

中温辅助下高压脉冲电场协同香草醛对树莓汁杀菌效果与品质的影响

何雨灵^{1*}, 林大为¹, 王楠¹, 李艳², 李晓旭³, 王月华^{1#}

¹沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳

²北票市市场监督管理综合行政执法队, 辽宁 北票

³丹东澳森食品有限公司, 辽宁 丹东

收稿日期: 2025年4月20日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

本研究旨在探讨中温辅助高压脉冲电场(PHF)-香草醛复合杀菌技术(PVT)对树莓汁的杀菌效果及品质影响。通过探究电场强度、香草醛浓度、水浴温度及处理时间对微生物的致死效果, 系统评估其对树莓汁的营养成分保留及贮藏稳定性的作用。结果表明, PVT处理对菌落总数(TVC)和酵母菌、霉菌总数(TYMC)的致死效果显著。贮藏实验显示, 25℃条件下, PVT处理组在40天内微生物指标符合国家标准, 货架期较热处理组(HT)延长一倍。品质分析表明, PVT显著提升总酚和蛋白质含量, 但对花色苷的保留略低。此外, PVT对多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)活性的抑制率达98%和96%, 接近HT组, 同时有效维持果汁澄清度。该技术为树莓汁的非热杀菌及品质保持提供了新策略。

关键词

高压脉冲电场, 非热杀菌, 香草醛, 树莓汁, 贮藏稳定性

Effect of High Voltage Pulsed Electric Field Synergised with Vanillin on the Bactericidal Effect and Quality of Raspberry Juice Assisted by Medium Temperature

Yuling He^{1*}, Dawei Lin¹, Nan Wang¹, Yan Li², Xiaoxu Li³, Yuehua Wang^{1#}

¹College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang Liaoning

²Beipiao City Market Supervision and Administration Comprehensive Administrative Law Enforcement Team, Beipiao Liaoning

³Dandong Ausen Foodstuffs Co., Ltd., Dandong Liaoning

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 何雨灵, 林大为, 王楠, 李艳, 李晓旭, 王月华. 中温辅助下高压脉冲电场协同香草醛对树莓汁杀菌效果与品质的影响[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(3): 458-469. DOI: 10.12677/hjfn.2025.143052

Received: Apr. 20th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of medium-temperature-assisted high-voltage pulsed electric field (PEF)-vanillin composite sterilisation technology (PVT) on the sterilisation and quality of raspberry juice. The lethal effects of electric field strength, vanillin concentration, water bath temperature and treatment time on microorganisms were investigated, and their effects on nutrient retention and storage stability of raspberry juice were systematically evaluated. The results showed that the lethal effect of PVT treatment on total colony count (TVC) and total yeast mould count (TYMC) was significant. The storage experiment showed that the microbiological indexes of the PVT-treated group complied with the national standards within 40 days at 25°C, and the shelf-life was doubled compared with that of the heat-treated group (HT). Quality analysis showed that PVT significantly enhanced total phenol and protein contents, but retained slightly lower retention of anthocyanin. In addition, PVT inhibited polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) activities by 98% and 96%, which were close to those of the HT group, while effectively maintaining juice clarity. This technique provides a new strategy for non-thermal sterilisation and quality maintenance of raspberry juice.

Keywords

High Voltage Pulsed Electric Field, Non-Thermal Sterilization, Vanillin, Raspberry Juice, Storage Stability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着消费者对健康食品的需求增加,果汁作为一种营养丰富的饮品,其品质和安全性也受到越来越多的关注。树莓汁富含酚酸、花色苷及维生素等活性成分,具有显著的抗氧化功能,但其在加工及贮藏过程中易受微生物污染,导致品质劣变[1],其中酵母菌、霉菌是导致果汁腐败变质的主要原因[2]。果汁的营养成分和风味对消费者的接受度有很大影响,传统的热杀菌方法在杀灭微生物的同时,也可能会破坏果汁中的营养成分和风味[3]。因此,寻找一种既能有效杀菌又能保护果汁营养成分和风味的方法是必要的。

高压脉冲电场(PEF)技术是非热处理技术之一,其不仅有良好的杀菌效果,还能很好地保持果汁营养价值和风味。其杀菌原理主要是通过电击和电穿孔作用,导致细胞膜的破裂和细胞内容物的泄漏,破坏细胞的离子平衡,进一步抑制细胞的呼吸活动。这两种作用共同导致微生物的死亡,从而实现杀菌的目的[4][5]。然而,研究表明,PEF处理微生物后,大约90%的细胞受到亚致死性损伤,如果产品贮藏条件适宜(如温度、湿度、营养等),微生物可能会重新恢复生命活动并繁殖,导致产品变质、腐败,从而缩短产品的保质期[6]-[9]。因此,利用PEF技术处理后的产品需要配合冷藏贮运,增加了销售成本,且给消费者带来不便。香草醛作为一种天然抑菌剂,可通过与细胞膜脂质或蛋白质结合抑制微生物生长[10]。此外,中温处理可通过提高细胞膜流动性增强微生物对物理场的敏感性[11]。目前尚未见到关于中温辅助PEF-香草醛复合杀菌技术对树莓汁微生物和品质稳定性的研究报道。为此,本研究优化PVT处理参数(电

