DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251126003
引用格式: 李子墨, 张少军, 崔志焓, 等. 高压静电场处理对玉露香梨贮藏品质及采后生理的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 197–205.
LI ZM, ZHANG SJ, CUI ZH, *et al*. Effects of high voltage electrostatic field treatment on the storage quality and postharvest physiology of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang' [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 197–205. (in Chinese with English abstract).

高压静电场处理对玉露香梨贮藏品质及采后生理的影响

李子墨[1,2], 张少军[1,2], 崔志焓[1,2], 冉世明[3], 杨 盛[4], 王 愈[1,2*]

(1. 山西农业大学食品科学与工程学院, 晋中 030801; 2. 山西省果蔬贮藏保鲜与加工技术创新中心, 晋中 030801; 3. 新疆得耘兴泰农业有限公司, 阿勒泰 836400; 4. 山西农业大学果树研究所, 晋中 030815)

摘 要: 目的 探究高压静电场处理对玉露香梨贮藏品质及采后生理的影响。**方法** 以玉露香梨为原料, 在温度为 24 ℃, 相对湿度为 85%~90%条件下设置试验为 50、100、150 kV/m 3 个电场强度, 分别处理 1、2、3 h 贮藏 45 d, 对照组不作处理, 分别在第 9、18、27、36、45 d 测定玉露香梨硬度、可溶性固形物含量、色差、呼吸强度和乙烯释放量等指标。**结果** 100 kV/m 电场强度处理能最有效地维持果实硬度和可溶性固形物含量; 50 kV/m 电场强度处理对抑制呼吸强度和乙烯释放量的效果最佳。100 kV/m 处理 1 h, 能有效延缓玉露香梨品质劣变, 延长其贮藏期。**结论** 综合分析可得, 高压静电场能有效维持玉露香梨的贮藏品质, 本研究为玉露香梨保鲜贮藏提供切实可行的方案。

关键词: 高压静电场; 玉露香梨; 贮藏效果

Effects of high voltage electrostatic field treatment on the storage quality and postharvest physiology of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang'

LI Zi-Mo[1,2], ZHANG Shao-Jun[1,2], CUI Zhi-Han[1,2], RAN Shi-Ming[3], YANG Sheng[4], WANG Yu[1,2*]

(1. *College of Food Science and Engineering*, *Shanxi Agricultural University*, *Jinzhong* 030801, *China*; 2. *Shanxi Center of Technology Innovation for Storage and Processing Technology of Fruit and Vegetable*, *Jinzhong* 030801, *China*; 3. *Xinjiang Deyun Xingtai Agricultural Co.*, *Ltd.*, *Altay* 836400, *China*; 4. *Fruit Tree Research Institute of Shanxi Agricultural University*, *Jinzhong* 030815, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of high voltage electrostatic field treatment on the storage quality and postharvest physiology of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang'. **Methods** Using *Pyrus* 'Yu Lu Xiang's as material, experiments were conducted under conditions of 24 °C and 85%–90% relative humidity. The 3 electric field intensities (50, 100

收稿日期: 2025-11-26
基金项目: 兵团重点领域科技攻关计划项目(2023AB004-01); 晋中国家农高区食品科学与工程教授、博士工作站资助项目(JZNGQBSGZZ003)
第一作者: 李子墨(2004—), 男, 主要研究方向为果蔬贮藏与加工。E-mail: 13875812886@163.com
***通信作者:** 王愈(1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail: sxtgwy@126.com

and 150 kV/m) were applied, with treatment durations of 1, 2 and 3 h, respectively, followed by storage for 45 d. A control group received no treatment. Indicators including fruit firmness, soluble solid content, color difference, respiration rate and ethylene release were measured on 9, 18, 27, 36 and 45 d of storage. **Results** The 100 kV/m treatment was most effective in maintaining fruit firmness and soluble solid content. The 50 kV/m treatment was most effective in suppressing the respiration rate and ethylene release. The treatment at 100 kV/m for 1 h effectively delayed the quality deterioration of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang's and extended their storage period. **Conclusion** In summary, high voltage electrostatic field treatment can effectively maintain the storage quality of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang'. This study provides a practical and feasible protocol for the preservation and storage of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang'.

KEY WORDS: high voltage electrostatic field; *Pyrus* 'Yu Lu Xiang'; storage effect

0 引 言

玉露香梨是山西农业大学(山西省农业科学院)果树研究所选用库尔勒香梨作为母本、雪花梨作为父本杂交培育而成的优质中熟梨新品种。其果实汁多味甜、酥脆爽口, 可食率高达 90%以上, 富含维生素 C 及多种矿物质, 具有提高机体抗氧化能力、维持人体电解质平衡等重要健康价值[1], 深受消费者喜爱, 产业价值显著。

然而, 玉露香梨作为典型的呼吸跃变型果实, 采后在适宜条件下会出现呼吸速率与乙烯释放量的急剧升高[2], 加速果实成熟衰老、品质劣变及腐烂, 对其贮藏保鲜提出了严峻挑战。随着其种植面积与产量的不断扩大, 采后损耗问题日益凸显。目前, 玉露香梨的贮藏保鲜研究多依赖于传统方法, 如低温冷藏、自发气调包装(modified atmosphere packaging, MAP)、涂膜及化学保鲜剂等, 这些方法虽各具优势, 但仍存在明显局限性: 低温冷藏能耗高且易引发冷害[3]; MAP 内部易形成高湿环境, 增加腐败风险[4]; 薄膜和涂层可在果实上形成屏障层, 以此保持气性特性, 控制微生物的呼吸速率以及生长[5]; 化学保鲜剂则可能存在药物残留隐患[6]。因此, 开发高效、安全、环保的新型保鲜技术已成为产业发展的迫切需求。

高压静电场(high voltage electrostatic field, HVEF)作为一种新兴的物理保鲜技术, 因其具有低能耗、无热效应、无残留等突出优点, 在果蔬采后保鲜领域展现出巨大潜力。其作用机制主要在于通过 HVEF 产生的离子风及电化学效应, 影响果蔬组织细胞的膜电位、离子平衡和酶活性, 进而抑制呼吸作用与乙烯合成, 延缓衰老进程, 同时还能有效抑制表面微生物的生长, 从而维持果蔬的贮藏品质与新鲜度[7]。近年来, 大量研究证实了 HVEF 在多种果蔬保鲜中的积极作用, 例如: CHANG 等[8]研究发现, 联合应用酸性电解水与 HVEF 比单独处理更能明显提升壶瓶枣的贮藏品质; 杨泽鹏等[9]研究发现, HVEF 联合低温处理能有效抑制莴笋的呼吸速率, 并更好地维持其硬度、色泽、叶绿素及水分等贮藏品质指标; 王愈等[10]发现 HVEF 可降低绿熟番茄腐烂指数并延缓品质下降; 吴珏等[11]证实高压电场可抑制椪柑呼吸并减少贮藏损失; 杨智超等[12]研究也表明该处理能减少樱桃番茄菌落总数并延缓腐烂; LI 等[13]研究发现, 较低强度的磁场与电场协同结合冷藏, 可延缓菠菜衰老并保持其鲜度; 陈洁如等[14]发现 150 kV/m HVEF 处理可显著抑制青皮扁桃的失重与褐变(P<0.05); MOHAMMAD 等[15]发现 1.5 kV/cm 电场可提升石榴抗氧化酶活; YANG 等[16]研究表明该处理可延长葡萄保鲜期; PANG 等[17]验证其对红薯具有抑菌、防褐变保鲜效果。因此, 可以认为高压静电场能通过抑制呼吸、抑菌、防褐变、保水护色等途径, 显著提升多种果蔬贮藏品质。

