

低压静电场协同冰温对水蜜桃的保鲜效果分析

孙灵湘, 全鑫瑶, 邵千朔, 黄桂丽, 马佳佳, 李昊聪, 隋思瑶, 王毓宁*
(江苏太湖地区农业科学研究所, 江苏苏州 215000)

摘要: 为研究低压静电场 (Low Voltage Electrostatic Field, LVEF) 协同冰温 (Ice Temperature, IT) 对水蜜桃保鲜品质的影响, 在低温 (Low Temperature, LT) 贮藏 ($8 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)、低温 + 低压静电场贮藏 ($8 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 150 V)、冰温贮藏 ($-0.5 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和冰温 + 低压静电场贮藏 ($-0.5 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 150 V) 四种不同贮藏条件下, 考察了水蜜桃果实在 0~15 d 的外观、感官、营养品质以及关联酶活性的变化。结果表明, 不同处理对果实外观品质、感官品质、营养品质的保持能力表现为 $\text{LT} < \text{LT} + \text{LVEF} < \text{IT} < \text{IT} + \text{LVEF}$, 表明 LVEF 协同冰温处理下水蜜桃果实的保鲜品质最佳。第 15 天时, IT+LVEF 组与果实软化成熟和衰老相关的 PG、PME、 β -gal 和 LOX 酶活性最小, 而 SOD 酶和 POD 酶活性最大。此外, 各指标间的相关性分析表明, 低压静电场协同冰温条件下水蜜桃的保鲜品质、相关酶活性间的整体相关性最弱。综合来看, 采用低压静电场 (150 V) 协同冰温 ($-0.5 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) 处理, 能有效延缓水蜜桃贮藏期间的品质劣变, 延长其货架期, 具有较好的经济性与可行性。

关键词: 水蜜桃; 低压静电场; 冰温; 保鲜; 品质

文章编号: 1673-9078(2025)09-173-183

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0822

Analysis of the Preservation Effect of Low-voltage Electrostatic Field Combined with Ice Temperature on Peach

SUN Lingxiang, QUAN Xinyao, SHAO Qianshuo, HUANG Guili, MA Jiajia, LI Haocong, SUI Siyao, WANG Yuning*

(Jiangsu Taihu Area Agricultural Science Research Institute, Suzhou 215000, China)

Abstract: To explore the effect of low-voltage electrostatic field (LVEF) and ice temperature (IT) on the preservation quality of peach, the changes in appearance, sensory attributes, nutritional quality and associated enzyme activities of peach fruit were examined under four different storage conditions within 0~15 days: low temperature (LT) storage ($8 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), low temperature+low-voltage electrostatic field storage ($8 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 150 V), ice temperature storage ($-0.5 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), and ice temperature+low-voltage electrostatic field storage ($-0.5 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 150 V). The results showed that the abilities of different treatments to maintain fruit appearance quality, sensory quality and nutritional quality were in this order: $\text{LT} < \text{LT} + \text{LVEF} < \text{IT} < \text{IT} + \text{LVEF}$, indicating that LVEF combined with ice temperature treatment exhibited the greatest preservation on the quality of peach fruit. On the 15th day, the IT+LVEF group had the lowest activities of PG, PME, β -gal and LOX enzymes related to fruit softening, ripening and senescence, but the highest activities of SOD and POD enzymes. In addition, the

引文格式:

孙灵湘,全鑫瑶,邵千朔,等.低压静电场协同冰温对水蜜桃的保鲜效果分析[J].现代食品科技,2025,41(9):173-183.

SUN Lingxiang, QUAN Xinyao, SHAO Qianshuo, et al. Analysis of the preservation effect of low-voltage electrostatic field combined with ice temperature on peach [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(9): 173-183.

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-08-09; 接受日期: 2024-08-21

基金项目: 江苏现代农业产业技术体系项目 (JATS[2022]049); 苏州市科技计划项目 (SNG20211024)

作者简介: 孙灵湘 (1991-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: xiang0376@foxmail.com

通讯作者: 王毓宁 (1979-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜, E-mail: wyn705@163.com

correlation analysis of the various indicators showed that the overall correlation between the preservation quality and the activities of related enzymes in peach was the weakest under the conditions of low-voltage electrostatic field and ice temperature. In conclusion, the treatment of low-voltage electrostatic field (150 V) combined with ice temperature (-0.5 ± 0.5 °C) can effectively delay the quality deterioration of peach during storage and prolong its shelf life, which has good economic viability and feasibility.