场强度、香草醛、水浴温度、处理时间),系统考察其对菌落总数(TVC)、霉菌酵母菌(TYMC)的灭活效果,并分析其对营养成分及酶活性的影响。结合 25℃贮藏实验,评估货架期与浊度变化,阐明 PVT 在杀菌、保品质及贮藏稳定性上的综合优势,为非热杀菌在果汁加工领域提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 材料

红树莓(品种红钻)采摘于沈阳农业大学树莓种植基地,贮存于-20℃。多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)试剂盒(北京索莱宝科技有限公司),香草醛(上海瑞永生物科技有限公司),马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA)、平板计数琼脂(PCA)均购自于青岛海博生物技术有限公司,福林-酚(上海麦克林生化科技有限公司),无水碳酸钠(中国上海国药化学试剂有限公司),食品级果胶酶(山东隆科特酶制剂有限公司)。

2.2. 实验设计

原料制备及处理

选择成熟度较高、外表完整的红树莓,在室温条件下解冻后进行后续试验。将解冻后的红树莓与水比例为 1:2 打浆,加入 0.15%的果胶酶,于 45℃条件下水浴 90 min,过滤,4500 r/min 离心 15 min 后取上清液得到红树莓汁,直接加入一定浓度的香草醛溶液,经香草醛处理的果汁进行中温水浴处理 3~5 min,水浴后的果汁立即采用高压脉冲电场冷杀菌柜(山东博美特电器科技有限公司)进行杀菌处理。以离心所取上清液未添加香草醛组为空白对照组(CK),通过改变电场强度、香草醛浓度、水浴温度、处理时间来探究不同处理条件对红树莓汁中菌落总数(TVC)、酵母菌、霉菌总数(TYMC)的致死效果。

2.3. 测定指标与方法

2.3.1. 微生物指标测定

菌落总数测定参考 GB 4789.2-2022 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定方法;霉菌、酵母菌测定参考 GB 4789.15-2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数方法。

利用平板计数法对处理前后的树莓汁中 TVC、TYMC 进行计数,灭菌效果采用致死对数 lg S 表示。

$$\lg S = \lg(N_0/N) \quad (1)$$

式中: N——处理后的菌落总数/(CFU/mL);

N_0 ——处理前的菌落总数/(CFU/mL)。

$$N = (c/V) \times M \quad (2)$$

式中: N——样品的菌落总数, CFU/ml;

c——某一稀释度下平板生长的平均菌落数(CFU);

V——涂布平板所用稀释液的体积(ml);

M——稀释倍数。

2.3.2. 总酚含量测定

总酚含量采用福林-酚比色法测定,参考刘鑫[12]的方法并稍作修改。准确称量 2.5 mg 没食子酸对照品,以 65%乙醇溶液溶解后转移至 25 mL 容量瓶定容,制得 0.10 mg/mL 储备液。按梯度移取 0~5.000 mL 储备液至 10 mL 容量瓶中,蒸馏水定容配制制成 0~50.00 $\mu\text{g/mL}$ 系列标准溶液。各管依次加入 1 mL 福林-酚显色剂(避光反应 5 min)及 3 mL 7.5%碳酸钠溶液,混匀后避光静置 120 min。采用紫外-可见分光光度计于 765 nm 波长测定吸光值,建立标准曲线方程为 $y = 0.011x + 0.0403$ ($R^2 = 0.999$),依此计算样品总酚含量。

2.3.3. 花色苷含量测定

花色苷含量测定参考 Zhang [13]的方法并稍作修改。准确移取两份 1 ml 试样加入试管中, 分别加入 5 ml pH = 1 和 pH = 4.5 的缓冲溶液, 避光放置 1 h 后, 使用紫外 - 可见分光光度计(上海光析仪器有限公司 V5800)于 520 nm 和 700nm 波长下测定吸光度值, 将吸光度值代入公式计算样品中花色苷含量, 以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷当量表示。

$$X = \frac{(A_{520} - A_{700})_{\text{pH}1.0} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}4.5} \times M \times DF}{\varepsilon \times L}$$

式中: X——总花色苷浓度, mg/mL;

M——矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的相对分子质量, 449.2;

DF——试液的稀释倍数;

ε 为 C3G 的消光系数(26,900 L/mol·cm⁻¹);

L 为光程, 1 cm。

2.3.4. 蛋白质含量测定

采用考马斯亮蓝法[14]测定树莓汁中蛋白质含量。准确称取稀释一定倍数的果汁, 加入 5 mL 考马斯亮蓝 G250 试剂, 混匀, 静置 20min, 在 595 nm 测吸光度, 以牛血清蛋白为标准品绘制标准曲线, 以蛋白质含量为横坐标, 吸光度为纵坐标, 得到标准曲线方程 $y = 0.0005x$, 相关系数 $R^2 = 0.998$ 。

2.3.5. 酶活性测定

多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)活性采用试剂盒测定, 严格按照说明书操作。

2.3.6. 浊度测定

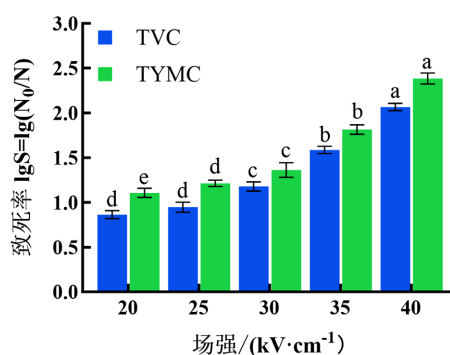
树莓汁的浊度测定采用酶标仪(北京普朗新技术有限公司, 170-3930)在 660 nm 处测定吸光度值。

