汽中进行的加热处理方式, 它可以杀灭果蔬中的微生物, 同时可以破坏样品的酶活性, 改变原料的组织结构, 有利于在冷冻和冷冻储存过程中保持食品的原有品质。热烫方式也存在一定缺陷, 如过度热烫易破坏原材料的色泽, 降低热敏性物质的含量, 同时也会破坏果蔬的物理结构, 导致后续加工食品品质的降低^[4]。高压脉冲电场 (High-voltage pulsed electric field, 简称 PEF) 是一种新型的食品非热加工技术, 具有能耗低、速度快、无污染、操作简便等优点, 这种非热加工预处理方式可使加工食品的品质得到较大改善, 被广泛应用于食品的冷冻、干燥、有效成分提取等领域^[5]。Artur Wiktor 等^[6]研究表明, 与对照组相比, 通过 PEF 预处理可以有效降低苹果切片的冷冻时间, 总冷冻时间约缩短了 3.5%~17.2%。段智英^[7]研究了 PEF 预处理对红薯、马铃薯、梨的冷冻过程的影响, 发现果蔬成核温度可在合适强度的电场处理下显著降低, 且通过最大冰晶生成带的时间随着成核温度的降低而变短, 同时果蔬的硬度

降低, 细胞结构相对完整。Jalte 等^[8]研究了 PEF 对马铃薯冻干过程和复水的影响, 以相对电导率来评价脉冲电场对细胞的损伤程度。结果表明, 经过 PEF 预处理后, 冻干样品的冻干速率、复水率和品质都有所提高。

解冻是冷冻的逆过程, 是将冷冻原料在一定的温湿度和通风条件下, 尽可能完善地恢复其原有特性, 即将细胞中冰晶融化后恢复到新鲜状态的过程, 是冷冻食品加工前较为重要的环节。在解冻过程中可能会出现颜色的改变、营养物质的流失和食品成分及组织结构的改变等食品质量下降问题。王雪松等^[9]研究了冷冻竹荚鱼在几种不同解冻方式下品质的变化情况, 结果表明, 经冷藏解冻后鱼肉在外力作用下保持水分和色泽的能力更强。目前, 针对冻融的研究主要集中在水产品 and 动物产品上, 针对脉冲电场辅助冷冻-解冻技术在果蔬领域的研究还未见报道。

这里主要研究脉冲电场和热烫预处理, 以及传统的解冻方法 (常温、水里和冰箱) 对马铃薯冷冻-解冻时间, 结晶和融化温度, 解冻后样品的汁液损失、颜色、质构, 以及水分迁移等方面的影响, 旨在优化冷冻和解冻过程, 为冻融果蔬的实际生产加工和流通储藏提供数据支持和理论参考。

1 实验

1.1 材料

主要材料: 马铃薯, 黄心, 山东潍坊市, 购于大润发超市。

1.2 仪器与设备

实验所用仪器与设备如表 1 所示。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

选择新鲜、大小均匀的马铃薯, 充分清洗, 并用厨房纸巾擦拭其表面多余的水分, 去皮, 采用切片机将土豆切成均匀、厚度 (5.0 ± 0.05) mm、质量 (4.40 ± 0.10) g、直径 2.7 cm 的圆形切片, 待用。

1.3.1.1 预处理

1) 对照组。马铃薯经清洗、切片后, 不做任何处理。

表 1 主要仪器与设备
Tab.1 Main instruments and equipment

名称	型号	生产厂家
切片机	YYJ-6	德清极度工艺品有限公司
电子分析天平	FA2204 (精确度为 0.000 1 g)	宁波市鄞州华丰电子仪器厂
手持多路温度测试仪	JK804 (分辨率为 0.01 ℃)	深圳拓普瑞设备有限公司
恒温水浴锅	HH-4	邦西仪器科技(上海)有限公司
质量计	TA.XT PLUS	超技术仪器设备有限公司
色差计	CR-400	柯尼卡美能达控股公司
低磁场核磁共振分析仪	PQ0012	苏州新迈电子科技有限公司
高压脉冲设备	HSPY-1500-005	上海理工大学自制
冷冻柜	BCD-177F/Q	广州极速制冷设备有限公司

2) 热烫预处理。经清洗、切片后, 将马铃薯切片在 85 ℃热水中烫 10 min。

3) PEF 预处理。经清洗、切片后, 将马铃薯切片放入 PEF 处理室进行处理。具体参数: 电场强度为 1 000 V/cm, 脉宽为 20 μs, 外部频率为 10 Hz, 脉冲群为 100 个, 每个脉冲群有 50 个脉冲, $t_{\text{PEF}}=0.1\text{ s}$, 该处理时间可以确保马铃薯细胞膜完全电穿孔^[10]。

1.3.1.2 冷冻

将处理好的马铃薯切片直接放入冷柜, 并冷冻至样品中心温度为-20 ℃。

1.3.1.3 解冻

将冷冻好的样品拿出, 分别采用 3 种方法对其进行解冻。

1) 常温解冻。把样品置于远离热源的洁净烧杯内, 使用 K804 型手持多路温度测试仪测量样品的中心温度, 当样品的中心温度升至 (12±0.05) ℃ (室温) 时, 即为解冻终点。