尽管 HVEF 技术在多种果蔬上应用研究已取得显著进展, 但针对玉露香梨这一特定品种的系统研究仍较为匮乏, 现研究多集中于传统气调与低温贮藏[3−4], 关于 HVEF 处理对其贮藏品质及采后生理影响的研究尚不深入。鉴于此, 本研究以玉露香梨为试验对象, 在预实验基础上, 系统探究不同强度(50、100、150 kV/m)与不同处理时间(1、2、3 h)的 HVEF 处理对其采后贮藏过程中硬度、可溶性固形物含量、色泽、呼吸强度及乙烯释放量等关键指标的影响规律, 旨在明确 HVEF 处理对玉露香梨的保鲜效应, 并筛选其适宜处理参数, 以期为拓展 HVEF 技术在梨果贮藏中的应用提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

1.1.1 试验与材料

玉露香梨: 购于山西省晋中市太谷区山西农业大学果树研究所, 采收时间为 2024 年 9 月 20 日, 挑选形状大小均匀, 成熟度颜色一致且无机械损伤和病虫害的 600 个玉露香梨作为试验材料。采收后将玉露香梨按照处理分别设置为对照、50、100、150 kV/m 电场处理 4 个组, 然后将每组按照处理不同时间分为 12 个小组, 处理后用聚乙烯薄膜覆盖并贮藏于温度 24 ℃, 相对湿度为 85%~90%条件。

1.1.2　仪器与设备

F-940 便携式果蔬气调储藏气体分析仪(北京阳光亿事达科技有限公司); YS3060 光栅分光测色仪(深圳市三恩时科技有限公司); PAL-α 手持折光仪(上海尚普仪器设备有限公司); PR224ZH/E 型电子天平(精度 0.01 mg, 沈阳龙腾电子有限公司); TMS-Pro 质构仪(美国 Food Technology Corporation 公司)

1.2　试验设计

1.2.1　不同强度的电场对玉露香梨贮藏效果的影响

将玉露香梨放置于通电下极板上, 固定极板间距为 15 cm。在本研究中共设置有 3 个试验组和 1 个对照组。试验组分别通入 7.5、15.0、22.5 kV 的负高压以产生 50、100、150 kV/m 的电场强度。在此 3 种电场强度下对玉露香梨进行处理, 对照组玉露香梨放置于电极板上, 不进行 HVEF 处理, 期间每隔 9 d 进行一次数据测定。

1.2.2　同一电场强度下处理时间对玉露香梨贮藏效果的影响

将玉露香梨放置于通电下极板上, 固定极板间距为 15 cm。在本试验中共设置有 3 个试验组和 1 个对照组。在 24 ℃, 相对湿度为 85%~90%, 同一电场强度处理的相同试验条件下, 分别对试验组玉露香梨进行 1、2、3 h HVEF 处理, 并将对照组玉露香梨在相同试验条件下的电极板上放置, 不进行 HVEF 处理。

1.3　试验指标与测定方法

1.3.1　硬度的测定

硬度是评估果实成熟度和贮藏品质的重要指标。参考朱志强等[18]的方法进行测定, 每个处理选取 3 个玉露香梨, 均匀选取果实赤道圈的 5 个点(1 cm×1 cm), 用直径 5 mm 的 P5 圆形探头进行测定, 深度为 10 mm, 测前、测中、测后速度分别为 2、1、10 mm/s。每组进行 3 次重复, 结果取平均值。

1.3.2　可溶性固形物含量的测定

参考苏娜等[19]的方法采用手持折光仪进行测定, 每组选取 3 个玉露香梨进行榨汁, 测定可溶性固形物含量, 每组重复测定 3 次, 取平均值。这一指标反映了果实的甜度和风味。

1.3.3　色差的测定

选取不同处理的玉露香梨, 分别使用光栅分光测色仪测定样品的 L^*, a^*, b^*。测试前, 色度计进行校准, 对每个样品进行 4 次测量, 以减少误差, 每次测量可获得 3 种颜色分量(L^*、a^*、b^*), 以评估果实的外观品质和成熟度。

1.3.4　呼吸强度的测定

参考齐杰等[20]的方法进行测定, 选取不同处理的玉露香梨分别放置于保鲜盒中, 利用 F-940 便携式果蔬气调储藏气体分析仪测定玉露香梨的二氧化碳(CO_2)释放量, 并记录样品质量, 保鲜盒体积等数据。

呼吸强度计算按照公式(1):

$$\text{呼吸强度}/(\text{mg/kg}\cdot\text{h}) = (W_2-W_1)\times0.125\times44\times1000/(24.5\times m_a\times t) \quad (1)$$

式中: W_1 为容器内最初 CO_2 总量, %; W_2 为测定后 CO_2 总量, %; m_a 为测定时样品质量, kg; t 为测定时间, h; 0.125 为烧杯总体积, L; 44 为 CO_2 的摩尔质量, g/mol; 24.5 为 25 ℃、1.01×10^5 Pa 下 1 摩尔气体体积, L/mol; 1000 为 g 转换为 mg 的换算。

1.3.5　乙烯释放量的测定

选取不同处理的玉露香梨分别放置于总体积为 0.125 L 的保鲜盒中 1 h, 利用 F-940 便携式果蔬气调储藏气体分析仪测定保鲜盒中的乙烯浓度, 并记录样品质量(kg), 保鲜盒体积(L)等数据,每组重复 3 次。

