

## 不同温度下低压静电场辅助冷冻对沙棘果品质的影响

张璐，董同力嘎，星全芳，王秀宽，特金微，温中平，李建梅，云雪艳

### Effect of Low Voltage Electrostatic Field-assisted Freezing on Quality of Seabuckthorn Fruit

ZHANG Lu, DONG Tongliga, XING Quanfang, WANG Xiukuan, TE Jinwei, WEN Zhongping, LI Jianmei, and YUN Xueyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040219>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 低压静电场辅助解冻对牛肉品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Assisted Thawing on Beef Quality

食品工业科技. 2024, 45(17): 48–56 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090023>

#### 低压静电场协同低温高湿解冻对牛肉嫩度和持水性的影响

Effects of Low Voltage Electrostatic Field Combined with Low Temperature and High Humidity Thawing on Beef Tenderness and Water Retention

食品工业科技. 2024, 45(20): 49–58 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110149>

#### 低压静电场处理对竹节虾(*Penaeus japonicus*)微冻贮藏过程中品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Treatment on the Quality of *Penaeus japonicus* during Microfreezing Storage

食品工业科技. 2020, 41(7): 1–6,12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.001>

#### 低压静电场处理对带鱼微冻贮藏期间品质变化影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field(LVEF)Treatment on the Quality Changes of *Trichiurus lepturus* during Micro-frozen Storage

食品工业科技. 2020, 41(23): 277–283 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019110043>

#### 基于低压静电场技术(LVEF)协同低温对舟山杨梅保鲜过程中品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Combined with Low Temperature on Quality of Zhoushan Bayberry during Fresh-keeping

食品工业科技. 2020, 41(7): 265–270 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.044>

#### 高压静电场处理对鲜切黄甜竹笋冷藏下品质的影响

Effects of High-Voltage Electrostatic Field ( HVEF ) Treatment on the Quality of Fresh-Cut Bamboo Shoots (*Acidosasa edulis*) During Cold Storage

食品工业科技. 2021, 42(23): 319–325 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120141>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张璐, 董同力嘎, 星全芳, 等. 不同温度下低压静电场辅助冷冻对沙棘果品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 120–127. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040219

ZHANG Lu, DONG Tongliga, XING Quanfang, et al. Effect of Low Voltage Electrostatic Field-assisted Freezing on Quality of Seabuckthorn Fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 120–127. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040219

· 研究与探讨 ·

# 不同温度下低压静电场辅助冷冻对沙棘果品质的影响

张 璐<sup>1</sup>, 董同力嘎<sup>1</sup>, 星全芳<sup>1</sup>, 王秀宽<sup>2</sup>, 特金微<sup>2</sup>, 温中平<sup>2</sup>, 李建梅<sup>2</sup>, 云雪艳<sup>1,\*</sup>

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018;

2. 鄂尔多斯市高原圣果生态建设开发有限公司, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

**摘要:** 针对普通冻结方式会使沙棘果解冻后品质变差, 营养物质流失等问题。将低压静电场 (Low Voltage Electrostatic Field, LVEF) 辅助冷冻技术应用于沙棘果冷冻加工中, 研究其辅助冷冻对沙棘果冻结品质的影响, 以冻结曲线、水分损失率、冰晶形态、黄酮含量、多酚含量、沙棘果组织微观结构等为指标, 探究在不同温度下 ( $-20$ 、 $-40$ 、 $-80$  °C) LVEF 辅助冷冻和普通冷冻沙棘果品质的变化规律。结果表明, 低压静电场辅助冷冻提高了沙棘果的冻结速率, 改变了冰晶形态及分布, 减轻了果实组织微观结构的机械损伤, 减少了解冻后的汁液流失。在  $-20$ 、 $-40$ 、 $-80$  °C 温度下普通冷冻的沙棘果在解冻后, 黄酮含量分别为 2029、2212、2324 mg/100 g, LVEF 辅助冷冻的沙棘果解冻后, 黄酮含量分别为 2156、2284、2373 mg/100 g。静电场辅助冷冻的黄酮含量显著高于普通冷冻 ( $P<0.05$ )。LVEF 辅助冷冻可以更大程度地保留沙棘果中的营养成分, 有效改善果实的冻藏品质。

**关键词:** 低压静电场, 沙棘果, 冷冻, 微观结构, 解冻品质

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)06-0120-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040219

本文网刊:



## Effect of Low Voltage Electrostatic Field-assisted Freezing on Quality of Seabuckthorn Fruit

ZHANG Lu<sup>1</sup>, DONG Tongliga<sup>1</sup>, XING Quanfang<sup>1</sup>, WANG Xiukuan<sup>2</sup>, TE Jinwei<sup>2</sup>, WEN Zhongping<sup>2</sup>, LI Jianmei<sup>2</sup>, YUN Xueyan<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Ordos Plateau Shengguo Ecological Construction and Development Co., Ltd., Ordos 017000, China)

**Abstract:** In order to address the deterioration of quality of sea buckthorn berries after the common freezing-thawing, low-voltage electrostatic field (LVEF)-assisted freezing technology was used for sea buckthorn berries freezing. The freezing curves, water loss rate, ice crystal morphology, flavonoid content, polyphenol content, and microstructure of sea buckthorn berries were recorded to evaluated the quality changes of sea buckthorn berries treated by the LVEF-assisted freezing and the ordinary freezing at different temperatures ( $-20$ ,  $-40$ ,  $-80$  °C). Results showed that LVEF-assisted freezing improved the freezing rate of sea buckthorn berries, changed the morphology and distribution of ice crystals, alleviated the mechanical damage to the microstructure of the fruit tissues, and reduced the loss of juice after thawing. The flavonoid contents of sea buckthorn berries frozen at  $-20$ ,  $-40$  and  $-80$  °C were 2029, 2212 and 2324 mg/100 g after thawing, and those of sea buckthorn berries frozen with LVEF-assisted freezing were 2156, 2284 and 2373 mg/100 g after thawing. The flavonoid content of electrostatic field-assisted freezing was significantly higher than that of ordinary freezing ( $P<0.05$ ). LVEF-assisted freezing can retain the nutrients in sea buckthorn berries to a greater extent, and effectively improve the

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目 (2023YFHH0079)。

作者简介: 张璐 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 3462435035@qq.com。

\* 通信作者: 云雪艳 (1990-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品包装与安全控制技术研究, E-mail: yun\_imau@163.com。

frozen quality of the berries.