Key words: peach; low voltage electrostatic field; ice temperature; preservation; quality

我国南方的软质型水蜜桃因肉甜汁多、香气浓郁、营养物质丰富而深受消费市场青睐,但是,由于水蜜桃收获期在高温夏季,且果实含水量高并对乙烯敏感,极易失水、腐烂及褐变,在常温下贮藏期只有3天左右。因此,对水蜜桃的采后生理变化和保鲜技术的研究具有重大现实意义和商业价值^[1-3]。桃果实的贮藏保鲜一直是国内外的重大难题,经过多年的研究,目前已经取得重大的进展,现阶段运用最多且取得不错经济价值的技术有冷藏、普通气调贮藏、快速降氧气调贮藏等^[4-6]。

冰温(Ice Temperature, IT)贮藏,作为继冷藏、气调后的第3代贮藏保鲜技术,是将果蔬贮藏在其冰点以上、0 °C以下温度范围内的保鲜技术,在该温度范围内果蔬组织汁液未发生冻结,细胞及膜结构未被冰晶破坏,细胞仍能保持活体状态,而生理活动被最大程度抑制优势明显^[7]。Fan等^[8]研究发现,相比常规冷藏(Low Temperature, LT)下的杏果实,冰温贮藏能够更好抑制杏的乙烯生成和呼吸速率,从而保持杏果实的保鲜品质,Cui等^[9]的研究也验证了这一结论。Zhao等^[10]发现,冰温下贮藏樱桃,能较好保持樱桃果实的细胞膜完整性以及感官和营养品质。低压静电场(Low Voltage Electrostatic Field, LVEF)作为新兴的物理保鲜方式,具有安全性高、设备要求低、成本低廉、一次投入长期使用等特点,其原理是电场影响食品内部电生物效应而抑制酶活及微生物的生长繁殖,因而延长食品的货架期^[11-13]。同时,最新研究表明,合适强度的电场处理可以显著降低果蔬的成核温度,从而实现食品更低温贮藏而不冻结^[14,15]。因此,低压静电场协同冰温技术,一方面,能够提升果蔬的贮藏效果,另一方面,增大果蔬冰温的控温范围,一定程度上解决了冰温技术在实际使用中温控范围小、技术难度大的缺陷。通过研究低压静电场与冰温二者协同下对水蜜桃保鲜的影响,既顺应了消费者对农产品新鲜度和食用品质日益增长的要求,也为提升水蜜桃这一高值水果产业的经济效益贡献力量,为低压静电场协同冰温实现水蜜桃的优质高效贮藏的商业化应用奠定

基础,以期实现“1+1>2”的水蜜桃保鲜效果。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

水蜜桃,品种为白凤水蜜桃,产地苏州市张家港凤凰镇,果园采摘新鲜的水蜜桃,选择八成熟、色泽大小相近、无机械损伤、无病虫害的果实,2 h内送至实验室进行实验处理。

PAL-1型数显糖度计,日本ATAGO公司;pH计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;CR-400色差仪,日本柯尼卡美能达公司;TMS-Pro型质构仪,美国FTC公司;PEN3电子鼻,德国Air-sensesen公司;TS-5000Z电子舌-味觉分析系统,日本INSENT公司;TU1900型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理

新鲜采收后的水蜜桃置于聚丙烯托盘,并在样品底部垫上吸水纸,经梯度降温后,分别移入以下4种冷库:(1)低温贮藏(LT):冷库温度(8 ± 0.5)°C;(2)低温+低压静电场贮藏(LT+LVEF):冷库温度(8 ± 0.5)°C,低压静电场电压强度设置150 V。(3)冰温贮藏(IT):冷库温度(-0.5 ± 0.5)°C;(4)冰温+低压静电场贮藏(IT+LVEF):冷库温度(-0.5 ± 0.5)°C,低压静电场电压强度设置150 V。库内湿度保持 $90\% \pm 5\%$,每3 d取样并测定有关指标。其中,低压静电场冷库实验设备,是将放电板固定于配备Denba实验用空间电场发生器的冷库中,通过手持式电测棒测量电场参数的实际值,电场电压强度150 V,频率50 Hz。