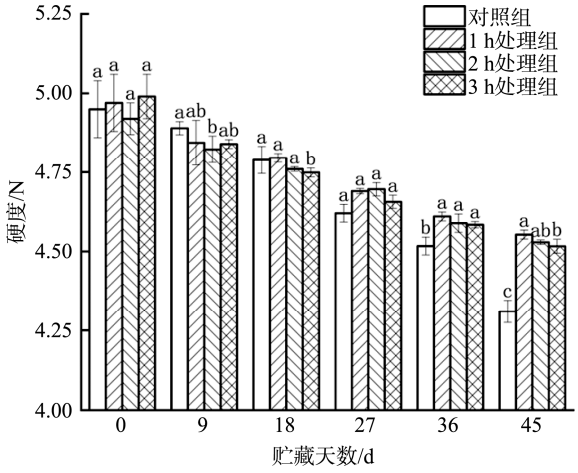
1.4　数据处理

采用 SPSS 27.0、Origin 2024、Excel 2019 等软件进行数据的统计与分析, 实验结果以平均值±标准偏差表示。采用 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析, 通过邓肯检验(P<0.05)检测显著性差异, 置信区间为 95%。图表通过 Origin 2024 软件绘制。所有测量均重复 3 次。

2　结果与分析

2.1　HVEF 处理对玉露香梨硬度的影响

由图 1~3 可知, 在贮藏期内, 随着贮藏时间的延长, 各组玉露香梨的硬度均呈现出逐渐下降的趋势, 这与 NIE 等[21–22]研究 HVEF 处理的西红柿和燕麦其硬度在贮藏期的趋势一致。其中对照组的硬度在 45 d 时显著低于处理组(P<0.05), 说明经过电场处理后的玉露香梨在贮藏后期能够维持较高的硬度; 且 3 个电场强度下, 在贮藏后



注: 不同小写字母表示同一储藏天数不同处理间存在差异显著(P<0.05), 图 2~3、5~13 同。

图 1　50 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨硬度变化趋势

Fig.1　Change trend of hardness of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang' under 50 kV/m HVEF treatment

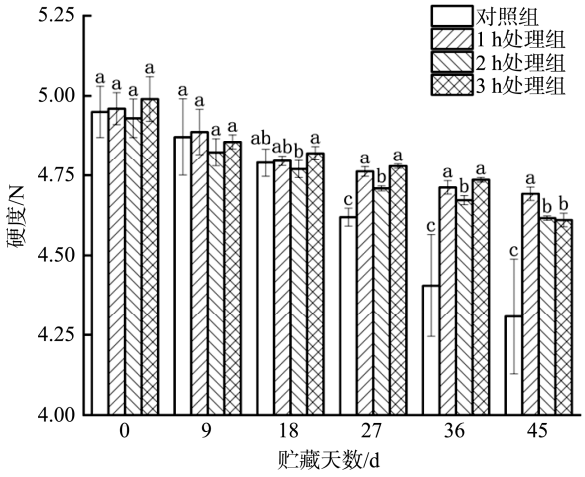


图 2 100 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨硬度变化趋势

Fig.2 Change trend of hardness of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ under 100 kV/m HVEF treatment

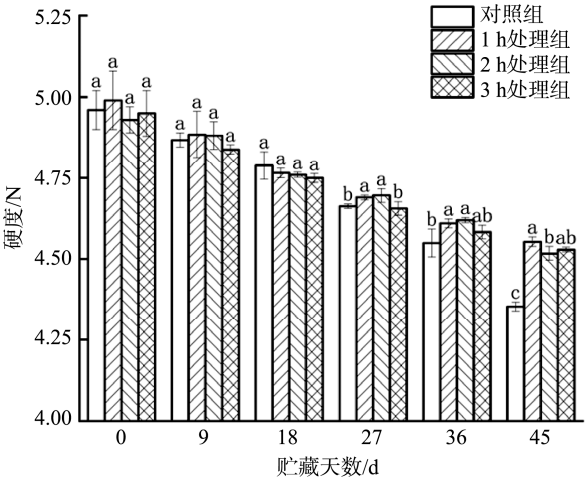


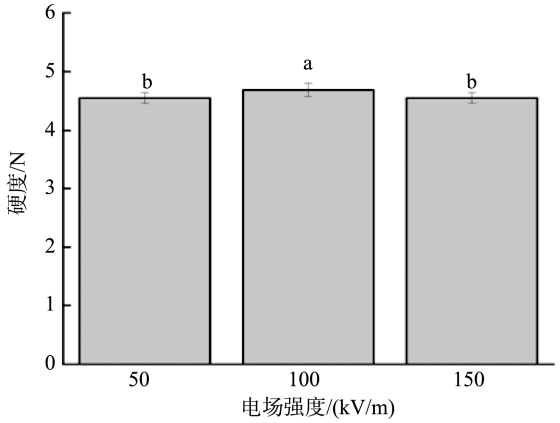
图 3 150 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨硬度变化趋势

Fig.3 Change trend of hardness of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ under 150 kV/m HVEF treatment

期, 100 kV/m 处理组的硬度下降趋势最平缓, 高于另外两个处理组, 说明 100 kV/m 处理能够较好维持玉露香梨的硬度; 同时对比不同处理时长发现, 处理 1 h 硬度保持效果综合来看优于其他组。另外, 对比不同 HVEF 强度的最佳处理时间(1 h)发现, 100 kV/m 下硬度显著高于另外两个电场强度(P<0.05), 因此选择 100 kV/m-1 h(图 4)。

2.2 HVEF 处理对玉露香梨可溶性固形物含量的影响

由图 5~7 可知, 随着贮藏时间延长, 各组玉露香梨可溶性固形物含量均呈现出先上升后下降的趋势, 这与霍英娇等[23]研究趋势一致。在贮藏初期, 对照组与 1 h 处理组的可溶性固形物含量大致相同, 在贮藏 45 d 时, 对照组的可溶性固形物含量显著低于 50 kV/m 和 100 kV/m 高压静电场处理组(P<0.05), 说明电场处理后的玉露香梨能够较好维持可溶



注: 不同小写字母表示存在差异显著(P<0.05)。

图 4 50、100、150 kV/m HVEF 最佳处理条件下玉露香梨硬度

Fig.4 Hardness of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ under the optimal treatment conditions of 50, 100 and 150 kV/m HVEF

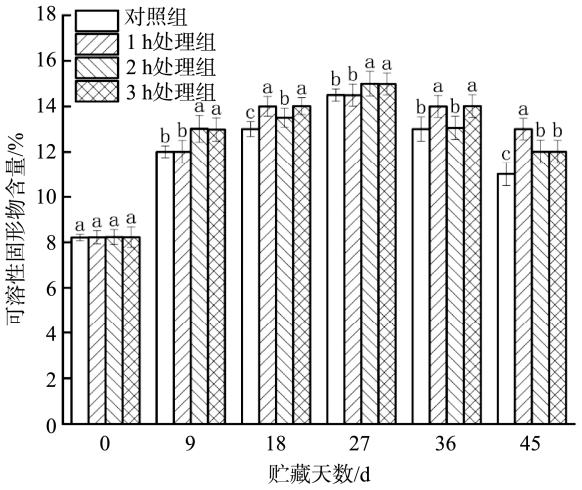


图 5 50 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨可溶性固形物含量变化趋势

Fig.5 Change trend of soluble solids content of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ under 50 kV/m HVEF treatment