2) 水里解冻。将常温纯净水放入烧杯中, 将样品放入烧杯中解冻。使用 K804 型手持多路温度测试仪测量样品的中心温度, 当样品中心温度升至 (12±0.05) ℃时, 即为解冻终点。

3) 冰箱解冻。将样品放置在冰箱冷藏层中解冻, 使用 K804 型手持多路温度测试仪测量样品的中心温度, 当样品的中心温度升至 (4±0.05) ℃时, 即为解冻终点。

1.3.1.4 保存

将解冻好的样品沥水, 并采用真空包装, 每份包

装 3 片样品, 并置于冰箱冷藏室中保存, 用于后续产品品质的分析研究。

1.3.2 汁液损失的测定

用天平测量样品的初始质量, 以及解冻后用厨房纸巾吸去样品表面水分后的质量。通过式 (1) 计算脱水率。

$$X = \frac{m - m'}{m} \times 100\%$$

(1)

式中: X 为脱水率, %; m 为样品冷冻前的初始质量, g; m' 为样品解冻后的质量, g。

1.3.3 颜色的测定

采用色差计测定样品的 L^* 、 a^* 、 b^* , 打开色差仪, 预热 20 ~ 30 min, 在黑白板校正后进行色差检测。总色差变化 ΔE 根据式 (2) 进行计算。

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

(2)

式中: ΔE 为总色差; L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 为初始样品的亮度值、红绿值、黄蓝值; L^* 、 a^* 、 b^* 为解冻后样品的亮度值、红绿值、黄蓝值。

1.3.4 硬度的测定

利用质构仪对新鲜和解冻完成后的马铃薯进行纹理多面分析, 测定样品的硬度。参数如下: 探头为 P/36R, 测试距离为样品厚度的一半 (0.25 cm), 测前速度为 1 mm/s, 测试速度为 1 mm/s, 测后速度为 10 mm/s, 硬度为 5 g。

1.3.5 冷冻-解冻温度曲线

将温度记录仪传感器探头插入马铃薯的几何中心位置, 记录样品在冷冻和解冻全过程的温度变化情况, 每隔 3 s 自动记录, 并绘制冻融曲线。

1.3.6 冷冻、解冻时间的确定

当冷冻温度降至-5 ℃时, 食品体系内 80% 的水就已结冰, 因此食品冻结过程中的大部分水分是在最大冰晶体生成带 (0 ~ -5 ℃) 冻结。在冻融过程中, 样品在最大冰晶体生成带所滞留的时间 (Δt_f)、冰晶成核温度 (θ_f)、解冻时在稳定期所需时间 (Δt_t)、冰晶融化温度 (θ_t) 如图 1 所示。

1.3.7 水分分布的测定

通过低磁场 NMR 技术测量解冻后样品的水分分布。将样本切成 1 cm³ 的立方体后置于核磁管底部, 经 32 ℃水浴 15 min 后擦干试管外壁, 放在磁体箱中, 按照机器步骤操作, 收集弛豫信息。弛豫试验: 采用 CPMG (Carr-Purcell-Meibom-Gill) 脉冲串采集样品的横向弛豫时间。试验参数: 光谱宽度 (SW) 为 100 kHz, 重复采样时间 (TR) 为 4 500 ms, 重复扫描次数 (NS) 为 8, 回波数量 (Echocount) 为 16 000。

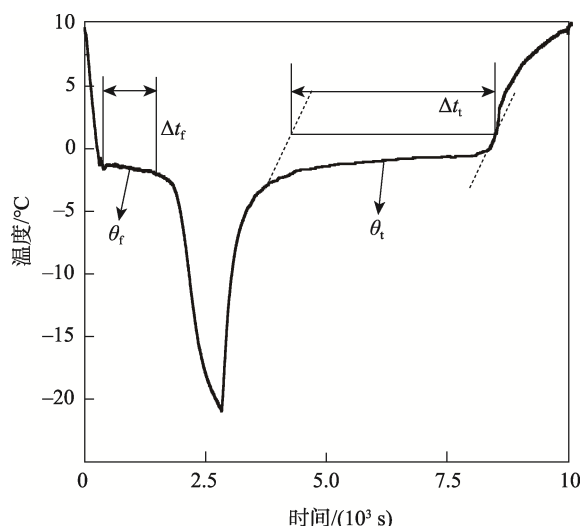


图1 马铃薯样品冷冻-解冻温度曲线

Fig.1 Freezing-thawing temperature curve of potato sample

1.3.8 数据分析

利用 T-invfit 反演软件对通过低磁场核磁共振仪测量获得的自由感应指数衰减曲线进行反演拟合,可以得到解压后的多分量弛豫图。实验均重复 3 次,并用 Origin 2020b 和 Excel 对数据进行分析及绘图。采用 SPSS26 软件对数据进行方差分析,显著性分析在 Duncan 测试的 $P < 0.05$ 检验水平下进行。