1.2.2 测定指标及方法

1.2.2.1 色差值的测定

用色差仪分别测定果面及果肉的亮度值(L^*)、红色度值(a^*)、黄色度值(b^*)。

1.2.2.2 可溶性固形物、pH值的测定

水蜜桃研磨过滤后,取滤液分别用数显糖度计

和 pH 计 25 ℃ 下测定可溶性固形物、pH 值。

1.2.2.3 硬度的测定

在果实赤道线上选取两点，用不锈钢刀削去果实表皮，采用 TMS-Pro 型质构仪进行果实穿刺硬度的测定，实验参数为探头直径 0.25 cm，穿刺速度 30 mm/min，穿透深度 10 mm。穿透特征曲线的最高峰即为果实硬度。每次测定用 5 个果实，取平均值。

1.2.2.4 维生素C、类胡萝卜素、总酚含量的测定

维生素 C 和总酚含量的测定参照黎星延等^[16]的方法，类胡萝卜素的测定参照朱运钦等^[17]的方法。

1.2.2.5 电子鼻嗅感特性

称取 5 g 水蜜桃果肉样品于 50 mL 密封瓶中，25 ℃ 下平衡 30 min，采用顶空抽样的方法进行气体的收集后，上机测试。电子鼻载气流速 400 mL/min，数据采集时间 60 s，传感器清洗时间 60 s，每组 6 个平行。电子鼻 10 个传感器所检测物质如表 1 所示。

表 1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Performance description of electronic nose sensor			
编号	传感器	性能描述	代表物质
1	W1C	芳香族化合物	Aromatic
2	W5S	氮氧化合物	Broad range
3	W3C	氨类、芳香族化合物	Aromatic
4	W6S	氢化物	Hydrogen
5	W5C	烯烃、芳香族化合物	Arom-aliph
6	W1S	甲烷等短链烷烃	Broad-methane
7	W1W	硫化物、吡嗪、萜烯类化合物	Sulphur-organic
8	W2S	醇类、醛类、酮类化合物	Broad-chlor
9	W2W	芳香族化合物、有机硫化物	Sulph-chlor
10	W3S	长链烷烃	Methane-aliph

1.2.2.6 电子舌分析

水蜜桃研磨过滤后，取滤液 40 mL 倒入 100 mL 烧杯中，再加入 60 mL 蒸馏水进行稀释混匀后待测。电子舌检测条件：用 KCl 与酒石酸溶液配成参比液。将传感器置于参比液中归零 30 s，随后开始进行味觉指标测定。测试时间为 30 s，测试完毕后用参比溶液清洗 3 s，再次进行测定，测试时间 30 s。每个样品重复 4 次，取后 3 次做为测试结果。

1.2.2.7 酶活性测定

多聚半乳糖醛酸酶 (Polygalacturonase, PG)、 β -半乳糖苷酶 (β -galactosidase, β -gal)、果胶甲酯酶 (Pectin Methylase, PME)、脂肪氧合酶 (Lipoxygenase, LOX)、超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 的酶活性测定，参考陈凯路^[1]的方法进行测定。

1.3 数据处理

所有指标测定均重复 3 次以上，实验结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。采用 IBM SPSS Statistics 27 和 EXCEL 2023 软件进行数据处理和统计分析，采用 Origin 2021 和 Excel 2023 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏处理下水蜜桃果实的外观变化