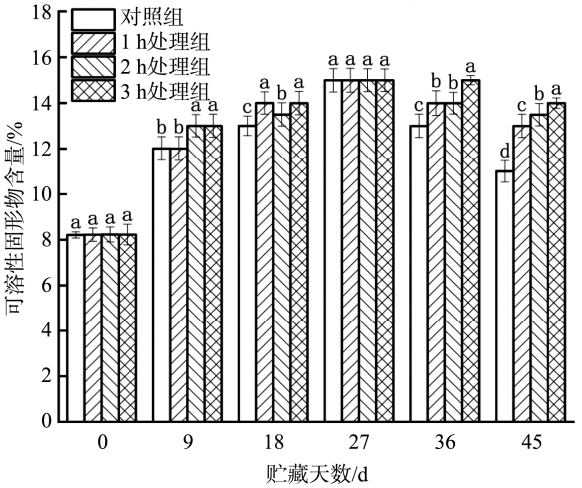


图 6 100 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨可溶性固形物含量变化趋势

Fig.6 Change trend of soluble solids content of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ under 100 kV/m HVEF treatment

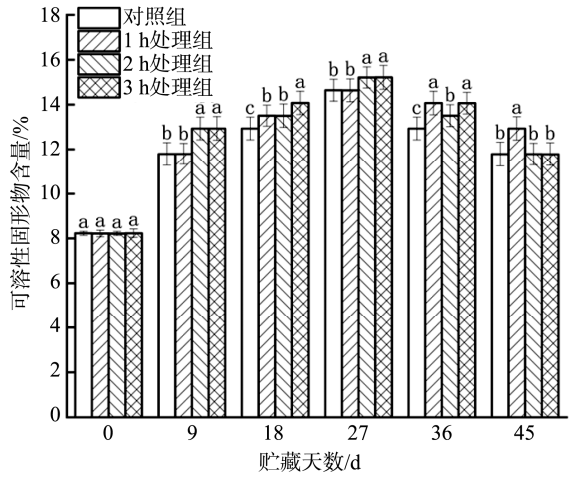


图 7　150 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨可溶性固形物含量变化趋势

Fig.7　Change trend of soluble solids content of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang' under 150 kV/m HVEF treatment

性固形物含量; 且对比 3 个不同电场强度的处理组, 发现在贮藏后期 36~45 d 时, 100 kV/m 电场强度下 3 个处理组的可溶性固形物含量高于 50 kV/m 和 150 kV/m 电场处理(P<0.05), 说明 100 kV/m 电场条件更有利于贮藏玉露香梨; 同时对比不同处理时长发现, 在贮藏后期, 处理 1 h 和 3 h 组其可溶性固形物含量保持在较高水平。

2.3　HVEF 处理对玉露香梨色差的影响

由表 1~3 可知, 各组玉露香梨的 L^*、b^*在贮藏后期呈现出逐渐下降的趋势, 而 a^*整体呈现上升的趋势, 这与陈洁如[24]研究 HVEF 处理对核桃在贮藏期间的趋势一致。玉露香梨的 L^*下降, 说明玉露香梨表皮的亮度逐渐降低, 尤其是对照组的 L^*显著低于 50 kV/m 和 150 kV/m 2 个电场处理组, 可能是因为高压电场处理能钝化酶的活性, 延缓样品的褐变, 因此对玉露香梨表皮颜色具有良好的保持作用[25]; a^*代表红度, 在玉露香梨的成熟和贮藏过程中, 由于多酚类物质被氧化成了醌, 褐色物质的积累使得玉露香梨生成红色或棕红色的色素, 从而导致 a^*的上升, LIU 等[26]研究甜樱桃贮藏期间颜色的变化发现, 随着贮藏时间的延长, 樱桃亮度下降, a^*升高, 这与本研究的结果一致; 同时对比不同处理时长发现, 1 h 处理组在 50 kV/m 和 150 kV/m HVEF 下其 L^*显著高于对照、2 h 和 3 h 处理(P<0.05), 说明电场处理 1 h 更有利于保持果实亮度; 且对比不同电场处理, 在贮藏后期, 36~45 d, 100 和 150 kV/m 电场强度下, 对照组、2 h 和 3 h 处理组的 L^*高于 50 kV/m 电场处理, 说明 100 kV/m 和 150 kV/m 的电场强度对玉露香梨的颜色保持效果最好。

2.4　HVEF 处理对玉露香梨呼吸强度的影响

由图 8~10 可知, 在贮藏期间, 随着贮藏时间的延长, 50 kV/m 和 150 kV/m 高压静电场处理组玉露香梨的呼吸强度遵循先上升后下降的趋势。在贮藏初期, 对照组与处理组玉露香梨的呼吸强度差异不大, 但贮藏 9~45 d, 对照组的呼吸强度显著高于处理组(P<0.05), 说明电场处理能够抑制玉露香梨的呼吸强度, DENG 等[27]研究发现, 高压电场处理能够抑制双孢姬松茸呼吸峰值, 这与本研究结论一致; 且对照组呼吸峰值出现在 18 d, 而处理组呼吸峰值都出现在 27 d, 说明高压电场处理能够延缓果实呼吸峰值的出现; 从不同处理时间来看, 在贮藏后期, 36~45 d 时, 1 h 处理组均保持最低的呼吸强度, 说明处理电场处理 1 h 能够更好抑制玉露香梨呼吸; 同时对比不同电场强度处理可以发现, 50 kV/m 下玉露香梨的呼吸强度最低。

表 1　50 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨色差变化

Table 1　Color changes of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang' under 50 kV/m HVEF treatment

