

基于模糊数学感官评价法结合响应面法优化 高压电场解冻法兰西西梅工艺

邵蕾, 许铭强*, 马燕, 孟新涛, 邹淑萍, 张婷

(新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 新疆主要农副产品精深加工工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘要: 以-40℃冷冻室冷冻的法兰西西梅为原料, 采用模糊数学感官评价法结合响应面法对高压电场解冻法兰西西梅的工艺条件进行优化。通过对法兰西西梅的质地、外观、形状、滋味和口感进行权重分析, 建立法兰西西梅模糊数学感官评价方法, 结合响应面法优化高压电场解冻法兰西西梅工艺, 探讨解冻时间、解冻温度、电场强度对法兰西西梅感官品质的影响。结果表明, 高压电场解冻法兰西西梅的最佳工艺优化为: 电场强度 47 kV, 解冻时间 93 min, 解冻温度 19℃, 在此条件下得到产品的感官评分为 77.80 分, 汁液流失率为 0.44%, 果肉色差为 34.36, 与预测值相差较小。高压电场解冻后的法兰西西梅色泽均匀、外形平整、果香浓郁且酸甜可口。与传统空气解冻相比较, 高压电场解冻后的法兰西西梅品质更佳。

关键词: 法兰西西梅; 高压电场解冻; 模糊数学评价; 响应面法优化

文章编号: 1673-9078(2023)08-188-198

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.8.1031

Optimization of High Voltage Electric Field Thawing of French Plums Based on Fuzzy Mathematical Sensory Evaluation Combined with Response Surface Methodology

SHAO Lei, XU Mingqiang*, MA Yan, MENG Xintao, ZOU Shuping, ZHANG Ting

(Research Institute of Agricultural Products Storage and Processing, Xinjiang Engineering Research Center of Deep Processing of Main Agricultural and Sideline Products, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: The optimization of high voltage electric field thawing of French plums frozen and stored at -40℃ using fuzzy mathematical evaluation and response surface methodology was studied. The weighted analysis of texture, appearance, shape, odor, and taste was performed. A fuzzy mathematical sensory evaluation method was then established and combined with response surface methodology to optimize the thawing process. The effects of the thawing time, thawing temperature, and electric field intensity on the sensory index of the French plums were investigated. Optimal thawing conditions were as follows: electric field intensity, 47 kV; thawing time, 93 min; and thawing temperature, 19℃. Under these conditions, the sensory score of the product was 77.80, whereas the juice loss rate was 0.44%, and the color difference of the fruit flesh was 34.36. These values were lower than the predicted values. The French plums thawed using a high voltage electric field had uniform color, smooth shape, rich fruit flavor, and sweet and sour taste. French plums thawed using a high voltage electric field were superior quality than plums that underwent traditional air thawing.

Key words: French plums; high voltage electric field thawing; fuzzy mathematical evaluation; response surface optimization

引文格式:

邵蕾, 许铭强, 马燕, 等. 基于模糊数学感官评价法结合响应面法优化高压电场解冻法兰西西梅工艺[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 188-198

SHAO Lei, XU Mingqiang, MA Yan, et al. Optimization of high voltage electric field thawing of french plums based on fuzzy mathematical sensory evaluation combined with response surface methodology [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 188-198

收稿日期: 2022-08-17

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目 (2020B02017-2)

作者简介: 邵蕾 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 2814195481@qq.com

通讯作者: 许铭强 (1987-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品精深加工及副产物综合利用, E-mail: xmq2046@hotmail.com

西梅又被叫作加州梅、欧洲李^[1], 原产西亚和欧洲, 形如杏梅, 形态、色泽和化学成分上兼具野生櫻桃李与黑刺李的特征^[2], 西梅富含维生素和矿物质, 具有较高的食用品质^[3,4]。

目前国内外对冻藏技术的研究已经较为成熟, 冷冻和冷藏是水果和蔬菜最常用的储存方法, 在水果和蔬菜冰点温度下将其加速冻结达到长时间保存的目的, 现在已应用于许多水果和蔬菜^[5,6]。果蔬冻藏技术是通过减少果蔬组织中的水分, 抑制微生物生长所以减少酶的活性, 进而延长货架期^[7-9]。现今市场上对冷冻和冷藏水果和蔬菜的研究很少, 大部分都是水产品或畜产品, 造成这一点的主要原因在于水果和蔬菜的含水量较高, 结成冰晶较快, 所以这与影响冷冻再解冻后品质变化有关^[10,11]。近年来, 冻藏在毛豆^[12]、草莓^[13]、荔枝^[14]、蘑菇^[15]、菠萝^[16]和番木瓜^[17]等果蔬中有一定研究与应用。

高压电场加快解冻一是电晕放电形成离子风^[18]。内部带电的粒子自身的能量被水分子吞噬, 动能有所增加, 沉积的带电粒子也使导热速率提升, 从而获得能量, 加快速度。二是电场的添加使氢键破裂加速, 从而加快解冻过程^[19]。在果蔬领域, 朱艳红等^[20]研究了高压电场的作用对解冻后冬枣品质的变化, 发现解冻后冬枣的硬度、水分含量等许多值都高于对照组。

本文以法兰西西梅为主要原料, 使用高压电场解冻技术进行解冻, 在单因素试验的基础上, 通过模糊数学感官评价结合响应面法进一步优化高压电场解冻法兰西西梅工艺, 旨在为高压电场高效解冻法兰西西梅提供一定的技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

法兰西西梅鲜果, 于2021年9月采自喀什地区伽师县。

本研究筛选成熟度一致的法兰西西梅为研究对象, 其平均固形物含量25%、平均横径为3.5 cm, 平均纵径为5 cm、平均质量为30.33 g、平均水分含量为82.69%。

DW-60W321EU1 低温冷冻柜, 青岛海尔特种电冰柜有限公司; YP20002 电子天平, 余姚市金诺天平仪器有限公司; Color Rader CR-10 色差仪, 日本柯尼卡美能达公司; EMFI-T1 电磁耦合处理系统, 英都斯特(无锡)感应科技有限公司。