图 1 不同处理贮藏期间果实切面变化

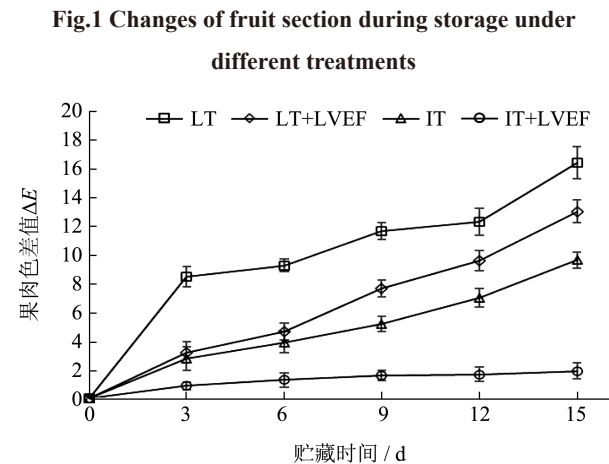


图 2 不同处理贮藏期间果肉颜色变化

Fig.2 Changes of pulp color during storage under different treatments

图 1 所示为水蜜桃果实的内部果肉切片情况，可以看出 LT 组、LT+LVEF 组、IT 组、IT+LVEF 组的水蜜桃分别在第 9 天、第 15 天、第 24 天和第 62 天发生果肉褐变和腐坏。图 2 为四种不同处理贮藏期间果肉 ΔE 值变化，LT 组、LT+LVEF 组、IT 组、IT+LVEF 组的果肉 ΔE 值逐渐增大，在第 15 天， ΔE 值分别达到 16.35、12.95、9.58 和 1.88，IT+LVEF 组的果肉色泽相比新鲜样品变化不显著 ($P < 0.05$)，说明冰温协同低压静电场作用对比常规低温、低压静电场协同常规低温以及冰温处理，对果实色泽品质的保持优势明显。许昌^[18]对比了 0、-1.5 和 -1.5 ℃ -LVEF 贮藏下油杏的变化，发现 -1.5 ℃ 协同 LVEF 处理油杏贮藏效果最好。

表 2 不同处理贮藏期间果实表皮颜色变化

Table 2 Color changes of fruit epidermis during storage under different treatments

处理	测定指标	贮藏时间/d					
		0	3	6	9	12	15
LT	L^*	71.39 ± 1.76^a	69.96 ± 1.46^a	69.70 ± 0.36^a	67.53 ± 1.39^{ab}	63.84 ± 0.76^b	65.53 ± 0.43^b
LT+LVEF		71.39 ± 1.76^a	69.73 ± 1.26^a	66.35 ± 1.27^b	66.49 ± 1.05^b	65.23 ± 1.06^b	66.27 ± 0.91^b
IT		71.39 ± 1.76^b	71.26 ± 1.17^b	68.51 ± 1.39^b	70.41 ± 0.64^b	76.34 ± 0.71^a	69.76 ± 0.80^b
IT+LVEF		71.39 ± 1.76^{ab}	70.31 ± 1.30^b	71.33 ± 0.52^{ab}	72.46 ± 0.85^{ab}	$71.64 \pm 0.56^a^b$	73.61 ± 0.69^a
LT	a^*	1.58 ± 0.74^d	2.23 ± 0.95^c	4.59 ± 0.38^b	7.41 ± 0.64^b	9.75 ± 0.59^a	11.12 ± 0.43^a
LT+LVEF		1.58 ± 0.74^c	2.27 ± 0.30^c	3.41 ± 0.71^c	4.98 ± 0.63^b	5.60 ± 0.89^a	7.59 ± 0.62^a
IT		1.58 ± 0.74^c	2.20 ± 0.56^c	4.26 ± 0.62^b	5.87 ± 0.70^{ab}	6.39 ± 0.55^a	6.18 ± 0.61^a
IT+LVEF		1.58 ± 0.74^a	1.76 ± 0.64^a	1.94 ± 0.79^a	3.24 ± 0.64^a	2.76 ± 0.59^a	3.61 ± 0.86^a
LT	b^*	22.95 ± 0.69^a	18.30 ± 0.38^b	17.72 ± 0.86^b	18.52 ± 0.81^b	19.64 ± 1.09^b	14.67 ± 0.46^a
LT+LVEF		22.95 ± 0.69^a	19.68 ± 0.56^b	18.64 ± 0.69^b	19.67 ± 0.39^b	17.72 ± 0.57^b	15.46 ± 0.66^c
IT		22.95 ± 0.69^a	20.46 ± 0.48^{ab}	18.62 ± 0.88^b	18.95 ± 0.91^b	17.68 ± 0.76^b	17.59 ± 0.62^b
IT+LVEF		22.95 ± 0.69^a	21.26 ± 0.93^a	21.56 ± 0.72^a	20.60 ± 0.81^a	18.49 ± 0.62^a	19.26 ± 0.68^a

注：同行不同字母表示数据差异显著（ $P \leq 0.05$ ）。

采后的水蜜桃，随着成熟度的增加，果实表皮颜色也发生改变，其中，靠近果实底部的表皮颜色变化最快最明显，表 2 为不同处理贮藏期间果实底部表皮颜色变化。果皮色泽能够直观的反映果实的成熟度和新鲜度，是贮藏保鲜效果的重要指标之一^[19,20]。在贮藏过程中，各处理组 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值分别呈不同程度变化趋势，变化速率为 $LT > LT+LVEF > IT > IT+LVEF$ ，其中， a^* 值下降最为明显，LT 组的 a^* 值在贮藏 15 d 后由 1.58 升高至 11.12，LT+LVEF 组和 IT 组分别升高至 7.59 和 6.18，而 IT+LVEF 组仅升高至 3.61，变化不显著（ $P < 0.05$ ），说明随贮藏时间延长，各处理组果皮色泽逐渐转红，IT+LVEF 组的果皮色泽变化最不显著。