	类别	0 d	9 d	18 d	27 d	36 d	45 d
L^*	对照组	69.66±0.32^a	66.87±0.34^c	63.83±0.19^d	62.35±0.30^d	56.75±0.46^c	54.08±0.42^d
	1 h	69.69±0.42^a	69.53±0.36^a	68.29±0.40^a	67.34±0.42^a	66.93±0.36^a	66.54±0.52^a
	2 h	69.32±0.33^a	67.58±0.43^b	64.37±0.29^c	63.97±0.32^c	60.47±0.32^b	58.46±0.31^b
	3 h	69.39±0.29^a	69.31±0.40^a	67.65±0.42^b	65.17±0.40^b	60.19±0.24^b	57.89±0.21^c
a^*	对照组	2.46±0.35^a	3.54±0.35^a	5.79±0.15^a	6.89±0.36^a	7.98±0.41^a	9.47±0.40^a
	1 h	2.39±0.20^a	3.14±0.13^b	4.68±0.24^c	5.53±0.35^c	6.97±0.17^c	7.83±0.38^c
	2 h	2.36±0.17^a	3.52±0.24^a	5.47±0.15^b	6.36±0.36^b	7.02±0.17^c	8.43±0.39^b
	3 h	2.44±0.25^a	3.49±0.34^a	5.62±0.15^{ab}	6.37±0.26^b	7.36±0.18^b	7.81±0.28^c
b^*	对照组	41.66±0.33^a	39.02±0.19^c	36.83±0.37^c	35.39±0.47^c	34.57±0.18^c	33.26±0.39^c
	1 h	41.57±0.13^a	39.48±0.17^b	37.85±0.38^b	37.54±0.38^b	35.23±0.18^b	34.19±0.29^b
	2 h	41.65±0.29^a	41.58±0.49^a	40.73±0.39^a	39.56±0.39^a	36.47±0.37^a	34.66±0.20^a
	3 h	41.67±0.39^a	39.43±0.21^b	37.12±0.29^c	35.72±0.42^c	34.96±0.20^b	33.56±0.40^c

注: 不同小写字母表示同一指标同一时间不同处理间存在差异显著(P<0.05), 下表同。

表 2 100 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨色差变化

Table 2 Color changes of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang' under 100 kV/m HVEF treatment

	类别	0 d	9 d	18 d	27 d	36 d	45 d
L^*	对照组	69.52±0.43^{a}	68.77±0.42^{a}	66.57±0.43^{a}	64.37±0.28^{a}	61.92±0.10^{a}	58.42±0.15^{d}
	1 h	69.79±0.28^{a}	65.23±0.48^{b}	63.85±0.46^{c}	62.95±0.37^{d}	61.35±0.24^{c}	60.36±0.31^{a}
	2 h	69.66±0.33^{a}	65.30±0.33^{b}	64.73±0.37^{b}	63.93±0.19^{b}	61.68±0.19^{b}	59.61±0.49^{b}
	3 h	69.59±0.19^{a}	64.78±0.35^{c}	64.05±0.36^{c}	63.65±0.21^{c}	61.51±0.22^{bc}	58.72±0.14^{c}
a^*	对照组	2.40±0.29^{a}	4.36±0.26^{a}	5.93±0.36^{a}	7.14±0.10^{a}	8.29±0.41^{a}	9.05±0.32^{a}
	1 h	2.39±0.37^{a}	4.23±0.19^{ab}	4.73±0.40^{d}	5.07±0.41^{d}	6.17±0.32^{c}	7.01±0.43^{d}
	2 h	2.41±0.35^{a}	4.18±0.45^{bc}	5.24±0.26^{c}	6.39±0.42^{c}	7.41±0.33^{b}	8.55±0.15^{b}
	3 h	2.50±0.48^{a}	4.03±0.14^{c}	5.57±0.23^{b}	6.92±0.13^{b}	7.54±0.26^{b}	8.25±0.15^{c}
b^*	对照组	41.69±0.29^{a}	40.02±0.31^{a}	37.59±0.17^{c}	35.51±0.43^{c}	33.27±0.34^{c}	31.91±0.45^{c}
	1 h	41.71±0.43^{a}	39.50±0.19^{b}	38.62±0.54^{a}	37.09±0.35^{a}	36.39±0.46^{a}	34.55±0.47^{a}
	2 h	41.70±0.18^{a}	37.99±0.53^{d}	37.14±0.36^{d}	36.32±0.37^{b}	35.13±0.28^{b}	33.42±0.39^{b}
	3 h	41.63±0.33^{a}	38.69±0.46^{c}	37.88±0.26^{b}	36.99±0.38^{a}	34.97±0.19^{b}	33.61±0.40^{b}

表 3 150 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨色差变化

Table 3 Color changes of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang' under 150 kV/m HVEF treatment

	类别	0 d	9 d	18 d	27 d	36 d	45 d
L^*	对照组	69.66±0.28^{a}	66.05±0.44^{d}	64.79±0.35^{d}	62.35±0.46^{d}	59.68±0.38^{d}	56.41±0.37^{d}
	1 h	69.61±0.32^{a}	69.91±0.36^{a}	68.54±0.46^{a}	66.63±0.47^{a}	65.37±0.48^{a}	64.89±0.39^{a}
	2 h	69.68±0.33^{a}	68.20±0.33^{c}	66.50±0.47^{c}	64.74±0.38^{c}	62.59±0.39^{c}	60.35±0.40^{c}
	3 h	69.71±0.43^{a}	69.01±0.26^{b}	67.82±0.27^{b}	65.56±0.38^{b}	63.70±0.29^{b}	61.59±0.39^{b}
a^*	对照组	2.43±0.39^{a}	3.58±0.29^{a}	5.77±0.18^{a}	7.95±0.43^{a}	8.65±0.37^{a}	9.29±0.42^{a}
	1 h	2.46±0.45^{a}	3.28±0.27^{b}	5.46±0.17^{b}	6.62±0.52^{b}	7.03±0.35^{c}	7.58±0.38^{d}
	2 h	2.37±0.07^{a}	3.19±0.37^{c}	5.12±0.27^{c}	6.70±0.43^{b}	7.78±0.46^{b}	8.53±0.39^{b}
	3 h	2.48±0.35^{a}	3.18±0.33^{c}	4.96±0.47^{d}	6.52±0.33^{b}	7.02±0.33^{c}	8.17±0.18^{c}
b^*	对照组	41.57±0.27^{a}	41.07±0.29^{a}	37.53±0.27^{d}	35.98±0.31^{d}	34.64±0.44^{d}	33.03±0.27^{d}
	1 h	41.59±0.23^{a}	39.23±0.33^{c}	39.21±0.35^{a}	39.19±0.51^{a}	38.25±0.44^{a}	37.00±0.47^{a}
	2 h	41.60±0.13^{a}	41.08±0.39^{a}	37.88±0.23^{c}	36.66±0.11^{c}	35.17±0.24^{c}	33.69±0.43^{c}
	3 h	41.53±0.36^{a}	39.43±0.51^{b}	38.95±0.44^{b}	36.93±0.21^{b}	35.83±0.44^{b}	34.18±0.37^{b}

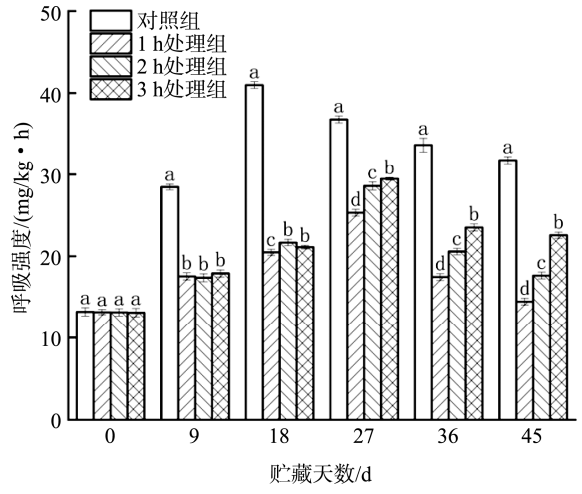


图 8 50 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨呼吸强度变化趋势

Fig.8 Change trend of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang' respiration intensity under 50 kV/m HVEF treatment