**Key words:** low-voltage electrostatic field; sea buckthorn berries; freezing; microstructure; thawing quality

低压静电场 (Low Voltage Electrostatic Field, LVEF) 作为一种新兴的物理保鲜技术, 因其成本低、操作简单等优点, 已成为食品保鲜和加工领域的研究热点。LVEF 产生电场效应增强水分子的动能, 可以缩短冻结时间, 减轻冰晶形成对细胞的破坏, 减少汁液流失<sup>[1-2]</sup>。肉品和海鲜的解冻过程中使用 LVEF 辅助, 可以有效缩短解冻时间, 减少汁液流失, 提高其解冻品质<sup>[3-5]</sup>。采用合适的 LVEF 辅助竹笋冷冻, 缩短了冻结时间, 改善竹笋的冻结品质<sup>[6]</sup>。将 LVEF 和气调包装 (MAP) 技术相结合来延长双孢菇的货架期, 由于 LVEF 可以控制酶活性, 降低呼吸速率和微生物感染, 降低 CO<sub>2</sub> 浓度, 更好地维持细胞膜的完整性, 延长了双孢菇的贮存时间<sup>[7]</sup>。另外, 不同的冻结温度会产生不同的冻结速率, 同样会影响果蔬的冻结品质<sup>[8]</sup>。Kang 等<sup>[9]</sup> 研究了不同冷冻方式对韩国白泡菜品质的影响, 结果发现超低温冷冻可以增加冷冻食品中不易流动水的数量, 减少解冻后的汁液流失, 储存在 -40~ -60 ℃ 的食品比储存在 -20 ℃ 的食品具有更好的品质和更多的功能成分。

沙棘是一种落叶性灌木果树, 具有耐旱性强、耐土地贫瘠能力强、成林快等优点<sup>[10-11]</sup>, 对防沙护林、改善土壤环境、防止水土流失有重要作用<sup>[12]</sup>。沙棘中含有酚类、多糖、黄酮等多种活性物质, 其中维生素 C 含量较为丰富, 被誉为“维生素 C 之王”<sup>[13-14]</sup>。沙棘具有抗氧化<sup>[15-16]</sup>、促进消化<sup>[17]</sup>、改善“三高”<sup>[18]</sup>、杀菌抗炎<sup>[19]</sup>、抑瘤防癌<sup>[17]</sup> 等多种生理功能。沙棘果皮薄而水分多, 在采摘的过程中极易损伤果皮, 导致水分及营养物质的流失, 受到微生物侵染而腐败变质。所以, 目前常用的采摘方式是冷冻剪截果枝后再脱果采收, 采后要及时降温至 3~6 ℃ 再次贮藏<sup>[20]</sup>, 再将沙棘果置于 -18 ℃ 的条件下长期保存<sup>[21]</sup>, 以抑制微生物的滋生, 延长其保存时间。然而, 常规低温冷冻的冻结速率相对较慢, 在冻结过程中易形成粗大且无规则的冰晶<sup>[22]</sup>, 会对沙棘果的品质产生影响, 易导致其内部纤维结构破坏, 解冻后营养伴随水分流失而流失。因此, 提高冻结速率和控制冰晶尺寸及分布是传统低温冷冻要解决的两大问题。

本实验以沙棘果为研究对象, 在不同温度下 (-20、-40、-80 ℃) 分别将 LVEF 应用于沙棘果的冷冻过程。探究低压静电场在不同温度下辅助冷冻对沙棘果冻结效率、冰晶分布、营养成分流失等冻结特性的影响, 为低压静电场在不同温度下辅助冷冻果蔬加工技术提供理论依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

沙棘果 秋季新鲜中国沙棘, 产地河北省张家

口市沽源县, 由内蒙古鄂尔多斯市生态建设开发有限公司采摘; 硝酸铝(分析纯)、无水草酸(分析纯)、福林酚(分析纯)、2,6-二氯靛酚(98%)、L-抗坏血酸(标准品)、电子显微镜固定液(2.5% 戊二醛 pH7.2~7.1)、磷酸盐缓冲液 0.1 mmol/L pH7.5、4% 多聚甲醛固定液 麦克林化学试剂有限公司; 芦丁分析标准品(≥97%) 上海源叶生物试剂公司。

TM400 电子扫描显微镜 南通欣跃实验仪器设备有限公司; DM3000 光学显微镜 德国徕卡公司; NMI20 核磁共振成像分析仪 上海纽迈电子科技有限公司; CR-20 色差仪 日本 Konica Minoita Holdings 公司; 中佳-HC-2518R 高速冷冻离心机 安徽中科中佳科学仪器有限公司; MEV 冷冻切片机 德国塞利(SLEE); DENBA+鲜度保持电场装置由静电场发生装置(交流电压 220 V, 50/60 Hz)和放电板(43 cm×23 cm)组成, 实验装置如图 1 所示。

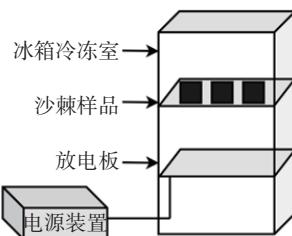


图 1 低压静电场冷冻实验装置  
Fig.1 Low-voltage electrostatic field freezing experimental setup

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品处理及分组 挑选大小均匀、形态饱满、色泽良好、无病虫害的新鲜沙棘果, 将其放置在 4 ℃ 的环境中冷藏备用。实验时从冰箱中取出沙棘果, 用清水冲洗掉表面泥沙, 再将沙棘果表面的水分吸干, 放置在 60 个正方体的硅胶模具中(每格的尺寸为 5 cm×5 cm×5 cm)备用, 随机分为 6 组, 每组 10 个。将装好的沙棘果分别放置在 -20、-40、-80 ℃ 的冰箱中进行冷冻作为处理组。在冷冻过程中每种温度设置两组实验, 分为静电场辅助冷冻和普通冷冻, 编号为 -20 ℃、-20 ℃+、-40 ℃、-40 ℃+、-80 ℃、-80 ℃+(其中“+”表示静电场辅助冻结), 以 4 ℃ 环境中保存的新鲜沙棘果作为对照组(标记为 CK)。

1.2.2 冻结曲线的测定 利用 JK-8U 型多通道温度计, 对沙棘果冷冻过程中的温度进行测量, 并将其置于方型模具内, 以 3 s 为单位, 对其中心温度进行测量。当样品中心温度下降到 -18 ℃ 后, 停止检测, 完成冻结。在此基础上, 将冷冻后的样品转入 4 ℃ 冰箱中进行解冻, 待其解冻完成后, 对其进行各项指标

的测定。

1.2.3 冰晶形态观察 冻结结束后, 取不同冷冻处理组的沙棘果样品放置在 4% 多聚甲醛固定液中, 固定 48 h 后, 放入脱水盒中, 进行乙醇梯度脱水, 包埋后在 -30 ℃ 的冷冻切片机下进行切片<sup>[6]</sup>。切片厚度为 6 μm, 经结晶紫染色, 中性树胶封片后, 用光学显微镜进行观察。