1.2 样品处理

挑选大小均匀, 无机械损伤的法兰西西梅鲜果, 按每一自封袋24个果实进行封装, 放入-40℃冰柜进行冷冻处理。

解冻试验时, 从-40℃冰柜取出西梅样品, 每组选取20个冷冻后样品分放至洁净的培养皿中, 在所需的电场强度、解冻温度和解冻时间条件下进行解冻, 以果实中心温度达到4℃为解冻终点, 解冻结束后对样品进行指标测定, 取平均值。

1.3 影响冷冻法兰西西梅解冻效果的单因素实验

本研究选择了对高压电场解冻效果影响较显著的3个因素, 即电场强度、解冻时间及解冻温度为自变量, 通过测定解冻后西梅的汁液流失率、感官评价得分和果肉色差, 对法兰西西梅的高压电场解冻工艺进行优化。

根据前期预实验所得出的结果, 在固定的解冻时间结束时测量果实中心温度是否到4℃, 在做预实验时得出90 min时果实中心温度已到4℃, 说明已解冻, 为了充分保证解冻完全, 延长解冻时间至210 min。

1.3.1 电场强度对法兰西西梅解冻工艺的影响

分别设置电场强度为10、20、30、40、50 kV, 固定解冻时间为120 min, 解冻温度为20℃, 探讨电场强度对高压电场解冻后法兰西西梅感官评分的影响, 在模糊数学模型分析后, 得到模糊数学感官评价得分。

1.3.2 解冻时间对法兰西西梅解冻工艺的影响

分别设置解冻时间为90、120、150、180、210 min, 固定电场强度为40 kV, 解冻温度为20℃, 探讨解冻时间对高压电场解冻后法兰西西梅感官评分的影响, 在模糊数学模型分析后, 得到模糊数学感官得分。

1.3.3 解冻温度对法兰西西梅解冻工艺的影响

分别设置解冻温度为5、10、15、20、25℃, 固定电场强度为40 kV, 解冻时间为120 min, 探讨解冻温度对高压电场解冻后法兰西西梅感官评分的影响, 在模糊数学模型分析后, 得到模糊数学感官得分。

1.4 响应面试验设计

依据单因素的结果, 利用模糊数学评价结合响应面软件分析电场强度(A)、解冻时间(B)、解冻温度(C)3个因素对汁液流失率、感官评价得分和果肉色差结果的影响并建模, 优化解冻工艺。表1为电场响应面试验因素水平表。

表 1 电场响应面试验因素与水平

Table 1 Electric field response surface test factors and level			
水平	A 电场强度/kV	B 解冻时间/min	C 解冻温度/℃
-1	30	90	15
0	40	120	20
+1	50	150	25

1.5 模糊数学模型的建立

1.5.1 感官评定

参考崔立柱等^[21]的方法, 由 5 男 5 女共 10 位对味觉和嗅觉敏感, 有良好的健康和卫生条件的食品专业的研究生。为每个评价人员准备了独立的工作环境, 温度 25 ℃。保持良好的通风, 没有其他气味污染和噪声干扰。由这十位研究生组成感官评价小组, 对高压电场解冻后法兰西西梅的质地、色泽、形状、香气

味和口感 5 个评价因素集评价。所有评价人员统一开始感官评价, 在评价前 1 h 内戒烟, 且每个样品在 15 min 内完成评价。

1.5.2 确定评价因素集和评价集

评价因素集是对法兰西西梅感官评价因素的集合, 评价因素集 $U=(U_1, U_2, U_3, U_4, U_5)$, 其中 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_5 分别代表质地、色泽、形状、滋味和口感; 评语集是对因素集评价标准分数的集合, 评语集 $V=(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5)$, 其中满分是 100 分, V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 分别代表优 (91 分~100 分)、良好 (81 分~90 分)、中等 (71 分~80 分)、一般 (61 分~70 分)、差 (51 分~60 分) 为分数等级。评价标准如表 2 所示。根据清晰质量等级边界模糊化法将分值区域清晰化^[22], 取评语集的中间值得到相对应的分值。

表 2 高压电场解冻后法兰西西梅的感官评价标准(分)

Table 2 Sensory evaluation criteria of French prune after thawing by high voltage electric field (score)					
等级	质地	色泽	形状	滋味	口感
V ₁	软硬合适	果皮紫亮, 果肉金黄	外表平整, 饱满, 解冻完全	具有西梅本身的香味, 味道较浓	口感酸甜
V ₂	软硬较合适	果皮紫色, 果肉黄色	外表较平整, 较饱满, 解冻较完全	具有西梅本身的香味	口感较酸甜
V ₃	较软/较硬	果皮暗紫, 果肉棕黄	外表较平整, 有皱缩, 未解冻	具有西梅本身的香味, 味道清淡	较柔软, 不酸甜
V ₄	太软/太硬	果皮红褐色, 果肉暗黄	外表不平整, 皱缩较严重, 未完全解冻	不具有西梅香味	柔软不酸甜
V ₅	很软/很硬	果皮褐色, 果肉暗黄	外表不平整, 皱缩较严重, 未完全解冻	无西梅味, 有酒精发酵味或其它异味	不柔软

表 3 高压电场解冻法兰西西梅权重

Table 3 High voltage electric field thawing French prune weight					
因素	质地	色泽	形状	滋味	口感
权重值 X/%	20	10	20	25	25

表 4 评语集与分值区域对应表(分)

Table 4 Correspondence between comment set and score area (score)					
评语集	优	良好	中等	一般	差
分值区域	91~100	81~90	71~80	61~70	51~60
边界清晰化	95	85	75	65	55

1.5.3 确定评价因子权重集

评价因子权重集是各评分比重的集合。参考 Mu 等^[23]的方法, 对质地、色泽、形状、滋味、口感 5 个因素, 建立 5×5 的矩阵。

评价指标集权重集的确立: 使用问卷调查法^[24], 调查人数共 100 人, 为食品相关老师或同学。对法兰西西梅的质地、色泽、形状、滋味、口感按照其比重分析评估, 得出高压电场解冻法兰西西梅的权重集 (表 3)。