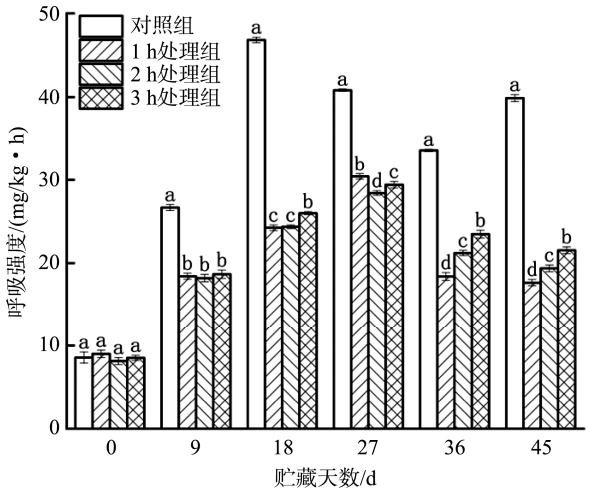


图 9 100 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨呼吸强度变化趋势

Fig.9 Change trend of *Pyrus* 'Yu Lu Xiang' respiration intensity under 100 kV/m HVEF treatment

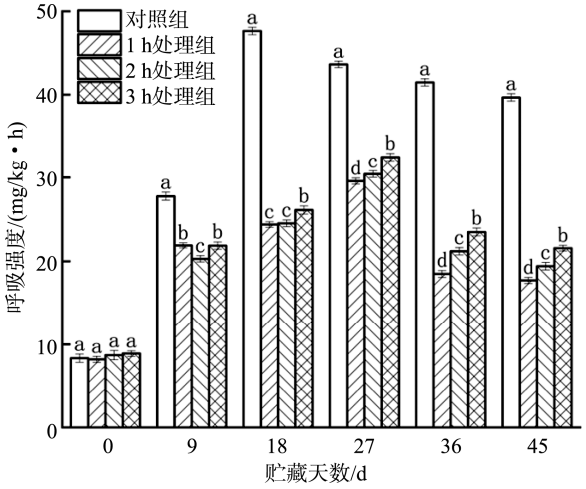


图 10　150 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨呼吸强度变化趋势

Fig.10　Change Trend of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ respiration intensity under 150 kV/m HVEF treatment

2.5　HVEF 处理对玉露香梨乙烯释放量的影响

由图 11~13 可知，在贮藏 0~36 d 期间，随着贮藏时间的延长，各组玉露香梨乙烯释放量总体呈现先上升后下降的趋势。对照组的乙烯释放量在 0~36 d 期间均高于其他处理组，且乙烯释放峰值出现在 18 d，而处理组的乙烯释放峰值均为 27 d，说明电场处理能够延缓乙烯释放峰值的出现，这与 WIWATPACHARA 等[28]研究 HVEF 处理能够延缓牛油果果实乙烯生成结论一致；对比不同处理时间发现，在贮藏 45 d 时，50 kV/m 和 100 kV/m 强度下，2 h 处理组的乙烯释放量显著低于对照组和 1 h 处理组(P<0.05)，说明 2 h 电场处理能够抑制乙烯释放，延缓果实衰老。

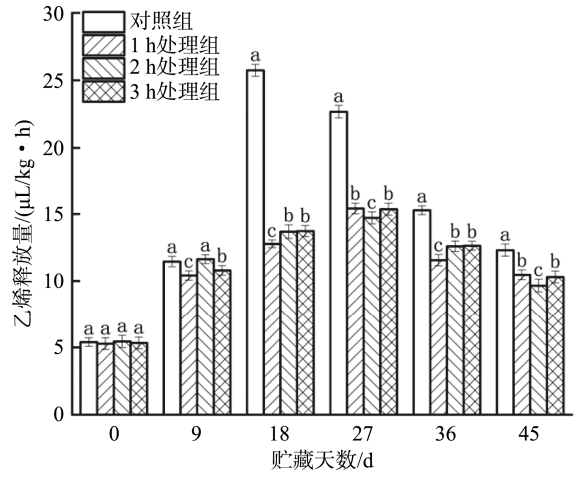


图 11　50 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨乙烯释放量变化趋势

Fig.11　Change trend of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ ethylene release under 50 kV/m HVEF treatment

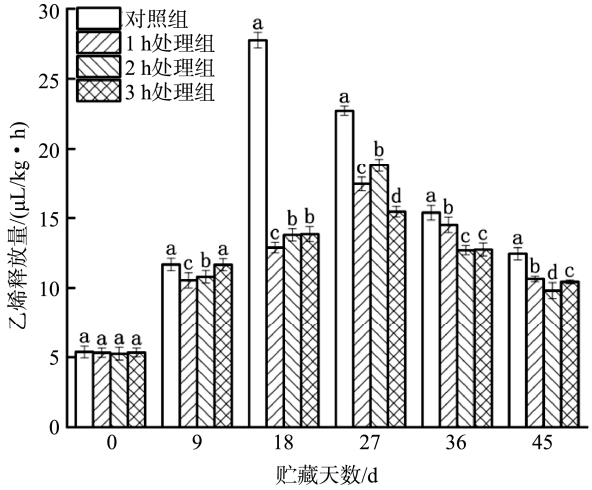


图 12　100 kV HVEF 处理条件下玉露香梨乙烯释放量变化趋势

Fig.12　Change trend of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ ethylene release under 100 kV/m HVEF treatment

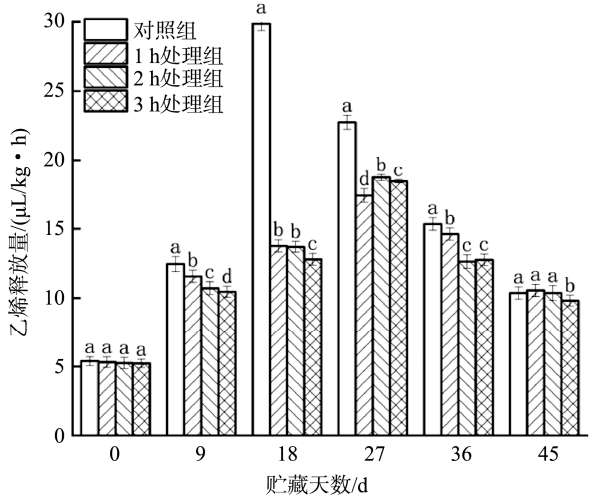


图 13　150 kV/m HVEF 处理条件下玉露香梨乙烯释放量变化趋势

Fig.13　Change trend of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ ethylene release under 150 kV/m HVEF treatment