1.2.4 水分损失率的测定 取不同冻结处理组的沙棘果样品, 称完重量后, 马上在 4 ℃ 的冰箱里解冻 24 h, 再用吸水纸擦掉沙棘果表面的水分, 再将其重量进行称量, 按照以下公式来算出解冻后沙棘果的水分损失率。

$$\text{水分损失率}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

式中:  $m_1$  为沙棘果样品解冻前质量, g;  $m_2$  为沙棘果样品解冻后质量, g。

#### 1.2.5 黄酮标准曲线的绘制及含量的测定

1.2.5.1 标准曲线的绘制 标准曲线的绘制参考文献 [23] 进行, 用 1 cm 比色皿, 以试剂空白调节零点, 在波长 510 nm 处测定吸光度, 以吸光度值对应含量绘制标准曲线。

1.2.5.2 黄酮含量的测定 将新鲜沙棘果和解冻后的不同冻结处理组的沙棘果样品进行清洗, 沥干水分后, 加提取液(60% 乙醇)用破壁机打浆得到沙棘汁, 先用纱布进行过滤, 过滤得到的沙棘汁经过 8000 r/min 离心 5 min 后, 取上清液备用, 在波长 510 nm 处测定吸光度, 根据标准曲线算出试样溶液的芦丁质量。

$$W(\text{mg}/100 \text{ g}) = \frac{a \times c \times v}{m} \times 100$$

式中:  $a$  为测定液稀释倍数;  $c$  为测定液中总黄酮浓度, mg/mL;  $v$  为提取液体积, mL;  $m$  为沙棘果的重量, g;  $W$  为黄酮含量, mg/100 g。

1.2.6 多酚标准曲线的绘制及含量的测定 参照 T/AHFIA 005-2018《植物提取物及其制品中总多酚含量的测定分光光度法》进行检测。

1.2.7 总酸含量的测定 参照 GB 12456-2021《食品中总酸的测定酸碱指示剂滴定法》进行检测。

1.2.8 抗坏血酸含量的测定 参照 GB 5009.86-2016《食品中抗坏血酸的测定 2,6-二氯靛酚滴定法》进行检测。

1.2.9 水分分布的测定 取新鲜沙棘果和不同冷冻处理组解冻后的沙棘果, 挑选大小重量接近的样品, 用保鲜膜包裹, 减少水分流失。然后置于核磁共振管底部, 采用低场核磁共振技术对不同冻结方式沙棘果的水分分布进行检测。采用 CPMG 序列测定样品横向弛豫时间  $T_2$ , 每个处理组样品重复测定 3 次。主要参数为: 核磁管腔体温度 30 ℃, 采样频率 100 kHz 主频 20 MHz, 回波个数 4000, 频率偏置 758359 Hz,

90 度脉冲 7.2 μs, 180 度脉冲 14.32 μs, 累加次数 32, 模拟增益 12。对扫描后的曲线进行反演, 得到样品的  $T_2$  分布情况。磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)分析: 脉冲序列 3DHSE, 模拟增益 6, 数字增益 3, 重复采样次数 3。

1.2.10 沙棘果微观结构观察 采用电镜观察不同冷藏和冷藏前的沙棘果微观结构进行观测和拍照。将沙棘样品在 4 ℃ 下用电子显微镜固定液固定 2 h。将固定好的样品用 PBS 缓冲液冲洗 3 次。然后将沙棘果依次浸泡在不同浓度的乙醇中梯度脱水, 然后在冻干机上干燥。将处理好样品粘附于导电碳膜的双面胶纸上, 用扫描电镜进行观察。

### 1.3 数据处理

每组实验重复 3 次, 结果以平均值±标准差表示。采用 IBM SPSS Statistics27.0 软件进行数据统计分析, 采用最小显著性差异(Least Significance Difference, LSD)法进行显著性分析,  $P<0.05$  表示差异显著, 采用 Origin 2021 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 低压静电场在不同温度下辅助冷冻对冻结速率的影响

冻结速率是影响果蔬冻藏质量的关键因素<sup>[24]</sup>, 如图 2 所示, 三个温度梯度(-20、-40、-80 ℃)的冻结曲线变化趋势大体相同, 均由三个阶段组成。第一阶段(I)沙棘果从初始温度迅速降至冰点温度, 此过程主要放出显热, 降温速度较快; 第二阶段(II)果实温度从冰点温度降低至-5 ℃ 左右, 此时果实中大部分水结成冰, 放出大量潜热, 此阶段降温速度比较慢; 第三阶段(III)从-5 ℃ 左右下降至-18 ℃, 此时放出的热量一部分是由于冰的降温, 另一部分是由于残留少量的水继续结冰, 此阶段降温比较快。普通冷冻 -20、-40、-80 ℃ 所需冻结时间为 870、780、155 min。LVEF 辅助冷冻在 -20、-40、-80 ℃+ 所需冻结时间为 840、750、142 min。LVEF 辅助冷冻的冻结速率明显高于普通冷冻。这可能是由于静电场对水分子的极化作用能降低水分子成核自由能,

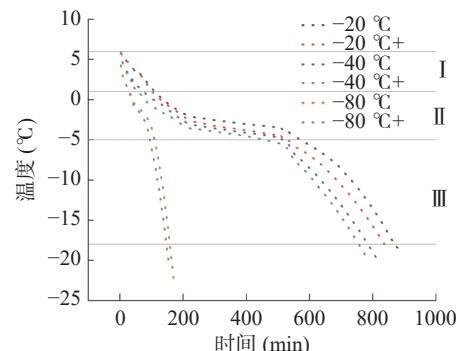


图 2 低压静电场辅助冷冻对沙棘果冻结曲线的影响

Fig.2 Effect of low voltage electrostatic field assisted freezing on freezing curve of sea buckthorn fruit