2.4. 统计分析

采用 Microsoft Excel 对所有数据处理, 通过 SPSS26.0 软件对数据进行单因素方差分析(邓肯检验法), 每组试验均重复 3 次, 结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。绘图软件使用 Graphpad Prism 10.1.2。

3. 结果与分析

3.1. 电场强度对树莓汁中微生物灭活效率的影响



注: 图中不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平上有显著差异, 下同。

Figure 1. Effect of different electric field strength on the inactivation effect of microorganisms

图 1. 不同电场强度对微生物灭活效果的影响

如图 1 所示,随着电场强度的增加,树莓汁微生物的致死率也在逐渐升高,与[15]研究结果一致,中温辅助 PEF-香草醛处理(PVT)对菌落总数的致死率由 0.86 个对数上升至 2.06 个对数,电场强度在 40 kV/cm 时杀菌效果最好。PVT 处理对霉菌、酵母菌总数的致死率显著高于菌落总数,这是因为细菌细胞壁较厚且复杂,微生物种类决定了细胞壁和细胞膜的组成结构不同,对脉冲电场的敏感性不同[16]。根据测定 TVC、TYMC 的致死效果,场强为 40 kV/cm 致死效果最好,选取 40 kV/cm 的电场强度进行后续实验。

3.2. 香草醛浓度对树莓汁中微生物灭活效率的影响

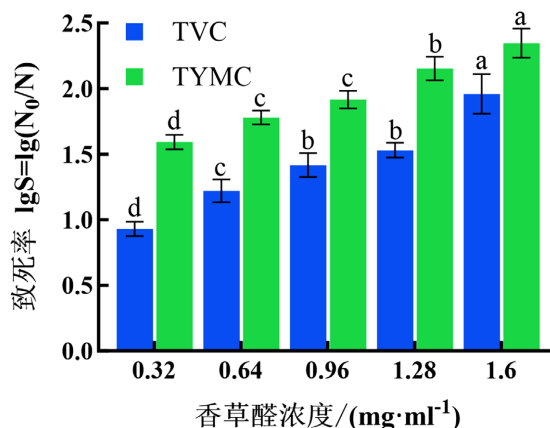


Figure 2. Effect of different vanillin concentrations on the inactivation of microorganisms

图 2. 不同香草醛浓度对微生物灭活效果的影响

如图 2 所示,随着香草醛浓度的增加,树莓汁中微生物的致死率显著升高($p < 0.05$)。香草醛浓度添加到 1.6 mg/mL 时,致死率最高,对 TVC 的致死率达到 1.96 个对数值,对 TYMC 的致死率达到 2.35 个对数值。香草醛中的官能团可与微生物细胞膜脂质或蛋白相互作用,从而引起细胞膜损伤,致使微生物被迫上调细胞膜中的结构蛋白,导致离子梯度的丧失和呼吸活动的抑制[17],从而导致微生物致死率增加。由于香草醛浓度过高会影响树莓汁口感及风味,所以后续试验选定香草醛浓度为 1.28 mg/mL。

3.3. 水浴温度对树莓汁中微生物灭活效率的影响

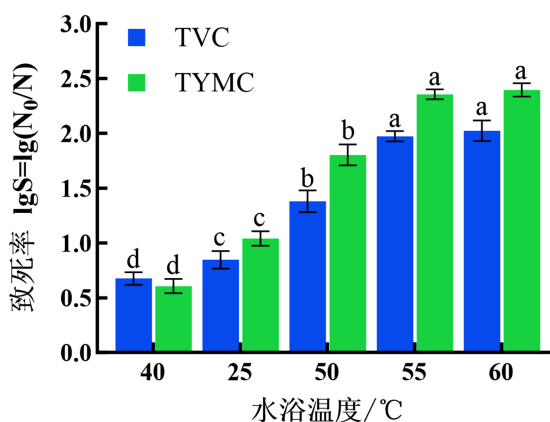


Figure 3. Effect of different water bath temperatures on the inactivation effect of microorganisms

图 3. 不同水浴温度对微生物灭活效果的影响

如图 3 所示,随着水浴温度的升高,对细菌总数、霉菌、酵母菌的致死率也逐渐增加,直到温度升高到 55℃,细菌、霉菌、酵母菌被完全杀灭,对 TVC 的致死率达到 2.02 个对数值,对 TYMC 的致死率达到 2.40 个对数值。由此可见,温度升高可诱导微生物细胞膜的流动性增加,进而提高微生物细胞对 PEF 的敏感性,从而有效增强 PEF 对微生物的灭活效率[11]。由于过高的温度会影响树莓汁中的营养成分,所以选取 50℃ 进行后续试验的探究。

3.4. PEF 处理时间对树莓汁中微生物灭活效率的影响

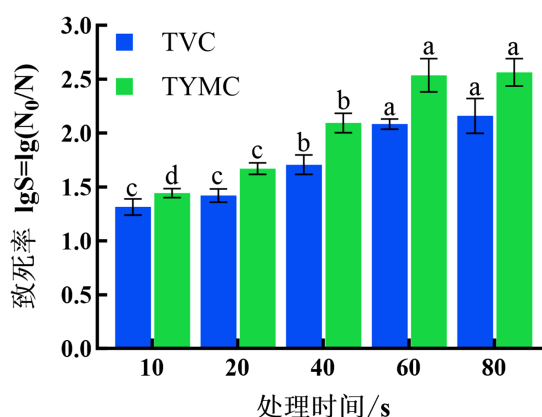


Figure 4. Effect of different PEF treatment time on the inactivation effect of microorganisms