2 结果与分析

2.1 预处理对冷冻/解冻过程的影响

果蔬的冻结过程包括初步冷却、结晶和最终冷却阶段^[11]。在结晶阶段,当样品温度逐渐降至冰点时,内部水分开始形成冰晶,在形成冰晶的过程中释放出的潜热使温度逐渐升至冻结点附近。随着温度的降低,大的冰晶开始形成,释放的潜热大,温度下降较慢,曲线呈现平缓趋势^[12]。由图 2 可知,在冷冻过程中,热烫预处理组和 PEF 预处理组的样品中心温度由 10 °C 降至 -20 °C 所需时间分别为 2 521 s 和 2463 s,均显著低于对照组 (2 710 s),通过最大冰晶形成带所滞留的时间 (Δt_f) 分别为 1 222 s (对照) > 932 s (热烫) > 901 s (PEF)。Jalte 等^[8]研究表明,当 PEF 作用于马铃薯,使其细胞破损率 $Z=0.98$ 时,马铃薯的几何中心温度从 0 °C 降至 -25 °C 所需的时间可以降低近 25%。PEF 对样品的冻结有促进作用,可能因施加了外部电场,使得不同水分子之间的氢键被破坏,水分子从自然随机状态转变为电场矢量状态,在同一位置形成了致密的核。可见电场可以提高成核速率,加快冰晶的成型,形成小的冰晶,从而减少对食品的破坏^[13]。热烫可以去除细胞间隙中的空气,同时也可破坏植物细胞壁,使组织变软,从而加速冷冻过程中结晶的生成^[14]。

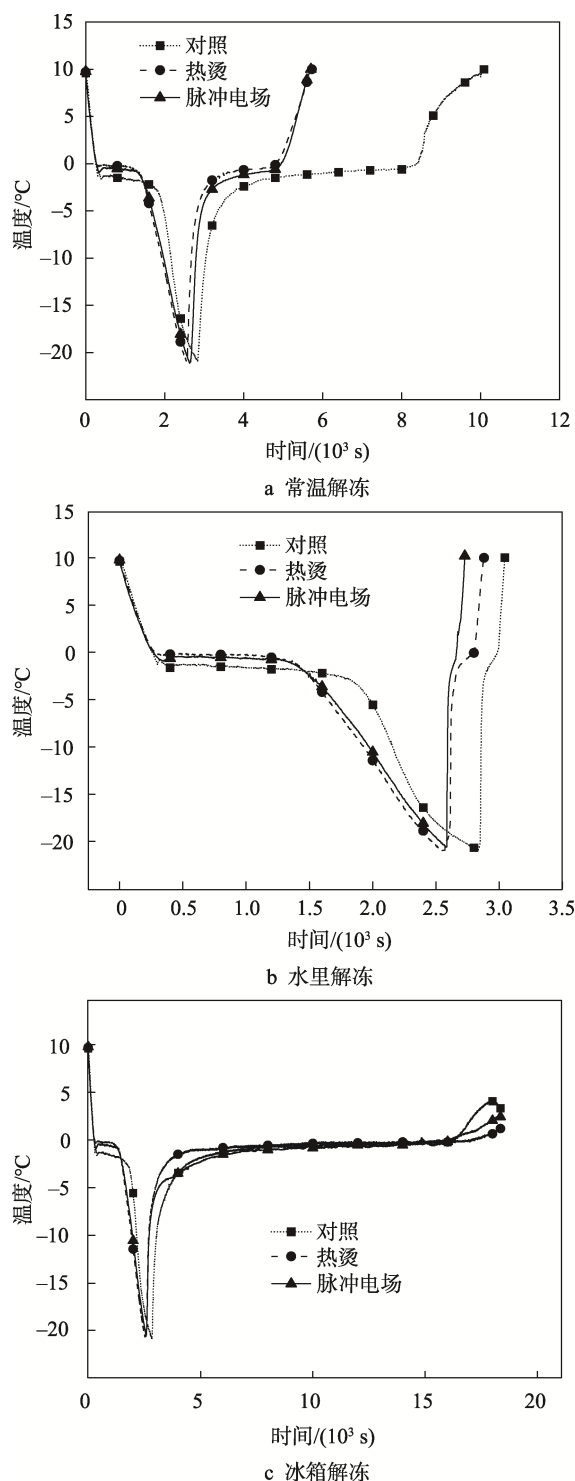


图2 解冻方法及预处理方法对样品中心温度随时间变化的影响

Fig.2 Effect of thawing methods and pretreatment methods on the change of sample center temperature with time

由图 2 可知,在预处理方式一致的情况下,解冻时间的顺序为冰箱解冻>常温解冻>水中解冻(图 2a、b、c)。常温解冻是利用空气与样品表面进行热量传递,水里解冻是利用水进行热量传递,冰箱解冻主要通过样品表面水蒸气凝固的热交换来实现^[15]。空

气热传导率远小于水的热传导率,所以常温和冰箱解冻的时间比水里解冻的时间长^[16]。对于常温解冻(图 2a),PEF 可以显著降低解冻时间,这与 Wiktor 等^[6]的研究结果一致,其研究表明,在未进行任何处理的情况下苹果的解冻时间需要 2 060.10 s,但使用 PEF (100 脉冲,5 kV/cm)处理后,苹果的解冻时间为 1 508.40 s,总解冻时间减少了约 26.8%。