2.2 不同贮藏处理下水蜜桃果实的感官品质变化

可溶性固形物、pH 值和硬度是反映果实滋味和口感等感官品质以及成熟衰老进程的重要指标^[21]。如图 3a 所示，0~15 d 的贮藏期内，LT 组和 LT+LVEF 组果实的可溶性固形物表现出先增大后减小的趋势，在 12 d 达到最大值 15.26% 和 14.27%；IT 组可溶性固形物含量从 0 d 的 11.22% 缓慢增大至 15 d 的 13.24%；IT+LVEF 组可溶性固形物在 15 d 为 11.98%，相比新鲜样品含量无显著变化。各组间不同的变化趋势是因为水蜜桃作为采后后熟型果实，由于淀粉酶将淀粉分解成糖，使可溶性固

形物上升^[22,23]，但另一方面，采后果实个体需要消耗果实积累的营养物质维持生命活动，引起可溶性固形物含量下降，因而各处理组下果实成熟进程不同导致可溶性固形物含量变化趋势表现不同^[24,25]。图 3b 中，LT 组、LT+LVEF 组、IT 组、IT+LVEF 组的 pH 值在第 15 天分别增大至 5.31、5.11、4.80、4.54，对比新鲜样，分别增大了 24%、19%、12%、6%。图 3c 中，LT 组、LT+LVEF 组、IT 组、IT+LVEF 组的硬度在第 15 天分别下降至 1.96、3.15、5.03、12.08，对比新鲜样，下降幅度分别为 87%、80%、68%、22%，表明 LT 组在 15 d 内果实显著变软，而 IT+LVEF 组处理有效延缓了果实的硬度下降。朱麟等^[5]以湖景水蜜桃为对象，发现果实随贮藏时间延长发生成熟软化，硬度逐渐减小，可溶性固形物和可滴定酸含量前期增大后期减小，且冰温相比常规低温可以抑制桃果实成熟，与图 3 结果一致。同时，图 3 表明，相比其他组，冰温协同低压静电场作用可以延缓果实成熟和衰老进程，较好地保持水蜜桃果实的感官品质。

电子鼻通过传感器快速识别和分辨气味类型，从而模拟人体嗅觉系统进行气味分析。电子鼻对不同贮藏条件下的水蜜桃果实气味的分析，结果如图 4 和图 5 所示。PEN3 电子鼻检测系统对样品挥发性成分敏感度高，因此不同样品的电子鼻传感器响应值存在较大差异，如图 4 所示，10 个传感器中对水蜜桃果实响应强度较大的为 W1W、W1S 和 W2W，其分别对硫化物、吡嗪、萜烯类化合物、甲

烷等短链烷烃化合物、芳香成分与有机硫化物响应灵敏。严娟等^[26]利用电子鼻技术研究桃果实中的挥发性风味物质,发现硫化物、吡嗪与萜烯类化合物(W1W)、甲烷类(W1S)、芳香成分与有机硫化物(W2W)传感器在果实总体香气评价中起主要作用,与本实验结果一致。图4a中水蜜桃样品在常规冷藏条件下,15 d后果实的挥发性风味成分发生明显变化,尤其是硫化物、吡嗪、萜烯类和甲烷等短链烷烃化合物的含量明显增加。图4d中随贮藏时间延长,各传感器响应值相比新鲜样变化较小,这是因为在常规冷藏条件下,随着贮藏时间的延长,水蜜桃果实局部腐坏产生硫化物、甲烷等短链烷烃类挥发性成分,导致W1W、W2W和W1S传感器响应值显著增加,而IT+LVEF处理能够延缓水蜜桃香气成分的劣变,使其15 d后挥发性风味品质变化较小。样品在电子鼻各传感器的响应值进行PCA分析,结果图5所示。PC1、PC2的贡献率分别为71.91%、16.50%,累计方差贡献率为88.41%,说明这2个主成分可以较好地反映样品的电子鼻气味特征信息。图5可以看出,A4、A5、B4、B5的分布均与CK距离较远,说明LT和LT+LVEF贮藏处理下12 d和15 d后,水蜜桃果实的气味特征与新鲜水蜜桃相比发生了较大变化,而D4和D5的分布与CK较为接近,说明LT+LVEF组下水蜜桃贮藏处理15 d后,挥发性风味成分相比新鲜水蜜桃变化较小。