1.5.4 模糊关系综合评判集

在评价表中, 观察各级别上的票数, 计算各等级的票数与总人数相除的值, 得到模糊关系矩阵。

1.6 指标与测定方法

1.6.1 汁液流失率

汁液流失率是以解冻后汁液流失的多少来评价所设置解冻参数的好坏程度, 法兰西西梅冻结贮藏样本质量 (W_1), 用不同条件解冻后, 再次称质量 (W_2)。每种处理测定 10 个样品, 取平均值。计算公式为:

$$TL=[(W_1-W_2)/W_1] \times 100\%$$
 (1)

式中:

TL——汁液流失率, %;

W_1 ——高压电场解冻前法兰西西梅的质量, g;

W_2 ——高压电场解冻后法兰西西梅的质量, g。

1.6.2 色泽的测定

利用 Color Rader CR-10 色差仪, 参考刘树萍等^[25]的方法对高压电场解冻后的法兰西西梅的果肉色泽进行测定。果肉的色泽由亮度 (L^*)、红度 (a^*)、黄度 (b^*) 表示。每组选取 20 个冷冻后样品, 每个样品上、下、左、右各测量 1 次, 结果取四个面的平均值为单

果色泽值, 色泽变化值 ΔE 计算公式为:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

式中:

ΔE ——色差, NBS;

L^* 、 a^* 、 b^* ——分别表示高压电场解冻后法兰西西梅的亮度、红绿值和黄蓝值。

1.7 数据统计及分析

利用 Excel 2014 和 Origin 8.0 对结果进行分析并制图, 使用响应面 Design-Expert 8.0.6 对高压电场解冻法兰西西梅的工艺进行分析、优化并且建模和检验。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 电场强度对法兰西西梅解冻效果的影响

高压电场形成的离子风对冰的冲击作用致使解冻速度加快^[26,27]。电场强度对法兰西西梅解冻效果的影响见图 1, 电场辅助解冻不仅能加快解冻速度, 还可较大程度的维持新鲜度。在 40 kV 时解冻后的汁液流失率最小, 为 0.58%, 且感官评价得分最高, 为 82.60 分。在电场强度上升到 50 kV 时汁液流失率开始上升, 为 0.64%, 感官评价得分也有所下降, 为 64.55 分。在电场强度 40 kV 时的解冻效果好、汁液流失少, 实验中观察此时的法兰西西梅已完全解冻, 且软硬合适, 果皮紫亮, 果肉金黄。随着电场强度的持续增加, 法兰西西梅的汁液流失率逐渐增大, 感官评价得分降低, 解冻后品质变差, 故选择电场强度 40 kV 为较优条件。华泽钊等^[28]对土豆在不同场强大小下解冻进行了研究, 发现场强在 150 kV/m 以下时解冻变慢, 不同场强对土豆解冻前后的汁液流失率影响不同。

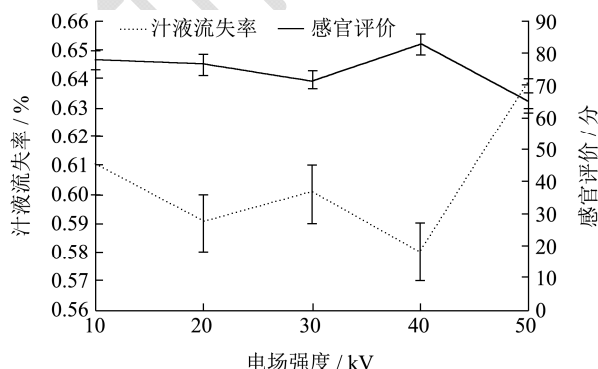


图 1 电场强度对法兰西西梅解冻效果的影响

Fig.1 Effect of electric field intensity on thawing effect of French prune

2.1.2 解冻时间对法兰西西梅解冻效果的影响

解冻时间对解冻效果有较大影响^[29]。由图 2 可知, 在 120 min 时感官评价得分最高, 为 82.46 分, 在 120 min 之后感官评价得分也逐渐降低, 解冻后的果实质地、外观和口感逐渐变差。此时的汁液流失率相对较低, 为 0.58%, 实验中观察到此时的法兰西西梅外表平整饱满, 解冻完全。90 min 时果肉细胞的冰晶未解冻完全, 一部分未融化, 所以汁液流失率最低, 当到 120 min 时已完全解冻, 果肉细胞的冰晶完全融化, 所以汁液流失率有所增大, 因而确定较优的解冻时间为 120 min。而高智伟等^[30]的研究也发现, 随着高压电场电压加大, 豆腐解冻时间缩短, 所以解冻后质量更好。