图 4. 不同 PEF 处理时间对微生物灭活效果的影响

如图 4 所示, PVT 对 TVC、TYMC 的致死效果随着 PEF 处理时间的延长(10~80 s)而增加,当处理时间达到 80 s 时,对 TVC 的致死率达到 2.16 个对数值,对 TYMC 的致死率达到 2.57 个对数值。研究结果表明,随着时间推移,微生物细胞不断暴露在电场作用下,细胞膜两端电势差也会相应发生变化,细胞膜通透性也会发生变化,继而引起细胞的死亡[18]。基于以上研究结果,选取电场强度为 40 kV/cm,香草醛浓度为 1.28 mg/ml,水浴温度为 55℃,PEF 处理时间为 60 s 进行后续试验。

3.5. 不同处理对树莓汁中总酚含量的影响

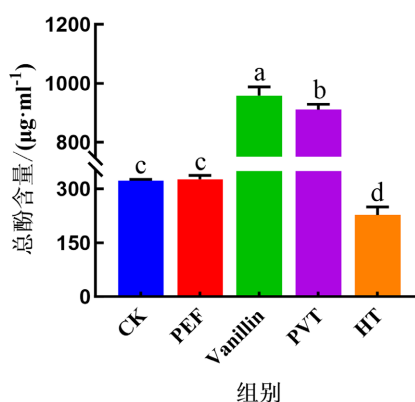


Figure 5. Effect of different treatments on total phenol content in raspberry juice

图 5. 不同处理方式对树莓汁中总酚含量的影响

如图 5 所示,对树莓汁进行热杀菌处理(HT, 85℃, 15 min)会导致总酚含量显著下降,降低了果汁总

体的抗氧化能力。PEF 单独处理与对照组无显著差异($p > 0.05$), 说明 PEF 处理不会减少果汁中总酚含量, 而香草醛单独处理组(Vanillin)和 PVT 处理都显著提高果汁中总酚含量($p < 0.05$), 证实果汁中总酚含量的提高是由于加入香草醛的原因, 并且酚类物质含量上升, 其中的某些多酚物质更有助于果汁中微生物的灭活。

3.6. 不同处理对树莓汁中花色苷含量的影响

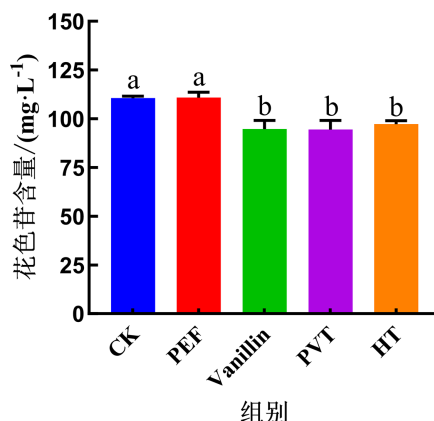


Figure 6. Effect of different treatments on the content of anthocyanosides in raspberry juice
图 6. 不同处理方式对树莓汁中花色苷含量的影响

不同处理方式对树莓汁中花色苷含量的影响如图 6 所示。单独 PEF 处理组的花色苷含量与空白对照组(CK)无显著差异($p > 0.05$), 表明 PEF 处理未导致花色苷显著损失。其他处理组(Vanillin、PVT、HT): 花色苷含量均降至 100 mg/L 以下, 显著低于 CK 组和 PEF 组($p < 0.05$), 但三组间无显著差异, 说明 PVT 和 HT 均会导致树莓汁中花色苷含量的损失。

3.7. 不同处理对树莓汁中蛋白质含量的影响

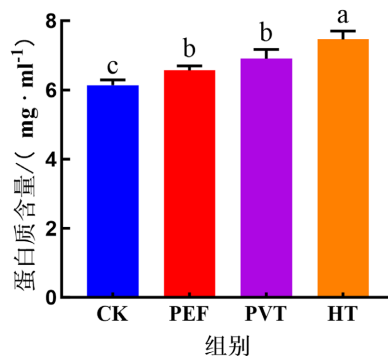


Figure 7. Effect of different treatments on protein content in raspberry juice
图 7. 不同处理方式对树莓汁中蛋白质含量的影响

不同处理方式对树莓汁中蛋白质含量的影响如图 7 所示。与空白对照组(CK, 蛋白质含量为 6.14 ± 0.18 mg/mL)相比, PEF 和 PVT 处理组的蛋白质含量显著提高($p < 0.05$), 分别达到 6.57 ± 0.13 mg/mL 和 6.91 ± 0.26 mg/mL, 但两者间无显著性差异($p > 0.05$)。HT 处理组的蛋白质含量最高, 为 7.46 ± 0.24 mg/mL, 较 CK 组提升 21.50% ($p < 0.05$), 表明热处理可能通过蛋白变性或溶解作用促进了可溶性蛋白的释放。