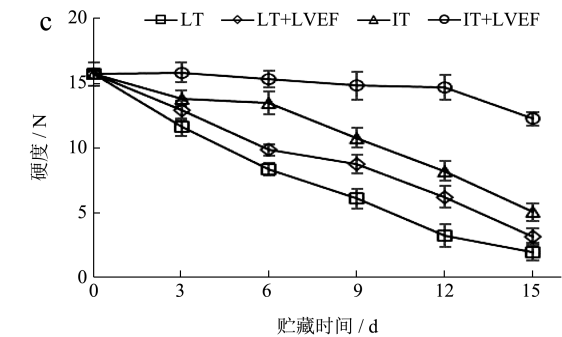
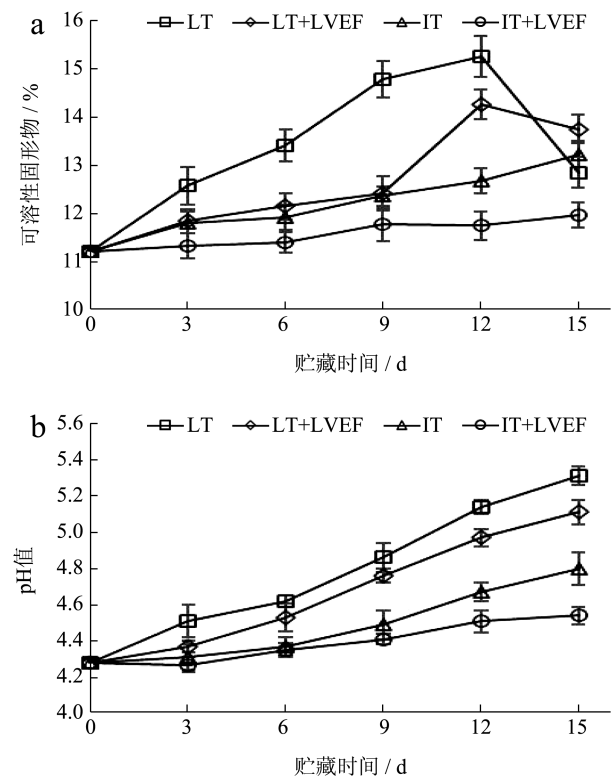


图 3 不同处理贮藏期间果实感官品质的变化
Fig.3 Changes of sensory quality of fruit during storage under different treatments