2.2 预处理对冰晶成核和融化温度的影响

不同的预处理方法和解冻方式对马铃薯冷冻过程中结晶温度及解冻过程中冰晶融化温度的影响如表 2 所示。对于冷冻过程中的结晶温度,采用 PEF 预处理和热烫预处理都可显著提高结晶成核温度,分别为-0.47、-0.23℃,而对照组的结晶成核温度为-1.63℃。PEF 可以促进样品中水分子的极化,增强水分子的动能,减少相变所需时间,提高相变温度,从而加速水分的结晶^[17]。热烫有助于破坏细胞膜和细胞壁,减少细胞内外的物质移动和传热阻力,从而提高冰晶成核温度^[18]。解冻方式对冰晶融化温度呈现显著性影响,冰箱解冻和水里解冻的冰晶融化温度显著高于常温解冻。预处理和解冻方式存在协同作用,可以明显提高冰晶融化温度,从而减少冰晶融化时间,降低能耗,提高产品的品质。如经 PEF 预处理,在常温、水里和冰箱等解冻过程中,样品的冰晶融化温度分别为-1.57、-0.97、-0.83℃,均低于对照组。

2.3 预处理对解冻后样品汁液损失的影响

汁液损失率可以体现冷冻样品的持水能力,反映样品在冷冻解冻后的风味变化和营养物质的损失情况^[19]。在长时间的解冻过程中,冰晶破坏了细胞膜和细胞壁的结构,导致细胞的保水能力下降,进而导致汁液流失^[20]。由图 3 可知,在不同的解冻方式下,相较于未处理样品(对照组),经过热烫预处理和 PEF 预处理后样品的汁液损失率都显著下降($P<0.05$)。对于常温解冻,未处理样品、热烫预处理样品和 PEF 预处理样品解冻后的汁液损失率分别为 24.12%、17.39%、15.53%。热烫预处理使得样品表面的淀粉类

物质部分糊化,在表面形成了隔水层,因此在解冻后汁液损失率下降^[21]。经 PEF 处理后,食品微观粒子之间的弱相互作用得到加强,即食品中水分子与非水分子的相互作用得到加强,这在一定程度上降低了水分子向外渗透的能力,减缓了汁液的流失。同时,PEF 提高了果蔬的成核温度(表 2),且在较短时间内通过最大冰晶体形成带(图 2),形成了小的冰晶,减少了对果蔬细胞的机械损伤,进而降低了汁液损失率。在相同预处理下,经冰箱解冻后汁液损失率明显低于常温解冻和水中解冻($P<0.05$)(图 3)。这是因为在冰箱解冻条件下温度较低,且整个过程较温和,可以有效降低生化反应强度,抑制微生物的繁殖,细胞组织的损伤较小,故冰箱解冻的汁液损失率最低^[22]。采用水里解冻会在解冻过程中同时进行复水作用,细胞膨胀,导致汁液损失率较低。李璐倩等^[23]采用几种不同解冻方法处理牦牛肉,并对处理后的牦牛肉质量特性进行了分析,结果表明,经静水解冻后样品的汁液损失率明显低于微波解冻、常温空气解冻和冷藏解冻。

2.4 预处理对解冻后样品总色差的影响

颜色是用于评价食品质量的基本参数之一,颜色影响着消费者对产品的接受程度。这里的颜色变化通过总色差 ΔE 进行分析, ΔE 越小,说明样品解冻后的颜色越接近新鲜样品^[24]。如图 4 所示,对于常温解冻和冰箱解冻,相较于未处理样品,PEF 预处理和热烫预处理可以显著降低解冻后样品的总色差 ΔE 。对于常温解冻,未处理样品、热烫预处理样品和 PEF 预处理样品的 ΔE 分别为 18.5、7.99、6.67。PEF 预处理导致的电穿孔现象可显著缩短冷冻和解冻时间,从而减缓样品在解冻过程中因氧化反应等导致的颜色变化。Li 等^[25]也发现,经过 PEF 预处理后,大西洋三文鱼解冻后的 ΔE 为 4.48,明显低于未处理样品(6.61)。热烫处理可以钝化样品中的酶,减少冷冻和解冻过程中氧化反应的发生,故可减缓颜色的变化。对于水里解冻,相较于未处理样品,热烫预处理和 PEF 预处理样品的 ΔE 降低不显著($P>0.05$)。这可能由于水里解冻时样品与空气的接触时间较

表 2 预处理方法和解冻方法对冰晶成核和融化温度的影响
Tab.2 Effect of pretreatment methods and thawing methods on ice crystal nucleation and melting temperatures of potato