3　讨　论

本研究通过分析硬度、可溶性固形物、色差、呼吸强度及乙烯释放量多个指标，揭示了 HVEF 强度与处理时间对玉露香梨贮藏效果的影响具有多维性，其最优参数因观测指标而异。具体而言，100 kV/m 的场强在维持果实硬度与延缓可溶性固形物下降方面效果最为明显；而 50 kV/m 的场强在抑制呼吸强度方面表现最佳，显示出其在延缓果实生理代谢与衰老进程方面的潜力。在处理时间上，1 h 的处理在硬度、可溶性固形物含量、色差和呼吸强度等多数指标上均表现出稳定且积极的效果。后续将进一步缩小处理时长，探究最佳处理时间。

这种参数效应的分化，揭示了 HVEF 在采后保鲜中作用机制的复杂性。本研究中不同场强对不同指标产生的差异化效应，可能与电场对细胞不同生理系统的选择性调控有关。高强度电场(如 100 kV/m)可能更有效地维持细胞壁结构完整性，从而延缓硬度下降；而较低强度电场(如 50 kV/m)则可能更有利于抑制与呼吸和乙烯合成相关的酶活性，如 1-氨基环丙烷-1-羧酸合成酶和 1-氨基环丙烷-1-羧酸氧化酶，这与 CHANG 等[29]研究 HVEF 下能够有效抑制枣呼吸的结论一致。

在实际应用中，确定最佳工艺需要在相互矛盾的优化方向间进行综合权衡。鉴于果实的外观质地(硬度)和风味(可溶性固形物)是决定市场接受度与商品价值的直接因素，其权重应优先于内在生理指标。因此，尽管 50 kV/m 在抑制生理代谢方面表现突出，但推荐采用在核心品质维持上表现更优的 100 kV/m 场强。结合处理时间效应，“100 kV/m-1 h”这一组合在关键品质指标上表现优异，同时在生理抑制方面也具有良好的效果(明显优于对照组)，故可被认为是本研究条件下，在品质维持与衰老延缓之间取得的最佳平衡点。

因此，HVEF 作为一种新兴的物理保鲜技术，在果蔬采后保鲜领域展现出巨大潜力，但本研究仍具有一定的局限性。本研究探讨 HVEF 处理对玉露香梨的保鲜效果，但未明确延长贮藏期的具体天数，在后期研究中将进一步探究 HVEF 对玉露香梨货架期评定，使结论进一步量化。

4 结 论

本研究系统考察了不同强度与处理时间的 HVEF 对玉露香梨贮藏效果的影响，得出以下结论：(1) HVEF 处理能有效延缓玉露香梨采后品质劣变，但其效果呈现指标特异性：100 kV/m 的电场强度更利于保持果实的硬度与可溶性固形物含量，而 50 kV/m 的电场强度则在抑制呼吸强度与乙烯释放方面更具优势。(2)不同处理时间对比显示，普遍适宜处理时间为 1 h。这与胡燕等[30]研究 HVEF 处理 1 h 可以有效地抑制莲藕的褐变,延缓莲藕的衰老,保持莲藕的新鲜品质的结论一致。(3)通过综合平衡各指标，因为硬度和风味是决定市场接受度与商品价值的直接因素，因此在优先考虑决定商品价值的品质属性的基础上，本研究确定以 100 kV/m 的场强处理 1 h 为玉露香梨高压静电场保鲜的推荐最优工艺参数。该研究为 HVEF 技术在梨果保鲜中的精准应用提供了理论依据。

参考文献

[1] 赵欣, 梁克红, 朱宏, 等. 不同品种梨营养品质及风味物质比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(21): 7797–7805.
ZHAO X, LIANG KH, ZHU H, *et al.* Comparative study on nutritional quality and flavor substances of different pear varieties [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(21): 7797–7805.

[2] 黄丽, 王亮, 赵迎丽, 等. 3 种梨贮藏期间果实品质、可溶性糖和有机酸含量变化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(10): 46–52.
HUANG L, WANG L, ZHAO YL, *et al.* Changes in fruit quality, soluble sugar and organic acid contents of three pear varieties during storage [J]. Food Research and Development, 2023, 44(10): 46–52.

[3] 赵迎丽, 张微, 杨志国, 等. 冰温贮藏对‘玉露香’梨果实抗氧化能力的影响[J]. 北方园艺, 2024(19): 90–98.
ZHAO YL, ZHANG W, YANG ZG, *et al.* Effects of ice temperature storage on the antioxidant capacity of *Pyrus* ‘Yu Lu Xiang’ fruits [J]. Northern Horticulture, 2024(19): 90–98.

[4] 黄丽, 杨志国, 任会会, 等. 不同浓度 CO_2 对玉露香梨贮藏品质的影响[J]. 果树资源学报, 2024, 5(3): 28–35.
HUANG L, YANG ZG, REN HH, *et al.* Effects of different concentrations of CO_2 on the storage quality of Yulu Xiang pear [J]. Journal of Fruit Resources, 2024, 5(3): 28–35.

[5] WU YM, WU Y, HAN P, *et al.* Effect of alginate coatings incorporated with chitinase from ‘Baozhu’ pear on the preservation of cherry tomato during refrigerated storage [J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(9): 3098–3105.

[6] 邹曼, 杨娟侠, 王少敏, 等. 库尔勒香梨贮藏保鲜方法研究进展[J]. 落叶果树, 2022, 54(5): 31–34.
ZOU M, YANG JX, WANG SM, *et al.* Research progress on storage and preservation methods of Korla sweet apples [J]. Deciduous Fruits, 2022, 54(5): 31–34.

[7] 张本华, 郭超. 高压电场处理黄瓜保鲜贮藏试验[J]. 农机化研究, 2012, 34(12): 144–147.
ZHANG BH, GUO C. Experiment on the preservation and storage of cucumbers by high voltage electric field treatment [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(12): 144–147.

[8] CHANG XJ, LIANG YG, GUO TJ, *et al*. Combined treatment of acidic electrolyzed water and high-voltage electrostatic field improves the storage quality of Huping Jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Huping). [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(14): 2762.

[9] 杨泽鹏, 王培鉴, 谌凯兰, 等. 高压静电场协同低温保鲜对莴笋贮藏品质影响及新鲜度的电子鼻无损检测研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(4): 57–64.
YANG ZP, WANG PJ, SHEN KL, *et al*. Research on the effects of high-pressure electrostatic field combined with low-temperature preservation on the storage quality of lettuce and the non-destructive detection of freshness by electronic nose [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(4): 57–64.