2.1.3 解冻温度对法兰西西梅解冻效果的影响

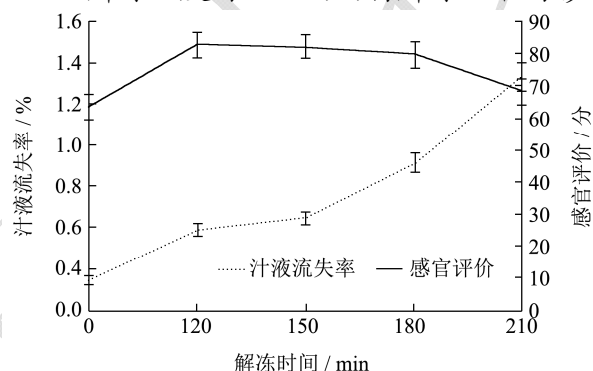


图 2 解冻时间对法兰西西梅解冻效果的影响

Fig.2 Effect of thawing time on thawing effect of French prune

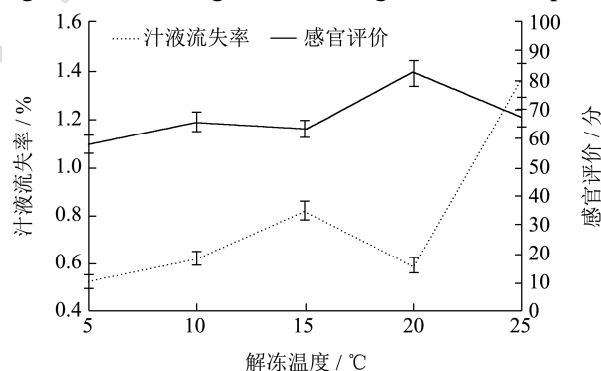


图 3 解冻温度对法兰西西梅解冻效果的影响

Fig.3 Effect of thawing temperature on thawing effect of French prune

解冻温度直接影响解冻速度和品质^[31,32]。由图 3 可知, 20 °C 解冻后的汁液流失率最低, 为 0.59%, 此时的感官评分也最高, 为 82.53 分。到 25 °C 时汁液流失率升高, 感官评价得分也有所下降, 硬度、颜色都不如 20 °C 时的解冻表现好, 表皮开始变软塌陷, 颜色也不再鲜亮, 可能是 20 °C 时, 水分蒸发速度慢, 对汁液流失率的影响较小, 使得果实软硬适中, 外观平整, 具有更高的感官评价得分。故确定较优的解冻温度为 20 °C。唐梦等^[33]研究发现 25 °C 解冻罗非鱼片

时, 高压静电场解冻比对照组所需时间短, 主要因为高压静电场解冻能更快的到达最大冰晶生成带, 更快的通过最大冰晶生成带, 从而加速解冻。

2.2 高压电场解冻法兰西西梅模糊数学感官

综合评价结果

由 10 名食品专业相关人员对 17 种不同组合解冻的法兰西西梅的 5 项指标打分, 统计分析总的结果, 如表 5。

$$T_1 = \begin{vmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.1 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{vmatrix}$$

$$T_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \end{vmatrix}$$

$$T_3 = \begin{vmatrix} 0 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0 \end{vmatrix}$$

$$T_4 = \begin{vmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \end{vmatrix}$$

$$T_5 = \begin{vmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{vmatrix}$$

$$T_6 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 \end{vmatrix}$$

$$T_7 = \begin{vmatrix} 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \\ 0.4 & 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.3 & 0.4 \end{vmatrix}$$

$$T_8 = \begin{vmatrix} 0 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.2 \\ 0.2 & 0 & 0.3 & 0.2 & 0.3 \\ 0 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.3 \end{vmatrix}$$

$$T_9 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.2 & 0.5 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.3 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 \end{vmatrix}$$

$$T_{10} = \begin{vmatrix} 0 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.4 & 0 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.2 & 0.5 \end{vmatrix}$$

$$T_{11} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 \end{vmatrix}$$

$$T_{12} = \begin{vmatrix} 0 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.4 & 0 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.2 & 0.5 \end{vmatrix}$$

$$T_{13} = \begin{vmatrix} 0 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0.2 & 0 & 0.3 & 0.2 & 0.3 \\ 0 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.3 \end{vmatrix}$$

$$T_{14} = \begin{vmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{vmatrix}$$

$$T_{15} = \begin{vmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$T_{16} = \begin{vmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0 \end{vmatrix}$$

$$T_{17} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

通过矩阵乘法，计算合成后的感官评分，避免了大小算法之间的误差^[34]。已知高压电场解冻法兰西西梅的5个权重集为X={0.20, 0.10, 0.20, 0.25, 0.25}，按照模糊原理Y=X×T，得到在不同高压电场解冻条件下的法兰西西梅评价结果：

$$Y_1=X \times T_1=[0.20, 0.10, 0.20, 0.25, 0.25] \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.1 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{bmatrix} = \{0.12, 0.21, 0.32, 0.31, 0.05\}$$

同理得Y₂={0.07, 0.16, 0.32, 0.28, 0.18}, Y₃={0.10, 0.22, 0.34, 0.29, 0.06}, Y₄={0.01, 0.12, 0.41, 0.37, 0.10}, Y₅={0.24, 0.29, 0.32, 0.15, 0}, Y₆={0.05, 0.23, 0.31, 0.35, 0.17}, Y₇={0.11, 0.18, 0.22, 0.30,

0.20}, Y₈={0.09, 0.11, 0.23, 0.31, 0.27}, Y₉={0, 0.02, 0.24, 0.28, 0.47}, Y₁₀={0.12, 0.09, 0.21, 0.34, 0.25}, Y₁₁={0, 0.14, 0.26, 0.45, 0.16}, Y₁₂={0.09, 0.12, 0.21, 0.34, 0.25}, Y₁₃={0.09, 0.13, 0.23, 0.31, 0.25}, Y₁₄={0.24, 0.27, 0.35, 0.15, 0}, Y₁₅={0.07, 0.47, 0.37, 0.10, 0}, Y₁₆={0.24, 0.27, 0.32, 0.18, 0}, Y₁₇={0.22, 0.43, 0.27, 0.10, 0}

模糊综合评价得分W=K×Y，评价级K={95, 85, 75, 65, 55}，Y₁={0.12, 0.21, 0.32, 0.31, 0.05}，因此得出高压电场解冻法兰西西梅的模糊综合评分

为：W₁=K×Y₁= $\{0.12, 0.21, 0.32, 0.31, 0.05\} \times \begin{bmatrix} 95 \\ 85 \\ 75 \\ 65 \\ 55 \end{bmatrix} = 75.55$

同理得W₂=70.75，W₃=75.25，W₄=71.75，W₅=81.20，W₆=78.85，W₇=71.85，W₈=69.45，W₉=63.05，W₁₀=69.80，W₁₁=68.75，W₁₂=69.55，W₁₃=70.05，W₁₄=80.95，W₁₅=80.05，W₁₆=80.70，W₁₇=82.60。

表5 高压电场解冻法兰西西梅感官评价指标统计

Table 5 Statistical analysis of sensory evaluation index of high voltage electric field thawed French prune