进而促进冰核的产生,有利于最大冰晶形成区的快速通行,提高冻结效率<sup>[6]</sup>。

## 2.2 低压静电场辅助冷冻对沙棘果冰晶形态的影响

在冷冻过程中,水分结冰会在果蔬组织中生成形状不规则的针状冰晶,这些冰晶会引起果蔬细胞的力学损伤,并引起细胞结构的破坏<sup>[25]</sup>。由图 3 可得,鲜沙棘果实的组织结构较为均匀,相对致密,细胞间隙较小。沙棘果冻结过程中,冰晶在组织内持续生成,并逐步变大,造成果实组织和周边细胞结构的永久损伤,并在果实内部形成不规则的空洞。在非静电场作用下,沙棘果实内的冰晶尺寸大、排列紊乱、细胞损伤程度较高。LVEF 组的冰晶体积较小,分布较均匀,细胞损伤较小,组织结构保持较好。在相同温度下有 LVEF 处理组的沙棘果品质明显优于普通冷冻组。其中-80 °C+的形态与新鲜沙棘果组织形态相近;这可能是由于在低压静电场和超低温的双重作用下,沙棘果样品冻结速率提高,促进了冰核的形成,使冰晶的生长速度降低,形成的冰晶体积小、分布均匀<sup>[26]</sup>。由此可见,LVEF 辅助冷冻,可以减少粗大冰晶的形成,降低其对沙棘果细胞结构的破坏,该结论

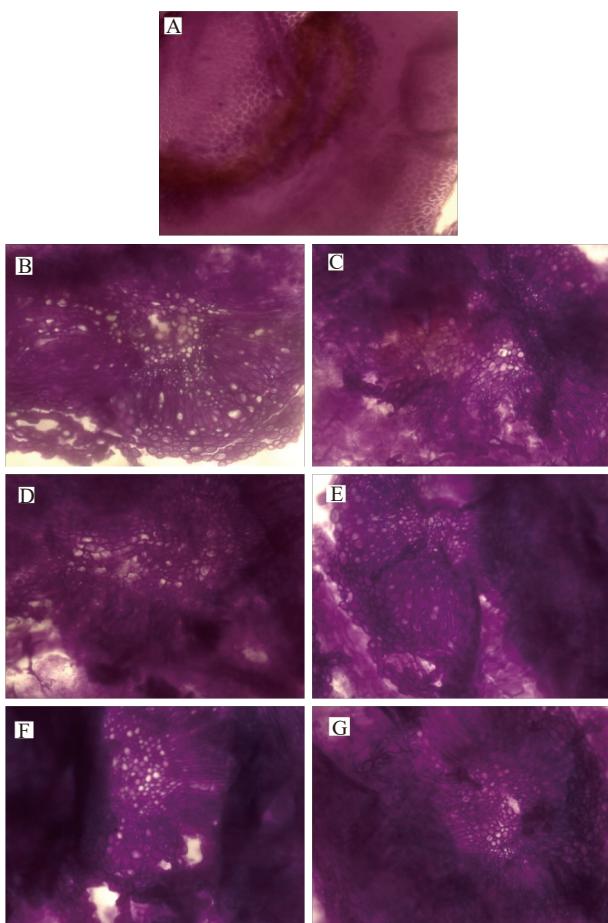


图 3 低压静电场辅助冷冻对沙棘果冰晶形态的影响(40×)

Fig.3 Effect of low voltage electrostatic field assisted freezing on ice crystal morphology of sea buckthorn fruit (40×)

注: A: CK; B: -20 °C; C: -20 °C+; D: -40 °C; E: -40 °C+; F: -80 °C; G: -80 °C+。

与刘蕊等<sup>[3]</sup>探究 LVEF 对冷冻猪肉冰晶生长的影响结论相似。

## 2.3 低压静电场辅助冷冻对沙棘果水分损失率的影响

沙棘果冷冻过程中,由于水的结晶会导致体积的增大,造成组织和细胞破坏,在解冻之后,会造成营养成分的流失<sup>[27]</sup>。水分损失率是评价果蔬冻结品质的重要指标,其受冰晶生成、细胞含水量和组织保水能力的影响<sup>[17]</sup>。由图 4 可知,普通组-20、-40、-80 °C 的损失率分别为 18.96%、14.17%、10.59%。LVEF 组-20、-40、-80 °C+ 的损失率分别为 14.44%、11.44%、8.59%。在相同温度下 LVEF 组的水分损失率显著低于普通冷冻组( $P<0.05$ )。LVEF 辅助冻结减少了果实的汁液流失,其中温度在-20 °C 变化最明显,原因可能是在-20 °C 的条件下,沙棘果中的水分缓慢冻结,形成的冰晶体积最大、分布杂乱、形状最无序,所以解冻后水分的损失率最大<sup>[27]</sup>。而-20 °C+ 组的水分损失率有明显的下降,可能是在 LVEF 的作用下,冻结速率加快,形成的冰晶形状较小,分布均匀,对细胞和组织的破坏较小,减少了汁液流失<sup>[7]</sup>。

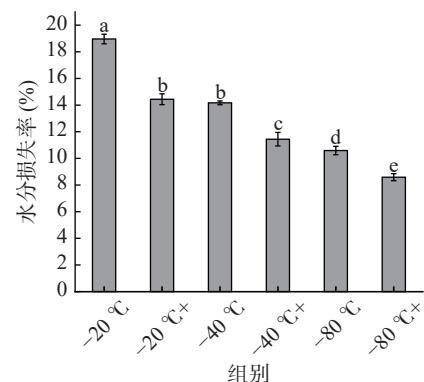


图 4 低压静电场辅助冷冻对沙棘果水分损失率的影响  
Fig.4 Effect of low voltage electrostatic field assisted freezing on water loss rate of seabuckthorn fruit

注: 不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 图 5~图 8 同。

## 2.4 低压静电场辅助冷冻对沙棘果黄酮含量的影响

沙棘果中黄酮含量丰富,但是在冻结过程中,由于水结晶体积增大导致沙棘果中的组织和细胞损伤,在解冻后,水分流失伴随黄酮含量减少<sup>[28]</sup>。由图 5 可知,新鲜沙棘果中黄酮含量为 2432.67 mg/100 g,普通冷冻组-20、-40、-80 °C 的黄酮含量分别为 2029、2212、2324 mg/100 g。LVEF 组-20、-40、-80 °C+ 黄酮含量分别为 2156、2284、2373 mg/100 g。LVFE 组沙棘果的黄酮含量显著高于普通冻结组( $P<0.05$ )。原因可能是静电场的添加使得在冻结过程中形成的冰晶较小、排列相对整齐对沙棘果中的细胞和组织损伤较小,细胞和组织形状较为完整<sup>[5]</sup>。静电场辅助冻结减少了沙棘果中黄酮的损失,更多的保留了沙棘果中的营养成分。

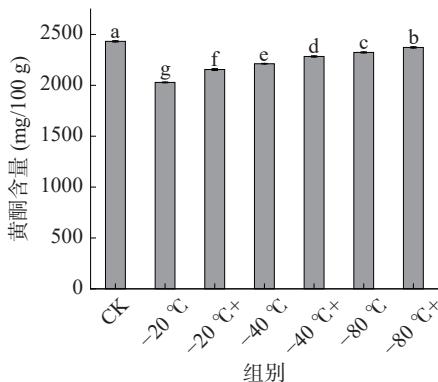


图 5 低压静电场辅助冷冻对沙棘果中黄酮含量的影响

Fig.5 Effect of low voltage electrostatic field assisted freezing on flavonoid content in seabuckthorn fruit