3.8. 不同处理对树莓汁 PPO、POD 活性的影响

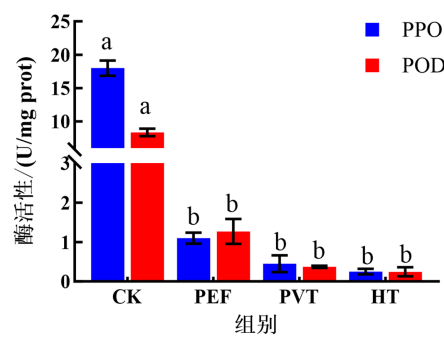


Figure 8. Effect of different treatments on PPO and POD activities in raspberry juice
图 8. 不同处理方式对树莓汁中 PPO、POD 活性的影响

不同处理方式对红树莓汁中 PPO 和 POD 活性的抑制效果如图 8 所示。与 CK 组相比，PEF 处理显著降低 PPO 和 POD 活性，抑制率分别达 94%和 91% ($p < 0.05$)；PVT 处理的抑制效果更为显著，PPO 和 POD 活性分别下降 98%和 96% ($p < 0.05$)。值得注意的是，HT 处理对两种酶的抑制效果最佳，PPO 和 POD 活性抑制率分别达到 99%和 98% ($p < 0.05$)，但与 PEF 和 PVT 不显著($p > 0.05$)。

3.9. 不同处理对树莓汁贮藏期微生物稳定性的影响

Table 1. Effect of different treatments on TVC in raspberry juice under storage conditions at 25°C
表 1. 25℃储存条件下不同处理方式对树莓汁中 TVC 的影响

储藏天数/处理方式	CK	PEF	50℃	Vanillin	PT	PV	PVT	HT
0	283 ± 61	110 ± 20	103 ± 15	63 ± 11	93 ± 5	37 ± 21	<10	<10
2	-	-	-	83 ± 15	-	43 ± 21	<10	<10
4	-	-	-	-	-	70 ± 17	<10	<10
6	-	-	-	-	-	-	<10	<10
10	-	-	-	-	-	-	<10	<10
15	-	-	-	-	-	-	<10	<10
20	-	-	-	-	-	-	10 ± 10	<10
25	-	-	-	-	-	-	10 ± 10	-
30	-	-	-	-	-	-	10 ± 10	-
35	-	-	-	-	-	-	10 ± 10	-
40	-	-	-	-	-	-	10 ± 10	-

注：-表示微生物数量超出国家标准，0 天表示不同方式处理后的初始菌落数，值表示为平均值 ± SD (n = 3)；CK：空白对照组；PEF：单独脉冲电场处理组；50℃：单独中温处理组；Vanillin：单独香草醛处理组；PT：脉冲电场 + 中温处理组；PV：脉冲电场 + 香草醛处理组；PVT：中温 + 脉冲电场 + 香草醛处理组；HT：热处理组，下同。

Table 2. Effect of different treatments on TYMC in raspberry juice under storage conditions at 25°C
表 2. 25℃储存条件下不同处理方式对树莓汁中 TYMC 的影响

储藏天数/处理方式	CK	PEF	50℃	Vanillin	PT	PV	PVT	HT
0	242 ± 16	172 ± 40	210 ± 32	46 ± 5	120 ± 20	47 ± 10	<10	<10
2	-	-	-	70 ± 26	-	56 ± 15	<10	<10

续表

4	-	-	-	-	-	90 ± 20	<10	<10
6	-	-	-	-	-	-	<10	<10
10	-	-	-	-	-	-	10 ± 10	<10
15	-	-	-	-	-	-	13 ± 6	<10
20	-	-	-	-	-	-	17 ± 6	52 ± 7
25	-	-	-	-	-	-	20 ± 0	-
30	-	-	-	-	-	-	20 ± 0	-
35	-	-	-	-	-	-	20 ± 0	-
40	-	-	-	-	-	-	20 ± 0	-