样品	质地 (20%)					色泽 (10%)					形状 (20%)					滋气味 (25%)					口感 (25%)				
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
1	1	2	2	4	1	2	5	2	1	0	4	1	3	2	0	0	1	4	4	1	0	3	4	3	0
2	0	0	6	3	1	1	1	3	4	1	0	3	4	2	1	0	0	4	5	1	0	2	3	4	1
3	0	4	3	2	1	4	2	2	1	1	3	1	3	3	0	0	1	5	3	1	0	3	3	4	0
4	1	1	5	2	1	5	3	1	0	1	0	3	3	3	1	0	0	4	3	3	0	2	2	4	2
5	4	3	2	1	0	3	4	2	1	0	4	2	3	1	0	1	2	5	2	0	1	4	3	2	0
6	0	0	4	4	2	2	2	2	3	1	0	3	3	3	1	1	1	3	3	2	0	1	3	4	2
7	0	2	3	4	1	0	4	4	1	1	4	1	1	3	1	1	3	1	3	2	0	0	3	3	4
8	0	2	2	4	2	0	0	2	4	4	2	1	2	3	2	2	0	3	2	3	0	2	2	3	3
9	0	0	2	2	6	0	0	3	2	5	0	1	2	2	5	0	0	2	3	5	0	0	3	4	3
10	0	1	3	5	1	1	2	3	3	1	4	0	2	3	1	1	2	0	4	3	0	0	3	2	5
11	0	0	2	7	1	0	0	3	5	2	0	2	3	4	1	0	4	3	2	1	0	0	2	5	3
12	0	1	3	5	1	1	2	3	3	1	4	0	2	3	1	0	3	0	4	3	0	0	3	2	5
13	0	2	2	4	2	0	0	2	4	4	2	2	2	3	1	2	0	3	2	3	0	0	3	2	5
14	4	3	2	1	0	3	4	2	1	0	4	2	3	1	0	1	2	5	2	0	1	3	4	2	0
15	2	6	2	0	0	1	6	2	1	0	1	3	4	2	0	0	2	7	1	0	0	7	2	1	0
16	4	3	2	1	0	3	4	2	1	0	4	2	3	1	0	1	2	5	2	0	1	3	3	3	0
17	2	4	4	0	0	4	4	2	0	0	3	4	2	1	0	1	4	3	2	0	2	5	2	1	0

2.3 试验设计及结果

在单因素试验基础上，根据Box-Behnken Design设计对高压电场解冻法兰西西梅的工艺参数进行优

化，选择电场强度(A)、解冻时间(B)、解冻温度(C)进行三因素三水平响应面分析，以汁液流失率(Y₁)、模糊数学感官评价得分(Y₂)和果肉色差(Y₃)为响应值，试验设计与结果见表6。

表 6 响应面试验设计与结果

Table 6 Design and results of response surface experiment

试验号	A 电场强度/kV	B 解冻时间/min	C 解冻温度/℃	Y ₁ 汁液流失率/%	Y ₂ 感官得分/分	Y ₃ 果肉色差/ΔE
1	1	0	-1	0.60	75.55	38.70
2	0	-1	-1	0.60	71.75	39.91
3	-1	0	-1	0.59	75.25	41.00
4	0	1	-1	0.60	71.75	39.91
5	0	0	0	0.66	81.20	36.52
6	1	-1	0	0.60	78.85	32.05
7	-1	1	0	1.02	71.85	33.88
8	-1	-1	0	0.80	69.45	35.06
9	0	1	1	1.12	63.05	33.43
10	0	-1	1	0.75	69.80	35.58
11	-1	0	1	1.13	68.75	37.43
12	1	0	1	1.02	69.55	37.97
13	1	1	0	1.09	70.05	37.27
14	0	0	0	0.58	80.95	37.51
15	0	0	0	0.59	80.05	36.91
16	0	0	0	0.65	80.70	36.52
17	0	0	0	0.62	82.60	36.59

表 7 回归模型方差分析表

Table 7 Table of variance analysis of regression model

方差来源	汁液流失率				感官评价				果肉色差			
	平方和	均方	F 值	Pr > F	平方和	均方	F 值	Pr > F	平方和	均方	F 值	Pr > F
模型	0.82	0.09	60.40	<0.000 1**	514.38	57.15	40.43	<0.000 1**	71.38	7.93	21.01	0.000 3**
A	0.01	0.01	4.80	0.064 6	9.46	9.46	6.69	0.036 1*	0.05	0.05	0.13	0.728 5
B	0.20	0.20	132.23	<0.000 1**	18.45	18.45	13.05	0.008 6**	3.73	3.73	9.87	0.016 4*
C	0.40	0.40	266.87	<0.000 1**	61.33	61.33	43.39	0.000 3**	11.38	11.38	30.14	0.000 9**
AB	0.02	0.02	11.70	0.011 1*	31.36	31.36	22.19	0.002 2**	7.30	7.30	19.32	0.003 2*
AC	0.00	0.00	2.02	0.198 6	0.06	0.06	0.04	0.839 4	0.85	0.85	2.25	0.177 4
BC	0.01	0.01	6.33	0.040 0*	15.02	15.02	10.62	0.013 9*	11.26	11.26	29.82	0.000 9*
A ²	0.14	0.14	94.63	<0.000 1**	27.51	27.51	19.46	0.003 1**	0.57	0.57	1.52	0.257 6
B ²	0.02	0.02	15.22	0.005 9*	151.26	151.26	107.01	<0.000 1**	33.59	33.59	88.96	<0.000 1**
C ²	0.00	0.00	2.51	0.157 3	165.46	165.46	117.06	<0.000 1**	3.28	3.28	8.69	0.021 5
残差	0.01	0.00			9.89	1.41			2.64	0.38		
失拟项	0.01	0.00	1.53	0.336 7	6.35	2.12	2.39	0.209 7	1.70	0.57	2.41	0.207 0
纯误差	0.00	0.00			3.55	0.89			0.94	0.24		
合计	0.83				524.27				74.03			

注：*表示差异显著，即 $P<0.05$ ；**表示差异极显著，即 $P<0.01$ 。

2.4 方差分析

对表 6 数据进行回归拟合分析，得到的二次多项回归模型方程为： $Y_1=0.62-0.03x+0.16y+0.22z+0.066xy-0.027xz+0.049yz+0.18x^2+0.074y^2-0.03z^2$

$$Y_2=81.1+1.09x-1.52y-2.77z-2.8xy+0.13xz-1.94yz-$$

$$2.56x^2-5.99y^2-6.27z^2$$

$$Y_3=38.01+0.079x+0.68y-1.19z+1.35xy+0.46xz-1.68yz-0.37x^2-2.82y^2+0.88z^2$$
，其显著性分析结果见表 7。