## 2.5 低压静电场辅助冷冻对沙棘果多酚含量的影响

多酚类物质是沙棘果中的主要营养物质, 多酚类物质可以起到降低血脂, 保护心血管健康, 预防心理血管疾病等作用<sup>[29]</sup>。由图 6 可知, 新鲜沙棘果中的多酚含量最多为 1826 mg/100 g, 在同一冻结温度下, LVEF 组的多酚含量显著高于普通冷冻组中的多酚含量( $P<0.05$ )。该结果与 Gonçalves 等<sup>[30]</sup>对冷冻蔬菜的研究结果相似。由于多酚物质大部分为水溶性物质, 在普通冷冻的过程中, 沙棘果中的水分形成不规则、不均匀、较大的冰晶, 破坏了沙棘果中的纤维结构, 导致沙棘果的持水能力下降<sup>[8]</sup>。在解冻过程中有大量的水分流失, 多酚含量随着水分的流失而下降。在 LVEF 辅助冻结过程中, 水分的损失率在明显减少, 所以多酚的含量也得到了保留, 由此实验证明, 在沙棘果冻结过程中, 添加静电场辅助冻结可以减少多酚含量的损失, 有助于提升沙棘果的品质。

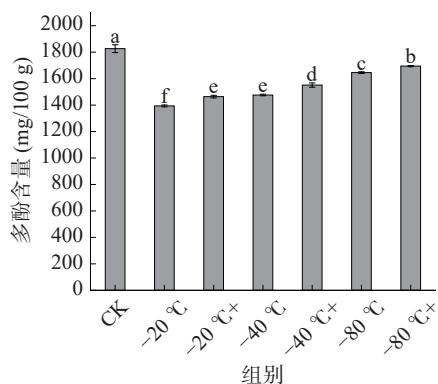


图 6 低压静电场辅助冷冻对沙棘果中多酚含量的影响

Fig.6 Effect of low voltage electrostatic field assisted freezing on polyphenol content in seabuckthorn fruit

## 2.6 低压静电场辅助冷冻对沙棘果总酸含量的影响

沙棘果的口味偏酸, 主要来源于果实中的有机酸, 例如苹果酸, 柠檬酸等。这些有机酸可以刺激胃酸分泌, 从而起到促进消化的作用<sup>[31]</sup>。由图 7 可知, 新鲜沙棘果中的总酸含量最多为 1610 mg/100 g, 在不同冻结温度下, 冻结温度越低, 总酸的含量越高, 这是由于冻结温度为-80 °C 对于新鲜沙棘果来说属于

速冻过程。在此过程中, 水分形成的冰晶较小, 分布较为均匀, 对沙棘果中的细胞损伤较小。在同一冻结温度下, LVEF 辅助冻结的沙棘果总酸含量显著高于普通冷冻组( $P<0.05$ )。其中-80 °C+组总酸保留最多, 最接近新鲜沙棘果, 与王留言等<sup>[8]</sup>在-80 °C 的冷冻温度下脐橙的冻结品质最好的结果一致。这可能是由于在超低温和静电场辅助的双重作用下, 使得该组沙棘果在冻结过程中形成的冰晶最小、排列最整齐, 对细胞的损伤较小<sup>[32]</sup>, 使得沙棘果中的有机酸更好保留。

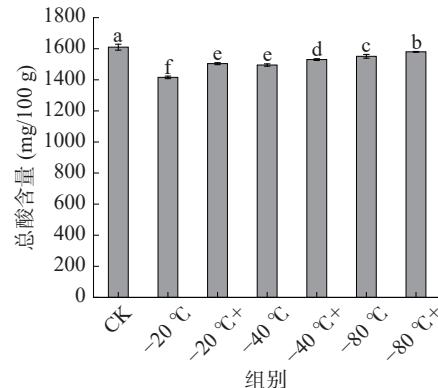


图 7 低压静电场辅助冷冻对沙棘果中总酸含量的影响

Fig.7 Effect of low voltage electrostatic field assisted freezing on total acid content in seabuckthorn fruit

## 2.7 低压静电场辅助冷冻对沙棘果抗坏血酸含量的影响

沙棘果中的维生素 C 含量是猕猴桃的 5~8 倍。维生素 C 有抗氧化、增强免疫力等积极作用<sup>[33]</sup>。由图 8 可知, 新鲜沙棘果中抗坏血酸含量高达 901 mg/100 g, 在普通冻结组中, -20 °C 的温度下, 果实中抗坏血酸含量最少, 只有 509 mg/100 g, 而 LVEF 辅助冻结之后-20 °C+的抗坏血酸含量提高为 605 mg/100 g。LVEF 辅助冻结的沙棘果抗坏血酸含量显著高于普通冷冻组( $P<0.05$ )。其原因与冷冻过程中冰晶的形成有关, 冰晶的形成破坏了沙棘果的纤维结构和细胞, 使沙棘果的持水能力下降<sup>[9]</sup>。而抗坏血酸是一种极易溶于水的维生素, 会随着水分的流失而减

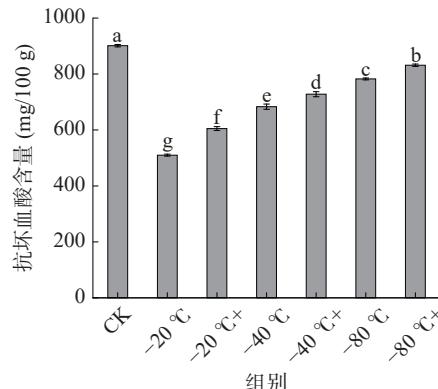


图 8 低压静电场辅助冷冻对沙棘果中抗坏血酸含量的影响

Fig.8 Effect of low voltage electrostatic field assisted freezing on ascorbic acid content in seabuckthorn fruit