方法	结晶成核温度/℃	冰晶融化温度/℃		
		常温解冻	水里解冻	冰箱解冻
对照	-1.63±0.12 ^A	-1.7±0.07 ^a	-1.23±0.06 ^b	-0.93±0.06 ^c
热烫	-0.23±0.02 ^{BC}	-1.27±0.06 ^b	-0.63±0.05 ^d	-0.53±0.06 ^d
脉冲电场	-0.47±0.05 ^B	-1.57±0.06 ^a	-0.97±0.15 ^c	-0.83±0.12 ^c

注:不同字母代表样品间存在显著差异($P<0.05$);相同字母代表样品间不存在显著差异($P>0.05$)。

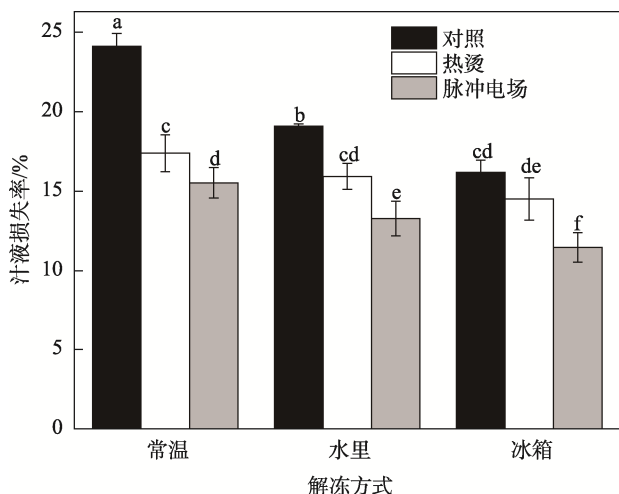


图3 预处理方法和解冻方法对马铃薯冻融后汁液损失的影响

Fig.3 Effect of different pretreatment methods and thawing methods on water loss of potato after freezing-thawing

注：不同字母代表样品间存在显著差异 ($P<0.05$)；相同字母表示样品间不存在显著差异 ($P>0.05$)。

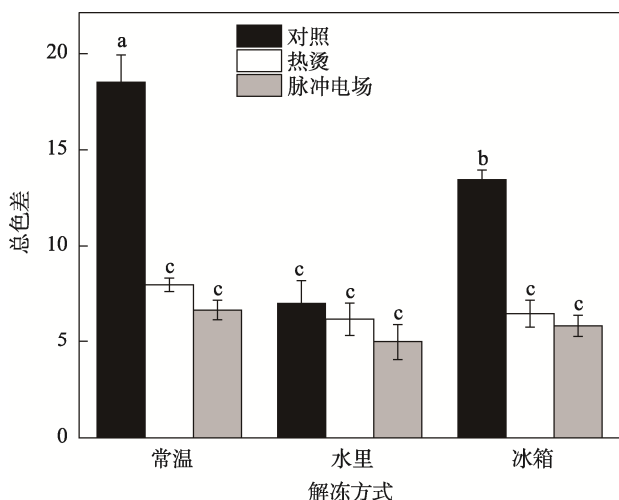


图4 预处理方法和解冻方法对马铃薯样品冻融后颜色总色差的影响

Fig.4 Effect of different pretreatment methods and thawing methods on total color change of potato after freezing-thawing

注：不同字母代表样品间存在显著差异 ($P<0.05$)；相同字母表示样品间不存在显著差异 ($P>0.05$)。

短,较大的色差变化可能由样品长时间暴露于空气中发生了氧化作用所致。采用冰箱解冻时,虽然解冻时间较长,但低温解冻能在一定程度上抑制氧化,且可减少与空气接触的时间,同时不会因瞬间温度的上升而破坏酶活性,因此相较于常温解冻,其样品总色差改变较小。

2.5 预处理对解冻后样品硬度的影响

硬度受到解冻后样品的持水能力及结构完整性的影响^[26]。预处理方法和解冻方式对解冻后样品硬度的影响如表 3 所示, PEF 预处理和热烫预处理可以显著降低解冻后样品的硬度 ($P<0.05$)。对于常温和水里解冻, 热烫预处理样品的硬度低于 PEF 预处理样品, 冰箱解冻反之。PEF 预处理增加了细胞膜的通透性, 降低了细胞膨压, 导致硬度减小^[6]。热烫预处理使样品内部组织软化、渗透性增强, 热烫会对细胞壁和细胞间的胶体高分子造成不同程度的伤害, 减弱了细胞间的结合力, 降低了可溶性固形物含量, 从而降低了样品的硬度^[27]。解冻方式的不同也会导致解冻后样品的硬度不同, 如表 3 所示。对于未处理样品, 在水里解冻和冰箱解冻后, 样品的硬度显著高于常温解冻。对于热烫预处理, 在水里解冻后样品的硬度最低。对于 PEF 预处理, 经水里解冻和冰箱解冻后样品的硬度都显著低于常温解冻 ($P<0.05$)。这可能是由于水里解冻和冰箱解冻方式在解冻过程中降低了细胞间的结合力, 因而质地较软^[9]。