由 Y_1 的二次回归模型分析可知，优化后模型的 F 值为 60.40， $P<0.000 1$ ，模型极显著，失拟项 0.34>0.05，不显著，且复相关系数 $R^2=98.73\%$ ，模型具有

较高的可信度。所选的 3 个因素中, B、C 对汁液流失率有极显著的影响 ($P<0.01$), 交互项 AB、BC 对汁液流失率影响显著 ($P<0.05$), 对汁液流失率影响的大小顺序为 $C>B>A$, 由图 4 亦可得验证。通过软件优化得到解冻后最小汁液流失率时的参数为电场强度 38.17 kV, 解冻时间 98.28 min, 解冻温度 15.14 °C, 此时汁液流失率的预测值为 0.41%。

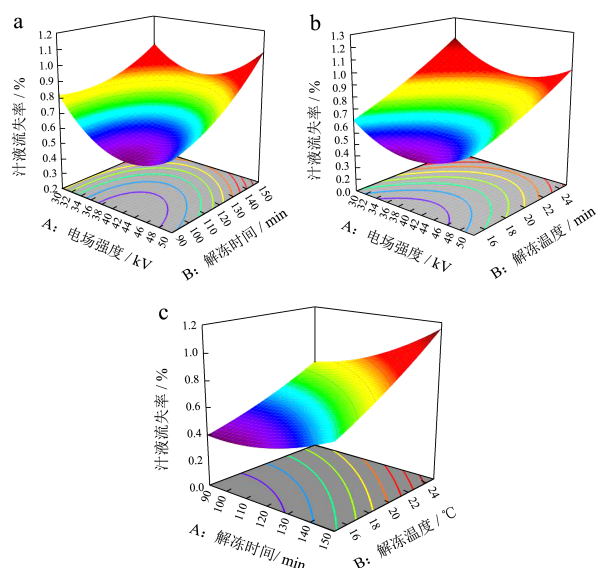


图 4 高压电场解冻参数对法兰西西梅汁液流失率影响的响应面图

Fig.4 Response surface diagram of influence of thawing parameters in high voltage electric field on juice loss rate of French prune

由 Y_2 的二次回归模型分析可知, 优化后模型的 F 值为 40.43, $P<0.0001$, 模型极显著, 失拟项 $0.21>0.05$, 不显著, 且复相关系数 $R^2=98.11\%$, 模型具有较高的可信度。三个因素中, B、C 对感官评价得分的影响极显著 ($P<0.01$), 交互项 BC 对感官评价得分的影响显著 ($P<0.05$), AB 对感官评价得分的影响极显著 ($P<0.01$), 其对感官评价得分影响的顺序为 $C>B>A$, 由图 5 亦可得验证, 获得最高感官评价时的高压电场解冻法兰西西梅工艺参数优化结果为电场强度 42.99 kV, 解冻时间 115.06 min, 解冻温度 19.04 °C, 此时感官评价的预测值为 81.65 分。

由 Y_3 的二次回归模型分析可知, 优化后模型的 F 值为 29.51, 模型极显著, 失拟项 $P=2.54>0.05$, 不显著, 且复相关系数 $R^2=97.00\%$, 模型具有较高的可信度。三个因素中, B、C 对果肉色差的影响极显著 ($P<0.01$), 交互项 AB、BC 对果肉色差的影响极显著 ($P<0.01$), 其对果肉色差影响的顺序为 $C>B>A$, 由图 6 亦可得验证, 获得最小果肉色差时的工艺参数优化结果为电场强度 30.13 kV, 解冻时间 149.94 min,

解冻温度 24.71 °C, 此时果肉色差的预测值为 32.03。

2.5 各工艺参数的效应分析

2.5.1 高压电场解冻参数对法兰西西梅汁液流失率的影响

从图 5 可知, 随着各个交互因子实际值组合的变化, 感官评价得分先升高后下降, 说明各交互因子均有一个最佳组合使感官评价得分达到最高。电场强度 (A) 对感官评价得分影响最为显著, 其曲面陡峭, 而解冻时间 (B)、解冻温度 (C) 的影响次之, 曲面较平滑。图 5a、5b 说明, 随着电场强度、解冻时间和解冻温度的增加, 感官评价得分不断升高, 达到一定组合值后, 感官评价得分有所下降。可能是因在适当电场强度时, 离子风对果肉细胞的破坏程度减小, 使得样品外观平整, 滋气味浓郁, 故应使电场强度、解冻时间和解冻温度保持在中间值, 才能获得较高的感官评价得分。

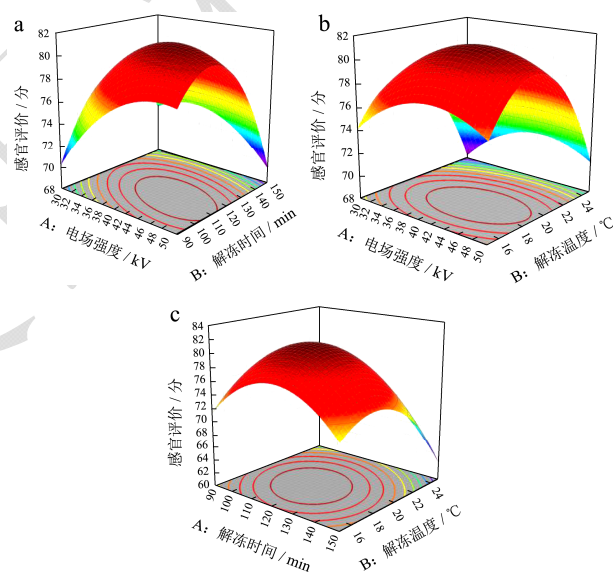


图 5 高压电场解冻参数对法兰西西梅感官评价影响的响应面图

Fig.5 Response surface diagram of the effect of high voltage electric field on thawing parameters on sensory evaluation of French prune