少。LVEF 辅助冷冻会使得沙棘果在冻结过程中形成的冰晶较小, 并且分布较为均匀, 降低了冰晶对沙棘果组织结构的损伤, 使得抗坏血酸更好地保留下来。

## 2.8 低压静电场辅助冷冻对沙棘果组织中水分分布的影响

$T_2$  值愈低, 则说明水分与组织间的结合力愈强, 水分流动性愈差; 利用松弛时间得到的峰面积来表征含水量<sup>[34-35]</sup>。由图 9 可知, 新鲜沙棘果的  $T_2$  反演图谱上有两个峰, 即第 1 个峰表示沙棘果中的不易流动水( $T_{21}$ : 1~100 ms), 第 2 个峰则表示沙棘果中的自由水( $T_{22}$ : 100~1000 ms), 其中不易流动水的峰面积越大, 沙棘果的组织结构越稳定。对比可得新鲜沙棘果的总体峰面积最大, 表明鲜果的含水量最大。其他冻结温度下水分都有损失, 在-20 ℃ 普通冷冻的分峰面积最小, 含水量也最低。同时它的  $T_2$  反演图谱上只有一个峰, 这个表明沙棘果中的不易流动水含量较少, 在该冻结温度下沙棘果的纤维结构破坏较为严重, 持水力下降。在-40 ℃ 的冻结温度下, 普通冷冻的沙棘果  $T_2$  反演图谱也只有一个峰, 但是 LVEF 辅助冷冻的沙棘果  $T_2$  反演图谱出现两个峰, 说明在该

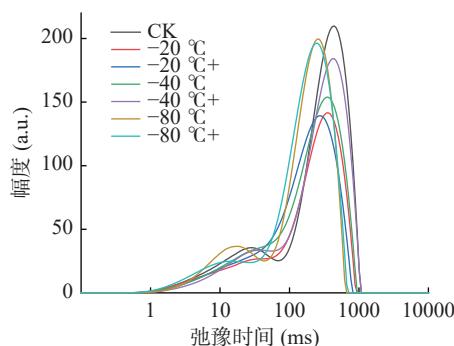


图 9 低压静电场辅助冷冻对沙棘果中水分横向弛豫时间  $T_2$  的影响

Fig.9 Effect of low pressure electrostatic field assisted freezing on transverse relaxation time  $T_2$  of water in sea buckthorn fruit

温度下 LVEF 辅助冻结不仅可以减少沙棘果中的水分流失, 同时可以保证部分结合水保留下。所以普通冷冻与 LVEF 辅助冷冻相比, 冻结速度慢, 形成的冰晶粗大, 对沙棘果细胞的破坏能力大, 从而导致大分子物质与水的结合发生变化导致沙棘果的持水力下降, 该结论与水分损失率和冷冻后冰晶大小形成图结果一致。在同一冻结温度下, LVEF 处理组的峰面積均大于非静电场辅助冷冻处理组, 这可能是由于在冻结过程中, 冰晶的形成对沙棘果的结构造成了一定的损伤, 从而导致一部分的水分在解冻过程中从沙棘果的组织中渗出, 产生了水分的损失<sup>[32]</sup>。LVEF 辅助冷冻可以减少沙棘果组织所受到的冻结损伤, 从而减少汁液的流失, 因此静电场辅助冷冻组的含水量相对较高。

通过样品反射的信号强度获得高分辨率氢质子密度图像用来检测沙棘果样品中的水分分布情况。颜色越亮, 表明沙棘果水分含量越高, 红色越多, 则表明水分的含量越低<sup>[36]</sup>。如图 10 所示, 新鲜沙棘果中水分含量较高, 样品图呈现亮黄色, 色泽分布比较均匀, 且在图像中可以看到大面积的明亮区域。在-20 ℃ 的冻结温度下, 可以明确的看到, 普通冷冻组的沙棘果的颜色呈大面积红色, 表明水分含量较少。与新鲜沙棘果相比, 经过冷冻的沙棘果图像在不同程度上都呈现出了红色, 说明在冻结的过程中沙棘果中的水分都有所流失。其中在同一冻结温度下, 普通冷冻的沙棘果图像颜色红色居多, 黄色较少。LVEF 冷冻组的氢质子密度图像同普通冷冻组相比黄色区域明显增加。由此可见, 静电场辅助冷冻处理的沙棘果可以较好的保留沙棘果中的水分, 氢质子密度图像反应的颜色变化与水分横向弛豫时间  $T_2$  结果一致, 均表明低压静电场辅助冷冻可以减少水分的流失, 提高沙棘果的冻藏品质。

## 2.9 低压静电场辅助冷冻对沙棘果组织微观结构的影响

采用 SEM 技术, 对新鲜沙棘果和冷冻处理后的

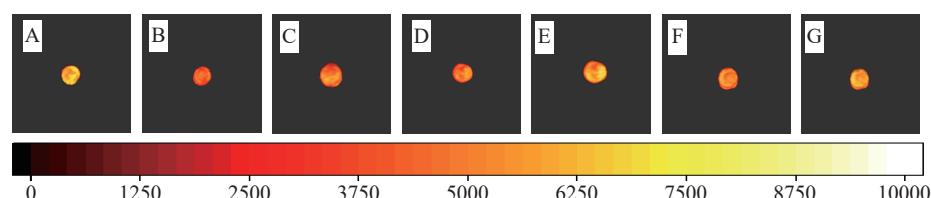


图 10 不同处理条件下沙棘果氢质子密度加权伪彩图

Fig.10 Pseudocolor map with weighted hydrogen proton density of seabuckthorn fruit under different treatment conditions

注: A: CK; B: -20 °C; C: -20 °C+; D: -40 °C; E: -40 °C+; F: -80 °C; G: -80 °C+。

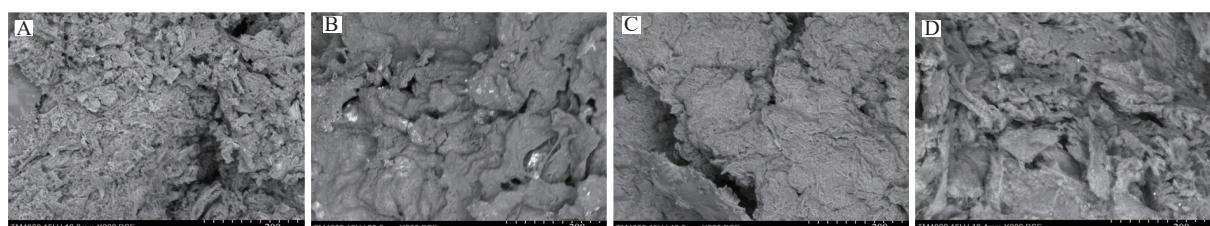




图 11 不同处理后沙棘果的微观结构(200×)

Fig.11 Microstructure of sea buckthorn fruit with different treatments (200×)