2.6 预处理对样品水分分布的影响

样品在冷冻前及经不同方法（常温解冻、水里解冻和冰箱解冻）解冻后的横向弛豫时间 t_2 反演图谱如图 5 所示。 t_2 指样品水分中的 H 质子自旋核在外加磁场受到射频脉冲刺激后，系统内部达到横向热平衡所需的时间^[28]。果蔬中的水分常分为 3 种状态，即自由水、结合水和半结合水。其中，0~10 ms 时为结合水（ t_{21} ），10~100 ms 为半结合水（ t_{22} ），100~1 000 ms 为自由水（ t_{23} ）。对于未处理样品，经 PEF 和热烫预处理后，3 种水分状态都发生了左移。因为在马铃薯的水分分布中，以自由水状态存在的水分占比（80%）较大，所以可以用其弛豫时间 t_{23} 作为水分自由度的判断指标。如图 5 所示，通过对比弛豫时间发现，

表3 预处理方法和解冻方法对冻融后马铃薯硬度的影响

Tab.3 Effect of pretreatment methods and thawing methods on hardness of potato after freezing-thawing

[illegible]

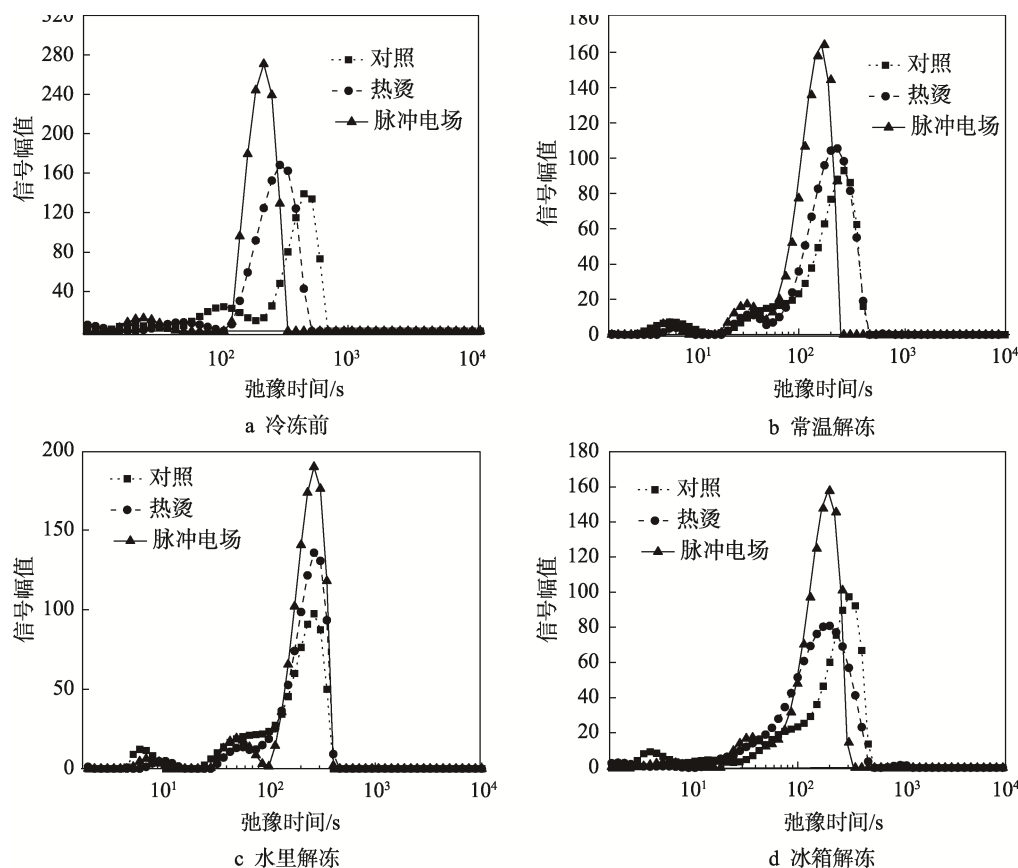


图 5 预处理和解冻方法对马铃薯横向弛豫时间的影响
Fig.5 Effect of pretreatment methods and thawing methods on transverse relaxation time of potato

对照组中新鲜样品、常温解冻、水里解冻和冰箱解冻的 t_{23} 分别为 464.16、266.61、265.61、305.72 ms; 在热烫预处理组中, 新鲜样品、常温解冻、水里解冻和冰箱解冻后样品的 t_{23} 分别为 305.39、231.01、265.61、200.923 ms; 在 PEF 预处理组中, 新鲜样品、常温解冻、水里解冻和冰箱解冻后样品的 t_{23} 分别为 232.01、174.75、265.94、201.92 ms。预处理样品的 t_{23} 显著低于对照组, 说明经热烫预处理或 PEF 预处理后, 样品中的水分发生了迁移, 结合水的缔合程度更高, 从而降低了冷冻和解冻过程中汁液的损失率^[29]。这也是解冻后预处理样品的汁液损失低于对照组的原因。