[10] 王愈, 王宝刚, 李里特. 不同电场处理方式对绿熟番茄贮藏效果的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(20): 434–438.
WANG Y, WANG BG, LI LT. Effects of different electric field treatment methods on the storage performance of green-ripe tomatoes [J] Food Science, 2010, 31(20): 434–438.

[11] 吴珏, 谢文华, 徐淑婷, 等. 高压静电场处理对椪柑采后贮藏性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 64–73, 82.
WU Y, XIE WH, XU ST, *et al.* The effects of high-pressure electrostatic field treatment on the post-harvest storage properties of pomelo [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2020, 46(1): 64–73, 82.

[12] 杨智超, 曹阳, 沈超怡, 等. 基于高压静电场处理的樱桃番茄果实贮藏期生理品质及其代谢[J]. 食品科学, 2021, 42(21): 168–176.
YANG ZC, CAO Y, SHEN CY, *et al.* Physiological quality and metabolism of cherry tomato fruits during storage under high-pressure electrostatic field treatment [J]. Food Science, 2021, 42(21): 168–176.

[13] LI T, AN GM, SUN QJ, *et al*. Effects of high voltage electrostatic field and weak magnetic field assisted refrigeration on preservation of spinach [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(6): 6484–6502.

[14] 陈洁如, 王瑞, 张立新, 等. 高压静电场处理对青皮扁桃果实采后生理与种仁品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(17): 302–309.
CHEN JR, WANG R, ZHANG LX, *et al*. Effects of high-pressure electrostatic field treatment on post-harvest physiology and kernel quality of prunus persica [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(17): 302–309.

[15] MOHAMMAD L, NASSER H, MOHSEN D, *et al*. Effects of high voltage electric field on storage life and antioxidant capacity of whole pomegranate fruit [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 75. DOI: 10. 1016/J. IFSET. 2021. 102888

[16] YANG MY, YAN SN, CHEN LJ, *et al*. Quality maintenance and metabolite changes of grape berry treated by high voltage alternating electric field during near-freezing temperature storage [J]. Food Chemistry, 2025, 465(P1): 141954.

[17] PANG LJ, LU GQ, CHENG JY, *et al*. Physiological and biochemical characteristics of sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] roots treated by a high voltage alternating electric field during cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 180: 111619.

[18] 朱志强, 王远宏, 仪慧兰, 等. 苯甲酸乙酯对‘阳光玫瑰’葡萄贮藏抗病性的影响[J]. 保鲜与加工, 2026, 26(2): 37–44.
ZHU ZQ, WANG YH, YI HL, *et al*. The effect of ethyl benzoate on the storage resistance of 'Sunshine Rose' grapes [J]. Storage and Process, 2026, 26(2): 37–44.

[19] 苏娜, 王希望, 李丽, 等. 壳聚糖盐酸盐采后处理对鲜切西兰花贮藏品质及叶绿素代谢的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(17): 263–270.
SUN N, WANG XW, LI L, *et al*. Effects of post-harvest treatment with chitosan hydrochloride on the storage quality and chlorophyll metabolism of fresh-cut broccoli [J]. Food Science, 2025, 46(17): 263–270.

[20] 齐杰, 陈凯灵, 孙若楠, 等. 壳聚糖-海藻酸钠/纤维素纳米晶多层包装对鲜切雪梨保鲜效果及呼吸代谢的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(9): 44–51.
QI J, CHEN KL, SUN RN, *et al*. Effects of chitosan-sodium alginate/cellulose nanocrystals multilayer packaging on the fresh-keeping and respiratory metabolism of fresh-cut snow pear [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(9): 44–51.

[21] NIE XB, ZUO ZJ, ZHOU L, *et al*. Investigating the effect of high-voltage electrostatic field (HVEF) treatment on the physicochemical characteristics, bioactive substances content, and shelf life of tomatoes [J]. Foods, 2024, 13(17): 2823–2823.

[22] 文绍聪, 张豆豆, 罗康菁, 等. 高压静电场处理对燕麦储藏效果的影响[J/OL]. 中国粮油学报, 1-16. [2025-11-26]. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001151.
WEN SC, ZHANG DD, LUO KJ, *et al*. The influence of high-voltage electrostatic field treatment on the storage effect of oats [J/OL]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1-16. [2025-11-26]. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001151.

[23] 霍英娇, 姜晓晨, 董士远, 等. 高压静电场处理对草莓保鲜品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(5): 15–21.
HUO YJ, JIANG XC, DONG SY, *et al*. The impact of high-pressure electrostatic field treatment on the freshness and quality of strawberries [J]. Storage and Process, 2023, 23(5): 15–21.

[24] 陈洁如. 高压静电场处理对青皮扁桃贮藏效果及抑芽机理的研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2024.
CHEN JR. Research on the storage effect and bud inhibition mechanism of green-peak almond after treatment with high-pressure electrostatic field [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2024.

[25] 李少萍, 张小燕, 董云雷, 等. 高压脉冲电场处理鲜切马铃薯丁的保鲜效果研究[J]. 包装与食品机械, 2025, 43(2): 88–95.
LI SP, ZHANG XY, DONG YL, *et al*. Research on the preservation effect of fresh-cut potato cubes treated by high-voltage pulse electric field [J]. Packaging and Food Machinery, 2025, 43(2): 88–95.

[26] LIU YL, ZHANG LL, HU T, *et al*. A new strategy for enhancing postharvest quality of sweet cherry: High-voltage electrostatic field improves the physicochemical properties and fungal community [J]. Foods, 2024, 13(22): 3670–3670.

[27] DENG B, JIA CL, JIA WT, *et al.* Mechanism of high-voltage electrostatic field treatment in maintaining the postharvest quality of agaricus bisporus [J]. Horticulturae, 2025, 11(9): 1129–1129.

[28] WIWATPACHARA C, KULRATTANARAK T, KONDO S, *et al*. Impact of high-voltage electrostatic field on physiological changes and cell wall-degrading enzymes in postharvest avocado fruit (*Persea americana* Mill.) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 106(4): 2126–2138.

[29] CHANG XJ, CHANG Y, CHANG XY, *et al*. Widely targeted metabolomics analysis reveals that the combined treatment of acidic electrolyzed water and a high-voltage electrostatic field maintains the storage quality of Huping jujube fruits [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 219: 117521.

[30] 胡燕, 陈忠杰. 高压静电场(HVEF)处理对莲藕品质的影响[J]. 食品科技, 2012, 37(3): 89–93.
HU Y, CHEN ZJ. Effect of high-voltage electrostatic field (HVEF) treatment on the quality of lotus root [J]. Food Science and Technology, 2012, 37(03): 89–93.

(责任编辑: 冯东慧　安香玉)