注：-表示微生物数量超出国家标准，0 天表示不同方式处理后的初始菌落数，值表示为平均值 ± SD (n = 3)。

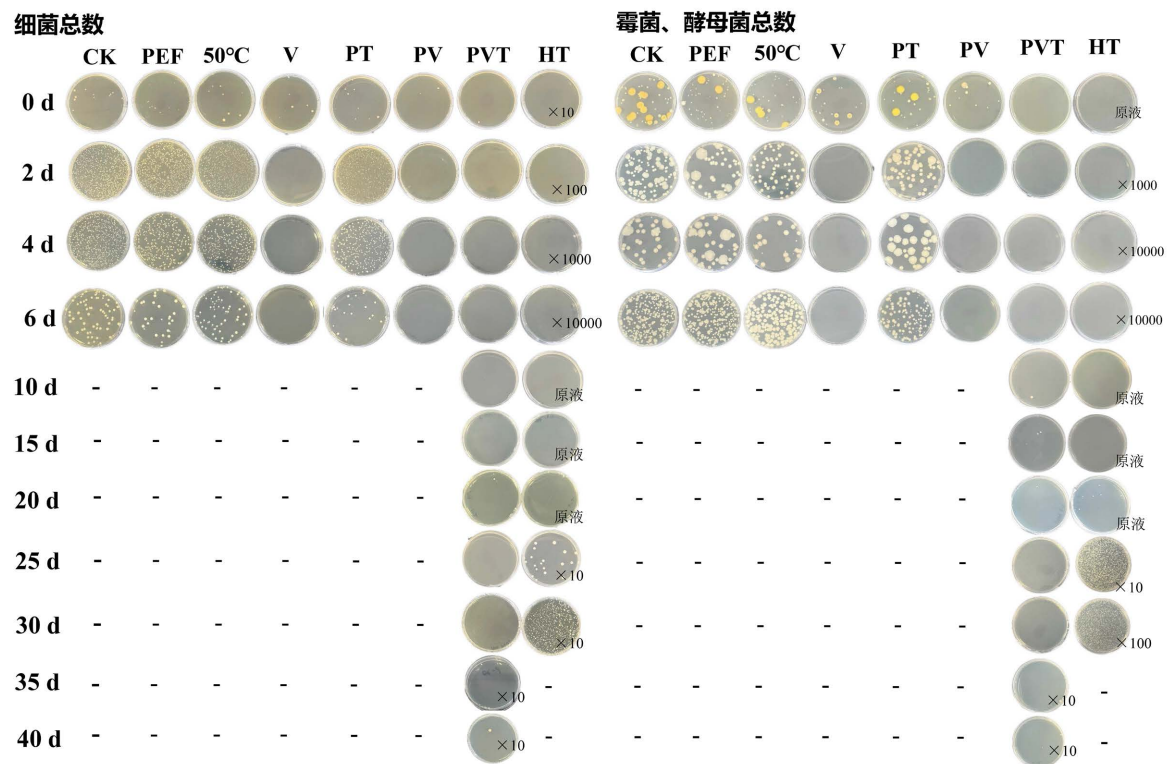


Figure 9. Effect of different treatments on TVC and TYMC in raspberry juice under 25°C storage conditions
图 9. 25°C 储存条件下不同处理方式对树莓汁中 TVC、TYMC 的影响

如表 1、表 2 及图 9 所示，在 25°C 贮藏条件下，PVT 处理果汁可在 40 天内均维持在国家标准(GB 7101-2022)限值范围内(TVC ≤ 10², TYMC ≤ 20)。相比之下，单独 PEF 处理组贮藏初期即出现微生物复苏现象，其微生物数量超标。Vanillin 抑菌效果短暂，在 4 d 后 TVC、TYMC 均超标，效果不如 PVT 组。在 20 d 后，HT 处理组菌落数超标，直至 40 d 后，PVT 组微生物数量依然在国家标准范围内，均优于其他各组。HT 组虽在前期(0~15 d)表现出良好抑菌性，但第 20 天 TVC 超出安全限值。

3.10 不同处理对树莓汁贮藏期浊度的影响

25°C 贮藏条件下，不同处理方式对树莓汁浊度的影响如表 3 及图 10 所示。贮藏初期(第 0 天)，各组

浊度无显著差异($p > 0.05$)。至第 8 天, PVT 处理组浊度与 HT 处理组无显著差异($p > 0.05$), 且显著低于 CK 组($p < 0.05$), 其他处理组均出现肉眼可见的浑浊。CK 组与单独 PEF 组相比较无显著差异, 可见单独 PEF 杀菌无法保持果汁的澄清。贮藏至第 25 天, PVT 组浊度最小并显著低于其他各组($p < 0.05$), 保持最优澄清度。

Table 3. Effect of different treatments on turbidity of raspberry juice under storage conditions at 25°C
表 3. 25℃ 储存条件下不同处理方式对树莓汁浊度的影响

储藏天数/处理方式	CK	PEF	50°C	Vanillin
0	0.15 ± 0.00 ^e	0.15 ± 0.00 ^{ef}	0.17 ± 0.00 ^d	0.18 ± 0.00 ^c
8	1.12 ± 0.00 ^a	1.05 ± 0.02 ^b	1.04 ± 0.01 ^b	0.27 ± 0.00 ^d
25	1.63 ± 0.02 ^a	1.63 ± 0.04 ^a	1.6 ± 0.01 ^b	0.74 ± 0.01 ^e
储藏天数/处理方式	PT	PV	PVT	HT
0	0.15 ± 0.00 ^e	0.19 ± 0.00 ^b	0.19 ± 0.00 ^b	0.26 ± 0.00 ^a
8	0.98 ± 0.02 ^c	0.27 ± 0.00 ^d	0.28 ± 0.00 ^d	0.27 ± 0.00 ^d
25	1.15 ± 0.00 ^c	0.46 ± 0.00 ^f	0.32 ± 0.01 ^g	0.95 ± 0.00 ^d

注: 值表示为平均值 ± SD (n = 3)。

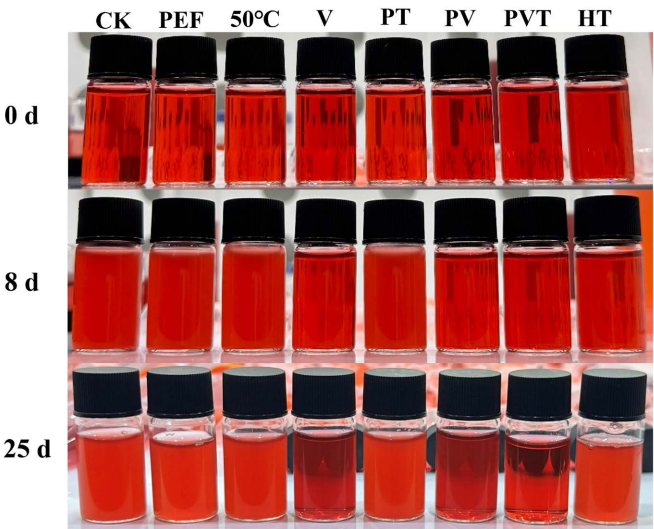


Figure 10. Effect of different treatments on turbidity of raspberry juice under storage conditions at 25°C
图 10. 25℃ 储存条件下不同处理方式对树莓汁浊度的影响