解冻方法和预处理方法对马铃薯冻融后自由水峰面积的影响如图 6 所示。不同 t_2 的积分面积可以表示对应水分状态的绝对含量^[30]。解冻方法对冻融后样品中自由水的分布无显著性影响, 但是预处理方法对冻融后自由水的峰面积有着显著影响。如 PEF 预处理样品的自由水峰面积明显高于未处理样品和热烫预处理样品 (图 6)。说明 PEF 预处理可以改变马铃薯的细胞膜结构, 有利于解冻后样品中网状结构的形成, 增大了毛细血管力, 从而束缚了水分, 减少了水分损失, 这与冻融后汁液的损失结果 (图 3) 一致。

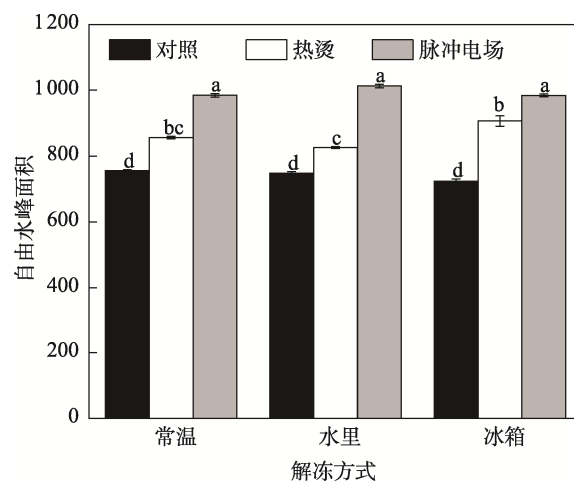


图 6 解冻方法和预处理方法对马铃薯冻融后自由水峰面积的影响
Fig.6 Effect of thawing methods and pretreatment methods on free water peak area of potato after freezing-thawing

注: 不同字母代表样品间存在显著差异 ($P < 0.05$); 相同字母表示样品间不存在显著差异 ($P > 0.05$)。

3 结论

经研究发现, PEF 预处理和热烫预处理均可改善

马铃薯冻融后的品质。经 PEF 预处理的样品在最大冰晶体滞留的时间低于热烫预处理样品,同时在常温解冻、水里解冻和冰箱解冻情况下,PEF 预处理样品冻融后的汁液损失率和色差值均低于热烫预处理样品。此研究证明,PEF 预处理作为新型的非热加工预处理方法能够替代传统热烫预处理,改善冻融后马铃薯的品质,可为 PEF 在果蔬冷冻领域的应用提供理论参考。

参考文献:

- [1] 刘刚,赵鑫,周添红,等.我国马铃薯加工产业结构分析与思考[J].农业工程技术(农产品加工业),2010(8):4-11.
LIU Gang, ZHAO Xin, ZHOU Tian-hong, et al. Structure Analysis and Development Thinking of Potato Processing Industry in China[J]. Agriculture Engineering Technology (Agricultural Product Processing Industry), 2010(8): 4-11.
- [2] 邱爽,李学鹏,王金厢,等.超声波辅助冷冻技术及其在食品中的应用[J].食品研究与开发,2020,41(1):190-195.
QIU Shuang, LI Xue-peng, WANG Jin-xiang, et al. Ultrasound-Assisted Freezing Technology and Its Application in Frozen Food[J]. Food Research and Development, 2020, 41(1): 190-195.
- [3] 储渊明,谢晶.水产品冻藏品质变化及镀冰衣技术的研究进展[J].包装工程,2020,41(17):31-37.
CHU Yuan-ming, XIE Jing. Research Progress on Quality Change of Frozen Storage of Aquatic Products and Application of Glazing Technology[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(17): 31-37.
- [4] MARTÍNEZ S, PÉREZ N, CARBALLO J, et al. Effect of Blanching Methods and Frozen Storage on some Quality Parameters of Turnip Greens (Grelos)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1): 383-392.
- [5] ZHU Zhen-zhou, HE Jing-ren, LIU Gang, et al. Recent Insights for the Green Recovery of Inulin from Plant Food Materials Using Non-Conventional Extraction Technologies: A Review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 1-9.
- [6] 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.
- [7] 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,2017:1-2.
DUAN Zhi-ying. Study on the Mechanism of High Voltage Pulsed Electric Field Pretreatment on Freezing Technology and Freeze-Drying Rate of Fruits and Vegetables[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2017: 1-2.
- [8] 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.
- [9] 王雪松,谢晶.不同解冻方式对冷冻竹荚鱼品质的影响[J].食品科学,2020,41(23):137-143.
WANG Xue-song, XIE Jing. Effects of Different Thawing Methods on the Quality of Frozen Horse Mackerel[J]. Food Science, 2020, 41(23): 137-143.
- [10] BEN AMMAR J, LANOISELLÉ J L, LÉBOVKA N I, et al. Impact of a Pulsed Electric Field on Damage of Plant Tissues: Effects of Cell Size and Tissue Electrical Conductivity[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1): E90-E97.
- [11] WU Jia-xin, JIA Xi-wu, FAN Kai. Recent Advances in the Improvement of Freezing Time and Physicochemical Quality of Frozen Fruits and Vegetables by Ultrasound Application[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(6): 3352-3360.
- [12] 吴新怡,潘志涛,朱吟非,等.不同解冻方式对西梅品质的影响[J].食品工业科技,2022,43(18):331-336.
WU Xin-yi, PAN Zhi-tao, ZHU Yin-fei, et al. Effect of Different Thawing Methods on Quality of Prunes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 331-336.
- [13] 方胜,孙学兵,陆守道.利用高压脉冲电场加速冰解冻的试验研究[J].北京工商大学学报(自然科学版),2003,21(4):43-45.
FANG Sheng, SUN Xue-bing, LU Shou-dao. The Study on the Acceleration Rule and the Principle of the Ice Thawing Processing by Hpef[J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2003, 21(4): 43-45.
- [14] XIN Ying, ZHANG Min, XU Bao-guo, et al. Research Trends in Selected Blanching Pretreatments and Quick Freezing Technologies as Applied in Fruits and Vegetables: A Review[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 57: 11-25.
- [15] 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.
LIU Xue-mei, MENG Xian-jun, LI Bin, et al. Effects of Different Thawing Methods on Quality Characteristics of Quick-Frozen Strawberries[J]. Food Science, 2014, 35(22): 276-281.
- [16] 章宁瑛,郇海燕,陈杭君,等.不同解冻方式对速冻