2.5.2 高压电场解冻参数对法兰西西梅感官评价的影响

从图 5 可知, 随着各个交互因子实际值组合的变化, 感官评价得分先升高后下降, 说明各交互因子均有一个最佳组合使感官评价得分达到最高。电场强度 (A) 对感官评价得分影响最为显著, 其曲面陡峭, 而解冻时间 (B)、解冻温度 (C) 的影响次之, 曲面较平滑。图 5a、5b 说明, 随着电场强度、解冻时间和解冻温度的增加, 感官评价得分不断升高, 达到一定

组合值后,感官评价得分有所下降。可能是因为在适当电场强度时,离子风对果肉细胞的破坏程度减小,使得样品外观平整,滋气味浓郁,故应使电场强度、解冻时间和解冻温度保持在中间值,才能获得较高的感官评价得分。

2.5.3 高压电场解冻参数对法兰西西梅果肉色泽的影响

由图 6a 可知,随着各个交互因子实际值组合的变化,果肉色差值缓慢上升再下降,各交互因子均有一个最佳组合使果肉色差值最小,电场强度(A)对果肉色差值影响最为显著,其曲面陡峭,而解冻时间(B)、解冻温度(C)的影响次之,曲面较平滑。图 6a、6b 说明随着电场强度、解冻温度的增加,解冻时间的减少果肉色差先逐渐下降,达到一定组合值后,果肉色差最小。可能是因为较大的电场强度对果肉的颜色起保护作用,使得果肉色差值较小,考虑到加工成本,同时缩短解冻时间,提高解冻温度可使果肉色差减小,故应增加电场强度,缩短解冻时间,提高解冻温度,可降低解冻后西梅的果肉色差,有助于提高解冻效果。

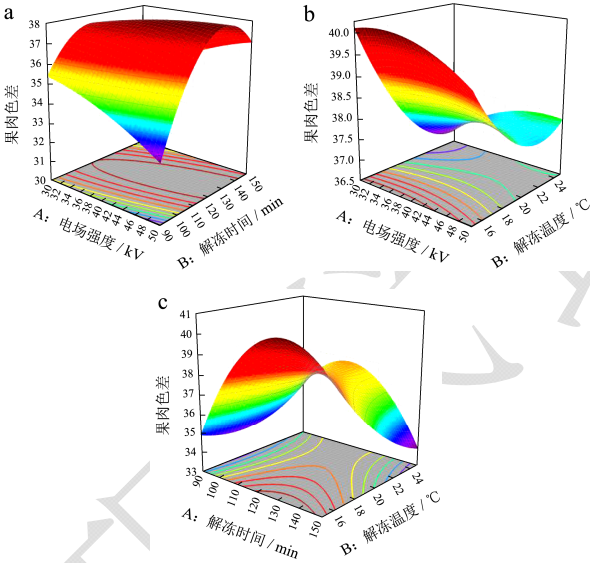


图 6 高压电场解冻参数对法兰西西梅果肉色泽影响的响应面图

Fig.6 Response surface diagram of effect of thawing parameters in high voltage electric field on flesh color of French prune

2.6 高压电场解冻法兰西西梅工艺的优化

根据试验所得的模糊数学评价权重集,解冻后的法兰西西梅品质首先应考虑其口感(25%)和滋气味(25%)要被消费者接受,其次是其质地(20%)和形状(20%),最后要考虑果蔬的色泽(10%)。由响

应面分析法对汁液流失率(Y_1)、感官评价(Y_2)、果肉色差(Y_3)进行优化,得到的模型方程分别为:

$$Y_1 = 0.62 - 0.03x + 0.16y + 0.22z + 0.066xy - 0.027xz + 0.049yz + 0.18x^2 + 0.074y^2 - 0.03z^2$$

$$Y_2 = 81.1 + 1.09x - 1.52y - 2.77z - 2.8xy + 0.13xz - 1.94yz - 2.56x^2 - 5.99y^2 - 6.27z^2$$

$$Y_3 = 38.01 + 0.079x + 0.68y - 1.19z + 1.35xy + 0.46xz - 1.68yz - 0.37x^2 - 2.82y^2 + 0.88z^2$$

综合模糊数学感官评价法和响应面优化分析结果,确定法兰西西梅的高压电场解冻工艺为:电场强度 46.79 kV,解冻时间 93.44 min,解冻温度 18.89 °C,其经模型预测的汁液流失率为 0.60%、感官评价得分为 80.58 分、果肉色差为 33.15。考虑到实际解冻条件,调整最佳解冻工艺条件为:电场强度 47 kV,解冻时间 93 min,解冻温度 19 °C,无电场对照的解冻条件为:电场强度 0 kV,解冻时间 93 min,解冻温度 19 °C,最优工艺解冻后的西梅果实和无电场对照解冻后的西梅果实如图 7 所示,可以看出最优工艺解冻后的西梅果实明显比无电场对照解冻后的西梅果实品质要好,将符合实际生产的工艺进行验证试验得高压电场解冻法兰西西梅的汁液流失率为 0.44%、感官评价为 77.80 分、果肉色差为 34.36,预测结果与实验结果较为接近,说明该模型较为适合实际的生产。



图 7 验证实验所得法兰西西梅效果对比图

Fig.7 Verify the contrast diagram of French prune effect obtained in the experiment

注: a: 最优工艺解冻后的西梅果实; b: 无电场对照解冻后的西梅果实。

3 结论

本研究利用模糊数学感官评价结合响应面分析法,探究电场强度、解冻时间、解冻温度对高压电场解冻法兰西西梅汁液流失率、感官评价得分和果肉色差的影响。确定了质地、色泽、形状、滋气味和口感的权重分别为(0.20、0.20、0.10、0.25、0.25)为考察因素的综合评分体系,并建立了三个二次多项方程,分析后得出各因素对高压电场解冻法兰西西梅影响的

大小顺序为:解冻温度>解冻时间>电场强度。通过响应面优化,获得最优工艺为:电场强度 47 kV,解冻时间 93 min,解冻温度 19 ℃,该工艺条件所得到的法兰西西梅外型饱满,果皮紫亮、果肉金黄且酸甜可口。经验证实验最终得到的实际汁液流失率为 0.44%、感官评价为 77.80 分、果肉色差为 34.36,与预测值仅相差 0.16%、2.78 分、1.21,表明可采用模糊数学感官综合评价与响应面优化法相结合优化法兰西西梅的高压电场解冻工艺,并为高压电场解冻法兰西西梅工业化发展提供了理论依据。