4. 结论与讨论

树莓汁在加工和贮藏过程中保持其安全性和品质稳定性至关重要, 引入非热加工技术对提高果蔬汁加工技术水平具有重要意义。本研究表明, 基于中温辅助的 PEF-香草醛复合杀菌技术(PVT)在树莓汁杀菌及品质保持方面表现出显著优势。通过综合考虑选出最佳处理条件为电场强度 40 kV/cm、香草醛浓度 1.28 mg/mL、水浴温度 50℃、PEF 处理时间 60 s。在品质方面, PVT 显著提升了总酚含量和蛋白质含量 ($p < 0.05$), 但花色苷保留效果略低, 但与 HT 组不显著($p > 0.05$)。同时, 其对多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)活性的抑制效果接近 HT 组。贮藏实验表明, PVT 处理组在 25℃ 条件下 40 天内 TVC 和 TYMC 均符合国家标准($\leq 10^2$ CFU/mL 和 ≤ 20 CFU/mL), 浊度显著低于其他组($p < 0.05$), 货架期延长至 40 天, 优

于 HT 组的 20 天。

本研究中, PVT 处理在树莓汁杀菌及品质保持方面的表现, 可能与香草醛和 PEF 的协同作用有关。单独 PEF 能够引起微生物亚致死损伤, 且亚致死损伤微生物能够在适宜环境条件下恢复为正常细胞, 进而继续繁殖造成食品腐败变质或引发食源性疾病[19]-[22]。PVT 的协同作用源于香草醛破坏微生物细胞膜与 PEF 电穿孔效应的叠加[17] [23] [24], 辅以中温水浴提高细胞膜流动性, 进一步增强了微生物对电场的敏感性[25] [26], 这一机制通过温度调控进一步优化了物理场与化学抑菌剂的交互效应。与传统热处理相比, HT 虽能完全抑制酶活性, 但其热敏成分损失较大, 且贮藏后期因耐热芽孢再活化导致微生物超标[27]-[29]。PVT 在保留总酚方面更具优势, 这与香草醛自身含酚羟基密切相关; 并且其通过彻底破坏微生物细胞膜导致微生物完全致死[30] [31]。此外, PVT 与 HT 均能促进可溶性蛋白释放。此外, 本研究还发现 PVT 处理在贮藏期间能有效抑制树莓汁中微生物的亚致死[32], 延长货架期。这可能与 PVT 处理对微生物细胞膜的破坏更为彻底, 从而降低了微生物在贮藏过程中的复苏能力有关。同时, PVT 处理还能保持树莓汁的澄清度, 这可能与处理过程中微生物的彻底灭活减少了果汁在贮藏过程中的浑浊现象有关。

综上所述, 本研究开发的基于中温辅助的 PEF-香草醛复合杀菌技术为树莓汁的杀菌及品质保持提供了一种新的解决方案。未来可结合分子手段解析协同机制, 并探索更多天然抑菌剂与物理场的联合应用, 为非热杀菌技术提供理论支持与实践方向。

基金项目

辽宁省丹东高新区小浆果加工科技特派团(2024JH5/10400129)。

参考文献

- [1] Martín-Gómez, J., García-Martínez, T., Varo, M.Á., Mérida, J. and Serratos, M.P. (2021) Phenolic Compounds, Antioxidant Activity and Color in the Fermentation of Mixed Blueberry and Grape Juice with Different Yeasts. *LWT*, **146**, Article ID: 111661. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111661>
- [2] Delso, C., Berzosa, A., Sanz, J., Álvarez, I. and Raso, J. (2023) Pulsed Electric Field Processing as an Alternative to Sulfites (SO₂) for Controlling *Saccharomyces Cerevisiae* Involved in the Fermentation of Chardonnay White Wine. *Food Research International*, **165**, Article ID: 112525. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112525>
- [3] 刘畅. 新型食品加工技术的研究进展及应用前景[J]. 中国食品工业, 2024(11): 143-145.
- [4] Gomez-Gomez, A., Brito-de la Fuente, E., Gallegos, C., Garcia-Perez, J.V. and Benedito, J. (2021) Combined Pulsed Electric Field and High-Power Ultrasound Treatments for Microbial Inactivation in Oil-in-Water Emulsions. *Food Control*, **130**, Article ID: 108348. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108348>
- [5] Brito, I.P.C. and Silva, E.K. (2024) Pulsed Electric Field Technology in Vegetable and Fruit Juice Processing: A Review. *Food Research International*, **184**, Article 114207. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114207>
- [6] Niu, D., Zeng, X., Ren, E., Xu, F., Li, J., Wang, M., et al. (2020) Review of the Application of Pulsed Electric Fields (PEF) Technology for Food Processing in China. *Food Research International*, **137**, Article ID: 109715. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109715>
- [7] Barba, F.J., Parniakov, O., Pereira, S.A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., et al. (2015) Current Applications and New Opportunities for the Use of Pulsed Electric Fields in Food Science and Industry. *Food Research International*, **77**, 773-798. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.015>
- [8] Wang, Q., Li, Y., Sun, D. and Zhu, Z. (2018) Enhancing Food Processing by Pulsed and High Voltage Electric Fields: Principles and Applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **58**, 2285-2298. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1434609>
- [9] Abadi, M.R.Q.R., Marzebali, M.H., Abolghasemi, V. and Anisi, M.H. (2022) High-Voltage Pulse Generators for Electroporation Applications: A Systematic Review. *IEEE Access*, **10**, 64933-64951. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3184015>
- [10] 黄昕汀. 壳聚糖-香兰素席夫碱乳液的理化性质及其对面包防腐作用的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆工商大学, 2023.
- [11] 蒋明昊. 中温联合超高压处理对黑果腺肋花楸果汁品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2020.