- 蓝莓果实品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 320-324.
- ZHANG Ning-ying, GAO Hai-yan, CHEN Hang-jun, et al. Effect of Different Thawing Methods on Quality of Frozen Blueberries[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 320-324.
- [17] CAI Lu-yun, CAO Min-jie, REGENSTEIN J, et al. Recent Advances in Food Thawing Technologies[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(4): 953-970.
- [18] 李勇, 苏世彦. 超高压在速冻食品加工中的应用[J]. 食品与机械, 2000, 16(5): 33-34.
- LI Yong, SU Shi-yan. Application of Ultra-High Pressure in Quick-Frozen Food Processing[J]. Food & Machinery, 2000, 16(5): 33-34.
- [19] 胡中海, 孙谦, 马亚琴, 等. 不同解冻方法对速冻温州蜜柑橘瓣品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(14): 123-126.
- HU Zhong-hai, SUN Qian, MA Ya-qin, et al. Effect of Different Thawing Methods on the Quality of Quick-Freezing Satsuma Mandarin (Citrus Unshiu) Segment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(14): 123-126.
- [20] PHOTHISSET S, CHAROENREIN S. Effects of Freezing and Thawing on Texture, Microstructure and Cell Wall Composition Changes in Papaya Tissues[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(2): 189-196.
- [21] XIAO Hong-wei, PAN Zhong-li, DENG Li-zhen, et al. Recent Developments and Trends in Thermal Blanching - a Comprehensive Review[J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(2): 101-127.
- [22] 王凤玉. 远洋渔获物(鱿鱼、秋刀鱼)冻藏和解冻过程品质变化规律研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016: 6-11.
- WANG Feng-yu. Study on Quality Change Law of Pelagic Catch (Squid and Saury) during Frozen Storage and Thawing[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2016: 6-11.
- [23] 李璐倩, 严琪格, 哈玉洁, 等. 不同解冻方法对牦牛肉品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 123-130.
- LI Lu-qian, YAN Qi-ge, HA Yu-jie, et al. Effects of Different Thawing Methods on the Quality Characteristics of Yak Meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 123-130.
- [24] HE Xiang-li, LIU Rui, NIRASAWA S, et al. Effect of High Voltage Electrostatic Field Treatment on Thawing Characteristics and Post-Thawing Quality of Frozen Pork Tenderloin Meat[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 245-250.
- [25] LI Jia-heng, SHI Ji-yong, HUANG Xiao-wei, et al. Effects of Pulsed Electric Field on Freeze-Thaw Quality of Atlantic Salmon[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 65: 102454.
- [26] LUNG C T, CHANG Chao-kai, CHENG Fang-chi, et al. Effects of Pulsed Electric Field-Assisted Thawing on the Characteristics and Quality of Pekin Duck Meat[J]. Food Chemistry, 2022, 390: 133137.
- [27] 方玲玲. 核磁共振技术应用于葛根淀粉晶体结构与老化特性的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017: 22-30.
- FANG Ling-ling. Study on Crystal Structure and Aging Characteristics of Pueraria Starch by NMR[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017: 22-30.
- [28] WANG Chen, SU Guan-qun, WANG Xin, et al. Rapid Assessment of Deep Frying Oil Quality as Well as Water and Fat Contents in French Fries by Low-Field Nuclear Magnetic Resonance[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(8): 2361-2368.
- [29] 孙颖瑛. 发酵酸鱼贮藏过程中品质变化及控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 15-19.
- SUN Ying-ying. Study on Quality Change and Control of Fermented Sour Fish during Storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020: 15-19.
- [30] 李斌, 康壮丽, 龚宸, 等. 基于低场核磁共振技术分析冷冻和冷却猪肉乳化香肠的品质差异[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 142-144.
- LI Bin, KANG Zhuang-li, GONG Chen, et al. The Difference Qualities of Frozen and Chilled Pork Sausage by Using Low Field Nuclear Magnetic Resonance(LF-NMR)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(24): 142-144.

责任编辑: 彭颖