注: A: CK; B: -20 °C; C: -20 °C+; D: -40 °C; E: -40 °C+; F: -80 °C; G: -80 °C+。

果实进行了微观结构的观察，并对果实的微观结构和破损程度进行了分析。如图 11 所示，结果表明，新鲜沙棘果的细胞结构较为完整，排列紧密，细胞间距小；而冷冻沙棘果则表现出严重的细胞变形和破损。结果表明，在相同的温度条件下，静电场辅助冻藏得到的沙棘果实组织结构较普通冷冻处理组，细胞排列更加紧凑，细胞间隙更小，细胞壁受损程度更小。静电场辅助冻结能明显提高沙棘果的显微结构，且能有效地保持果实中的养分含量。该结果与郭家刚等<sup>[6]</sup>探究低压静电场辅助芦笋冷冻中发现的现象类似。

### 3 结论

本研究将低压静电场辅助冷冻技术应用于沙棘果冷冻加工保存中。探究了在不同温度下，低压静电场辅助冷冻对沙棘果冻结特性及品质的影响。分别在-20、-40、-80 °C 的温度下冻结沙棘果样品，研究低压静电场辅助冷冻与普通冷冻对沙棘果品质的影响。研究发现在相同温度下低压静电场辅助冷冻可以缩短冷冻时间，改善沙棘果冻结后的品质，使沙棘果中存在的营养物质尽可能地保留下来。其潜在的机理可能是在静电场的作用下，冻结时改变了冰晶的生长模式从而缩短了沙棘果的冻结时间提高了冻结速率，有效的抑制了无规则、杂乱的冰晶生长。形成的冰晶较小且分布较为均匀，减轻了杂乱冰晶生长对沙棘果微观组织结构的机械损伤，较好的保持了沙棘果细胞的原有形态，改善冷冻后沙棘果的品质。本研究为低压静电场辅助果蔬冷冻技术提供了理论依据和参考价值，为提高沙棘果的冻藏品质提出了新思路。尽管在沙棘的冻藏中该技术表现出色，但其在其他果蔬冷冻贮藏的效果和稳定性仍需进一步验证。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 李甜, 张珊, 李孟华, 等. 低压静电场对凡纳滨对虾多酚氧化酶性质影响 [J]. 食品研究与开发, 2022, 43(19): 52–58. [LI Tian, ZHANG Shan, LI Menghua, et al. Effect of low-voltage electrostatic field on polyphenol oxidase properties of *Penaeus vannamei* [J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(19): 52–58.]
- [2] 乔雪, 乔雅洁, 付慧鑫, 等. 低压静电场辅助解冻对牛肉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 48–56. [QIAO Xue, QIAO Yajie, FU Huixin, et al. Effect of low voltage electrostatic field assisted thawing on beef quality [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2024, 45(17): 48–56.]
- [3] 刘蕊, 闫琳婧, 赵明博, 等. 低压静电场对冷冻猪肉冰晶生长影响的试验研究 [J]. 农产品加工, 2022(17): 20–24. [LIU Rui, YAN Linjing, ZHAO Mingbo, et al. Experimental study on the effect of low voltage electrostatic field on the growth of ice crystals in frozen pork [J]. *Agricultural Products Processing*, 2022(17): 20–24.]
- [4] YONG X, BO C, JIE G, 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.
- [5] WU G Y, YANG C, LIN H X, et al. To what extent do low-voltage electrostatic fields play a role in the physicochemical properties of pork during freezing and storage? [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(3): 1721–1733.
- [6] 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-pressure electrostatic field-assisted freezing on the quality of bamboo shoots [J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 82–88.]
- [7] LIU Fengyi, XU Yaozong, ZENG Min, et al. A novel physical hurdle technology by combining low voltage electrostatic field and modified atmosphere packaging for long-term stored button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2023, 90: 103514.
- [8] 王留言, 任婧楠, 秦雨晴, 等. 不同速冻温度对秭归脐橙果实组织质量特性和微观结构的影响 [J/OL]. 食品工业科技: 1–13[2024-06-03]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120365>. [WANG Liuyan, REN Jingnan, QIN Yuqing, et al. Effects of different quick-freezing temperatures on tissue quality characteristics and microstructure of zigui navel orange fruit [J/OL]. *Food Industry Science and Technology*: 1–13[2024-06-03]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120365>.]
- [9] KANG M, PARK Y S, YUN M S, et al. Effects of sequential combination of cryogenic immersion freezing and ultra-cold frozen storage on the quality of Korean white kimchi [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2024, 93: 103642.
- [10] 崔立柱, 付依依, 刘士伟, 等. 沙棘营养价值及产业发展概况 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42(11): 218–224. [CUI Lizhu, FU Yiyi, LIU Shiwei, et al. Nutritional value and industrial development of sea buckthorn [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(11): 218–224.]
- [11] MEI D Z G, MA X J, FU F F, et al. Research status and development prospects of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) Resources in China [J]. *Forests*, 2023, 14(12): 2461.
- [12] 陈晓娜, 赵纳祺, 俞潇, 等. 浅谈我国沙棘属植物生态适应性 [J]. 温带林业研究, 2023, 6(4): 55–59. [CHEN Xiaona, ZHAO Naqi, YU Xiao, et al. Ecological adaptation of sea buckthorn plants