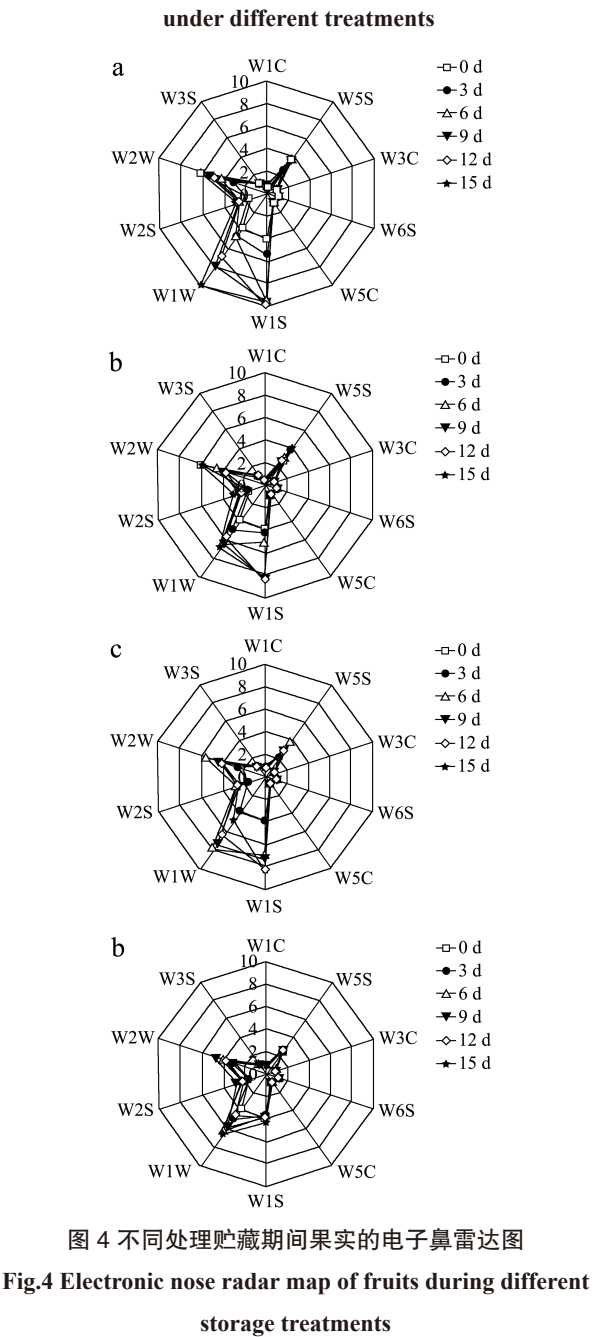


图 4 不同处理贮藏期间果实的电子鼻雷达图
Fig.4 Electronic nose radar map of fruits during different storage treatments
注: (a) LT; (b) LT+LVEF; (c) IT; (d) IT+LVEF。

图 6 同。

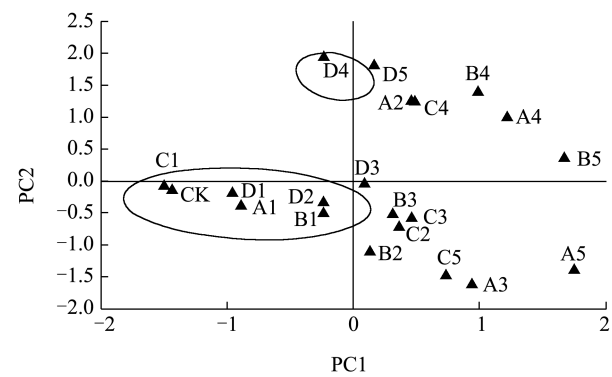


图 5 不同处理贮藏期间果实的电子鼻主成分分析图

Fig. 5 Electronic nose PCA of fruits during different storage treatments

注：A、B、C、D 分别表示 LT、LT+LVEF、IT、IT+LVEF 不同处理方式；1~5 分别表示 3、6、9、12、15 d 不同贮藏时间。图 7 同。

电子舌对不同贮藏条件下的水蜜桃果实滋味品质的分析，结果如图 6 和图 7 所示。图 6 可以看出，随着贮藏时间的增加，（图 6a 和 6b 对比 6c 和 6d 中水蜜桃的甜味响应值增长幅度更大。样品在电子舌各传感器的响应值进行 PCA 分析，结果图 7 所示。PC1、PC2、PC3 的贡献率分别为 55.64%、17.12%、13.58%，累计方差贡献率为 86.34%，说明这 3 个主成分可以较好地反映样品的电子舌滋味特征信息。图 7 表明，A4、A5、B5 主成分数据分布与 CK 距离最远，说明 LT 组、LT+LVEF 组下水蜜桃贮藏处理 15 d 后，滋味相比新鲜水蜜桃发生较大变化，D 组主成分数据分布与 CK 接近，说明 IT+LVEF 贮藏处理 15 d 后果实滋味与新鲜水蜜桃差异较小。

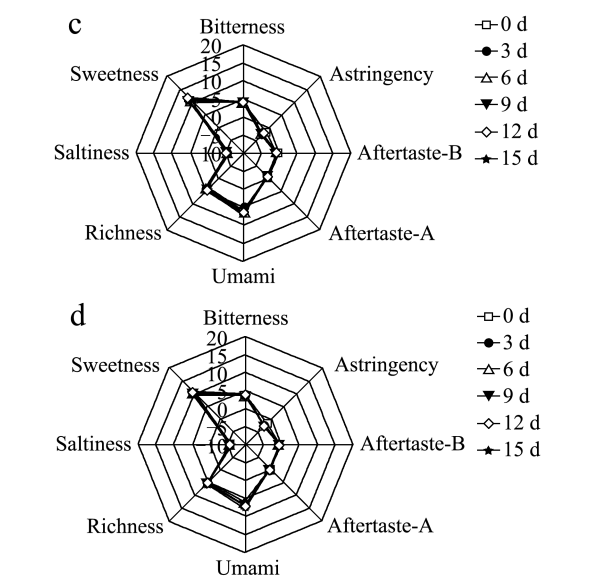
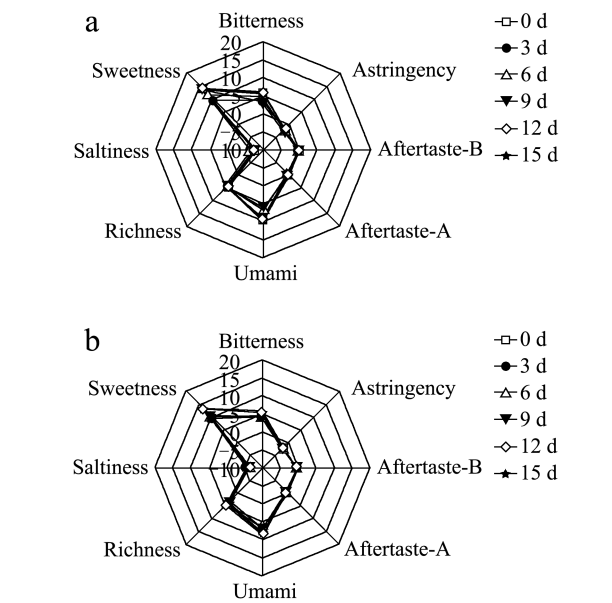