因此,利用高压电场解冻技术解冻法兰西西梅,既可以保持法兰西西梅较低的汁液流失率,又可为工业化解冻提供新的方法,可以促进法兰西西梅解冻产业的发展。随着社会的发展,很多新型解冻技术层出不穷,人们可充分利用新型的解冻技术进行解冻,进一步研究不同的解冻方法在不同果蔬产品中的应用,得到高品质的解冻后产品。

参考文献

- [1] 戴志伟,张玥.四种乳酸菌发酵西梅浆的特性研究[J].食品与发酵工业,2021,47(15):220-227.
- [2] 刘伟,姚思辰,黄贤敏,等.樱桃李中功能成分研究进展[J].食品研究与开发,2021,42(6):211-218.
- [3] 木合塔尔·扎热,阿卜杜许库尔·牙合甫,马合木提·阿不来提,等.西梅法兰西采前落果相关影响因子研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(9):137-143.
- [4] 刘志彬,冯江朵,张雯,等.欧洲李营养功效研究进展[J].食品与机械,2015,31(6):228-232.
- [5] 吕文静.冻藏温度对核桃鲜果贮藏品质的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [6] 胡中海,孙谦,龙勇,等.水果速冻保鲜技术研究进展[J].食品与发酵工业,2015,41(2):242-247.
- [7] 王朝叶.冻藏条件对鲜核桃抗氧化性及品质的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [8] 姚镭栓.预处理、冻藏及解冻方法对速冻青花菜营养品质的影响[D].杭州:浙江大学,2014.
- [9] Alhamdan Abdullah, HassanBakri, Alkahtani Hassan, et al. Freezing of fresh barhi dates for quality preservation during frozen storage [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(11): 1552-1561.
- [10] 张雅丽,刘帮迪,周新群,等.果蔬制品冻藏技术研究进展[J].保鲜与加工,2021,21(10):113-118.
- [11] 向迎春,吴丹,黄佳奇,等.冻藏过程中冰晶对水产品品质影响的研究现状[J].食品研究与开发,2018,39(12):187-193.
- [12] 赵菲,张旭,荆红彭,等.不同冻结速率对毛豆冻藏过程中品质的影响.制冷学报,2015,36(5):113-118.
- [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] 伍志权,李唯正,何鑫平,等.荔枝速冻保鲜技术研究进展[J].食品研究与开发,2017,38(9):206-212.
- [15] 张惠.贮藏条件对双孢蘑菇货架品质的影响[D].淄博:山东理工大学,2017.
- [16] Bartolome Ana P, RuperezPilar, Fuster Carmen. Non-volatileorganic acids, pH and titratable acidity changes in pineapple fruit slices during frozen storage [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2015, 70(4): 475-480.
- [17] 余铭,陈海强,梁钻好,等.液浸速冻番木瓜浆冻藏色泽变化研究[J].食品与机械,2015,31(4):130-133.
- [18] 唐梦,岑剑伟,李来好,等.高压静电场解冻技术在食品中的研究进展[J].食品工业科技,2016,37(10):373-376,385.
- [19] 杨宇帆,陈倩,王浩,等.高压电场技术在食品加工中的应用研究进展[J].食品工业科技,2019,40(19):316-320,325.
- [20] 郭衍银,朱艳红,赵向东,等.高压静电对速冻大枣解冻品质的影响[J].制冷学报,2009,30(2):45-48.
- [21] 崔立柱,付依依,刘士伟,等.基于模糊数学感官评价法沙棘饼干烘焙工艺优化[J].食品工业科技,2021,42(15):163-169.
- [22] 朱由珍,吉薇,吉宏武,等.基于模糊数学评价法优化木瓜脆片真空油炸工艺[J].食品工业科技,2017,38(18):183-188.
- [23] MU Huiling, DU Peng, BAI Shuang, et al. Study on sensory evaluation of instant rice by fuzzy mathematics method [C]// Berlin: International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering, 2020: 127-134.
- [24] K Vivek, K V Subbarao, Winny Routray, et al. Application of fuzzy logic in sensory evaluation of food products: a comprehensive study [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(1): 1-29.
- [25] 刘树萍,苏晓文,陆家慧,等.热烫处理对芹菜品质的影响及短期贮藏性质的研究[J].中国调味品,2021,46(3):65-69,81.
- [26] GUO Liangjia, HONG Jiangliu, Satoru Nirasawa, et al. Effects of high-voltage electrostatic field treatment on the thawing rate and post-thawing quality of frozen rabbit meat [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41(36): 348-356.
- [27] Xiangli He, Rui Liu, Eizo Tatsumi, et al. Factors affecting the thawing characteristics and energy consumption of frozen pork tenderloin meat using high-voltage electrostatic field [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 22(15): 110-115.
- [28] 谢晶,华泽钊.冻结马铃薯在高压直流电场中解冻的实验研

-
- 究[J].上海理工大学报,2000,3:199-201,211.
- [29] 刘懿,蒲云峰,张婷婷,等.解冻方式对苹果汁理化品质及挥发性成分的影响[J].中国食品学报,2020,20(7):88-97.
- [30] 高智伟,徐静,邓世龙,等.不同电场参数对豆腐解冻特性的研究[J].内蒙古工业大学学报(自然科学版),2018,37(1):28-34.
- [31] WANG Qijun, LI Yifei, SUN Dawen, et al. Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: Principles and applications [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(13): 2285-2298.
- [32] XU Baoguo, CHEN Jianan, YUAN Jun, 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, 2021, 101(8): 3237-3245.
- [33] 唐梦,岑剑伟,李来好,等.高压静电场解冻对冻罗非鱼片品质的影响[J].食品工业科技,2017,38(13):1-6.
- [34] FENG Qinrong, WANG Fenfen. A discernibility matrix approach to fuzzy soft sets based decision making problems [J]. Intelligent Data Analysis, 2018, 22(3): 659-674.