- [12] 刘鑫. 不同居群长白山笃斯越桔种质资源总黄酮、花青苷和总酚含量变异研究[D]: [硕士学位论文]. 延吉: 延边大学, 2020.
- [13] Zhang, Y., Dong, W., Zhao, M., Zhang, J., Li, L., Ma, Y., *et al.* (2024) Identification and Analysis of Phenolic Compounds in *Vaccinium uliginosum* L. and Its Lipid-Lowering Activity *in Vitro*. *Foods*, **13**, Article 3438. <https://doi.org/10.3390/foods13213438>
- [14] 张琦, 赵曼君, 张颖, 等. 不同处理方式对黑加仑果汁出汁率及品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(19): 1-6.
- [15] 汪浪红. 柚皮素协同脉冲电场杀灭大肠杆菌和金黄色葡萄球菌机制研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [16] 王明珠, 田子豪, 谭中美, 等. 细菌素协同物理技术对食源性致病菌和腐败微生物防控的研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 425-435.
- [17] 白泓. 热超声协同香草醛对苹果汁中食源性致病菌的杀菌效果及其杀菌机制[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [18] 邝金艳, 林颖, 王丽, 等. 中强度脉冲电场对大肠杆菌的灭活效果及机理分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(3): 192-202.
- [19] 王博华, 相启森, 白艳红. 非热加工技术诱导微生物亚致死损伤及控制方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 459-465.
- [20] 齐梦圆, 刘卿妍, 石素素, 等. 高压电场技术在食品杀菌中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 284-292.
- [21] Li, Z., Yang, Q., Du, H. and Wu, W. (2021) Advances of Pulsed Electric Field for Foodborne Pathogen Sterilization. *Food Reviews International*, **39**, 3603-3619. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2012798>
- [22] Zhang, C., Lyu, X., Arshad, R.N., Aadil, R.M., Tong, Y., Zhao, W., *et al.* (2023) Pulsed Electric Field as a Promising Technology for Solid Foods Processing: A Review. *Food Chemistry*, **403**, Article 134367. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134367>
- [23] Tan, M., Li, Y., Zhao, S., Yue, F., Cai, D., Wu, J., *et al.* (2024) Synergistic Ultrasound Pulsed Electric Field Extraction of Litchi Peel Polyphenols and Determination of Their Properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, **260**, Article ID: 129613. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129613>
- [24] Niu, D., Feng, X., Zhang, A., Li, K., Wang, L., Zeng, X., *et al.* (2024) Revealing the Synergistic Antibacterial Mechanisms of Resveratrol (RES) and Pulsed Electric Field (PEF) against *Acetobacter* sp. *Food Research International*, **197**, Article ID: 115237. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115237>
- [25] 马亚琴, 贾蒙, 成传香, 等. 超高压诱导食品中微生物失活的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 268-275.
- [26] 庞文婷, 李思佳, 尹家辉, 等. 中温微酸性电解水并联对鲜切苹果贮藏品质的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(6): 997-1005.
- [27] 侯霞霞, 王云霞, 刘丽君, 等. 生牛乳中芽孢杆菌的分离鉴定及其耐热性[J]. 乳业科学与技术, 2022, 45(6): 1-6.
- [28] 张秋荣, 刘祥祥, 李向阳, 等. 复合果蔬汁饮料发展现状及前景分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(14): 294-299.
- [29] Freire, V., Casañas, L., Laborda, L., Condón, S. and Gayán, E. (2024) Influence of Sporulation Temperature on Germination and Growth of *B. weihenstephanensis* Strains in Specific Nutrients and in an Extended Shelf-Life Refrigerated Matrix under Commercial Pasteurization and Storage Conditions. *Foods*, **13**, Article 3434. <https://doi.org/10.3390/foods13213434>
- [30] Li, L., Yang, R. and Zhao, W. (2021) The Effect of Pulsed Electric Fields (PEF) Combined with Temperature and Natural Preservatives on the Quality and Microbiological Shelf-Life of Cantaloupe Juice. *Foods*, **10**, Article 2606. <https://doi.org/10.3390/foods10112606>
- [31] Lewis, B., Mendonca, A., Fortes-Da-Silva, P., Boylston, T., Little, A., Brehm-Stecher, B., *et al.* (2024) A Combination of High-Voltage Atmospheric Cold Plasma and Cinnamaldehyde Significantly Increases Inactivation of *Salmonella* Enterica and *Escherichia coli* O157: H7 in Raw Pineapple Juice. *LWT*, **203**, Article ID: 116380. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116380>
- [32] Lytras, F., Psakis, G., Gatt, R., Cebrián, G., Raso, J. and Valdramidis, V. (2024) Exploring the Efficacy of Pulsed Electric Fields (PEF) in Microbial Inactivation during Food Processing: A Deep Dive into the Microbial Cellular and Molecular Mechanisms. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **95**, Article ID: 103732. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103732>