- in China [J]. Temperate Forestry Research, 2023, 6(4): 55–59. ]
- [ 13 ] 吴翠芳, 刘雅宣, 李宇辉, 等. 沙棘中黄酮类化合物提取及抗氧化活性 [J]. 安徽科技学院学报, 2024, 38(1): 88–96. [ WU Cuifang, LIU Yaxuan, LI Yuhui, et al. Extraction and antioxidant activity of flavonoids from sea buckthorn [J]. Journal of Anhui Institute of Science and Technology, 2024, 38(1): 88–96. ]
- [ 14 ] 宋年年, 易宇欣, 阿衣吐逊·阿布都外力. 沙棘叶多糖的体内抗氧化活性研究 [C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第二十届年会论文摘要集. 新疆农业大学化学化工学院, 2023: 2. [ SONG Niannian, YI Yuxin, AYI Tusun-abduweli. *In vivo* antioxidant activity of sea buckthorn leaf polysaccharides [C]//Chinese Society of Food Science and Technology. Abstracts of the 20th Annual Conference of the Chinese Society of Food Science and Technology. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Agricultural University, 2023: 2. ]
- [ 15 ] 杨欢欢, 赵明慧, 虎涛, 等. 沙棘果渣黄酮微波提取工艺优化及其纯化研究 [J]. 食品工业, 2023, 44(12): 85–90. [ YANG Huanhuan, ZHAO Minghui, HU Tao, et al. Optimization of microwave extraction process for flavonoids from sea buckthorn fruit pomace and its purification [J]. Food Industry, 2023, 44(12): 85–90. ]
- [ 16 ] 王璇, 张志伟, 陈志奎, 等. 沙棘果食品开发利用研究进展与发展对策 [J]. 保鲜与加工, 2024, 24(1): 75–82. [ WANG Xuan, ZHANG Z W, CHEN Z X, et al. Research progress and development countermeasures of sea buckthorn fruit food development and utilization [J]. Freshness and Processing, 2024, 24(1): 75–82. ]
- [ 17 ] 王旭, 孔志强, 赵玉红. 溶剂极性对沙棘渣提取物组成及体外降血糖、降血脂活性的影响 [J]. 精细化工, 2022, 39(10): 2060–2068. [ WANG Xu, KONG Zhiqiang, ZHAO Yuhong. Effect of solvent polarity on the composition and *in vitro* hypoglycemic and hypolipidemic effects of sea buckthorn residue extract [J]. Fine Chemistry, 2022, 39(10): 2060–2068. ]
- [ 18 ] 王薇, 曹雯. 沙棘果渣多酚、多糖及黄酮抑菌性及对葡萄保鲜研究 [J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(11): 12–18. [ WANG W, CAO W. Study on the antibacterial properties of polyphenols, polysaccharides and flavonoids of sea buckthorn fruit pomace and its effect on grape freshness preservation [J]. China Food Adds, 2023, 34(11): 12–18. ]
- [ 19 ] 王志强. 沙棘果实采收、采后处理与加工 [J]. 农业工程技术, 2021, 41(17): 42,44. [ WANG Z Q. Harvesting, postharvest handling and processing of sea buckthorn fruits [J]. Agricultural Engineering Technology, 2021, 41(17): 42,44. ]
- [ 20 ] 温中平, 张红梅, 刘志, 等. 沙棘果速冻分离试验研究 [J]. 国际沙棘研究与开发, 2003(2): 32–34. [ WEN Zhongping, ZHANG Hongmei, LIU Zhi, et al. Experimental study on quick-freezing separation of sea buckthorn fruit [J]. International Sea Buckthorn Research and Development, 2003(2): 32–34. ]
- [ 21 ] WU Jiaxin, JIA Xiwu, 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.
- [ 22 ] ALABI P K, ZHU Z W, SUN D W. Transport phenomena and their effect on microstructure of frozen fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 101(prepubish): 63–72.
- [ 23 ] 赵明慧. 沙棘黄酮的提取纯化工艺优化及应用研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2023. [ ZHAO Minghui. Optimization of extraction and purification process and application of sea buckthorn flavonoids [D]. Shihezi: Shihezi University, 2023. ]
- [ 24 ] 毕永昭, 单启梅, 罗瑞明, 等. 不同冻结速率手抓羊肉挥发性风味物质差异分析 [J]. 食品科学, 2023, 44(2): 288–295. [ BI Yongzhao, SHAN Qimei, LUO Ruiming, et al. Analysis of the differences in volatile flavor substances in hand-held mutton with different freezing rates [J]. Food Science, 2023, 44(2): 288–295. ]
- [ 25 ] ORLOWSKA M, HAVET M, LE-BAIL A. Controlled ice nucleation under high voltage DC electrostatic field conditions [J]. Food Research International, 2009, 42(7): 879–884.
- [ 26 ] TAO Han, LU Fan, ZHOU Xuefeng, et al. Freezing-induced loss of wheat starch granule-associated proteins affected dough quality: From water distribution, rheological properties, microstructure, and gluten development [J]. Journal of Cereal Science, 2023, 109: 103606.
- [ 27 ] LI D P, JIA S L, ZHANG L T, et al. Effect of using a high voltage electrostatic field on microbial communities, degradation of adenosine triphosphate, and water loss when thawing lightly-salted, frozen common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 212: 226–233.
- [ 28 ] 吴嗣圣, 陈姗姗, 余铭. 冻结方式和冷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. [ WU Sisheng, CHEN Shanshan, YU Ming. Effects of freezing method and freezing conditions on the quality of frozen peach pulp [J]. Freshness and Processing, 2021, 21(1): 99–104. ]
- [ 29 ] 陈志云, 李杰, 冯雨, 等. 茶多酚生物活性及作用机制研究进展 [J/OL]. 食品工业科技: 1–13[2024-04-06]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070168>. [ CHEN Zhiyun, LI Jie, FENG Yu, et al. Progress in the study of biological activity and mechanism of action of tea polyphenols [J/OL]. Food Industry Science and Technology: 1–13[2024-04-06]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070168>. ]
- [ 30 ] GONÇALVES M E, ABREU M, BRANDÃO R T, et al. Degradation kinetics of colour, vitamin C and drip loss in frozen broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *Italica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(8): 2136–2144.
- [ 31 ] 林玉友, 王洪江, 张海旺, 等. 沙棘果实成分及影响因素研究进展 [J]. 辽宁林业科技, 2022(6): 52–56. [ LIN Yuyou, WANG Hongjiang, ZHANG Haiwang, et al. Progress of research on the composition and influencing factors of sea buckthorn fruit [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2022(6): 52–56. ]
- [ 32 ] 王冉冉, 娄茜茜, 陈存坤, 等. 速冻低温保鲜处理对鲜切甘蓝品质的影响 [J]. 保鲜与加工, 2015, 15(5): 25–31. [ WANG Ranran, LOU Xixi, CHEN Cunkun, et al. Effect of quick-freezing and low-temperature preservation treatment on the quality of fresh-cut kale [J]. Preservation and Processing, 2015, 15(5): 25–31. ]
- [ 33 ] 王亚菲, 张鑫宇, 刘佳慧, 等. 沙棘功能研究进展及其发展前景 [J]. 中国果菜, 2021, 41(12): 49–53. [ WANG Yafei, ZHANG Xinyu, LIU Jiahui, et al. Progress of functional research on sea buckthorn and its development prospect [J]. Chinese Fruit and Vegetable, 2021, 41(12): 49–53. ]
- [ 34 ] 彭勇, 陈义伦, 王庆国, 等. 桃品种间质地、水分及细胞壁组分的比较 [J]. 西北农业学报, 2019, 28(11): 1836–1844. [ PENG Y, CHEN Y L, WANG Q G, et al. Comparison of texture, moisture and cell wall fractions among peach varieties [J]. Northwest Journal of Agriculture, 2019, 28(11): 1836–1844. ]
- [ 35 ] SHAO X L, LI Y F. Application of low-field NMR to analyze water characteristics and predict unfrozen water in blanched sweet corn [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(6): 1593–1599.
- [ 36 ] YUN Xueyan, ZHANG Xiaoyu, SARULA, et al. Change of the frozen storage quality of concentrated Mongolian milk curd under the synergistic action of ultra-high pressure and electric field [J]. LWT, 2023, 177: 114462.