图 6 不同处理贮藏期间果实的电子舌雷达图

Fig.6 Electronic tongue radar map of fruit during storage under different treatments

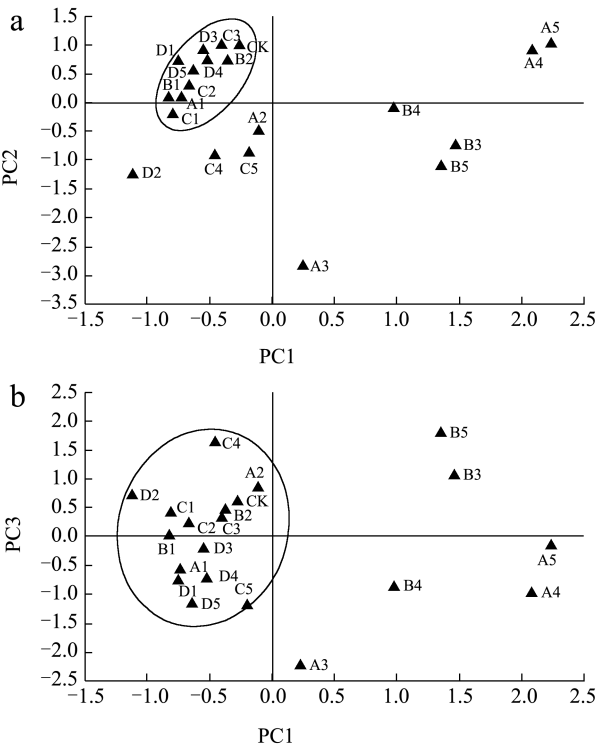


图 7 不同处理贮藏期间果实的电子舌主成分分析图

Fig.7 Electronic tongue PCA of fruits during different treatments

2.3 不同贮藏处理下水蜜桃果实的营养品质变化

果实在采后经内部一系列生化反应完成后熟而引起贮藏期内果实营养物质的变化。图 8 为不同处理贮藏期间水蜜桃果实的总酚、维生素 C、类胡萝卜素类营养品质的变化。图 8a 中，新鲜水蜜桃

总酚含量为 176 $\mu\text{g/g}$, 15 d 后 LT 组、LT+LVEF 组、IT 组总酚含量分别降低至 56、94、118 $\mu\text{g/g}$, 而 IT+LVEF 组的总酚含量表现为先降低后升高, 在第 15 天时总酚达到 216 $\mu\text{g/g}$ 。多酚类化合物参与果实采后的成熟衰老、逆境胁迫等生理反应, 各处理组在贮藏过程中, 总酚含量的降低是因为贮藏过程中的低温及 LVEF 诱导植物细胞的氧化应激反应, 使多酚物质被氧化, 其中, IT+LVEF 组总酚含量始终高于其他处理组, 说明 IT+LVEF 处理能够提高果实贮藏期间的抗氧化能力。图 8b 中, 新鲜水蜜桃维生素 C 含量为 9.2 $\text{mg}/100\text{g}$, 15 d 后 LT 组、LT+LVEF 组、IT 组、IT+LVEF 组的维生素 C 含量降低至 4.2、6.7、8.2 $\text{mg}/100\text{g}$, 其中, IT+LVEF 组 15 d 后的维生素 C 含量相比新鲜样降低不明显。水蜜桃采后贮藏期间维生素 C 的减小是因为果实采后通过不断消耗机体内营养成分维持基础代谢, 维生素 C 等营养物质逐渐被代谢消耗所导致。图 8c 中, 不同贮藏条件下水蜜桃果实中类胡萝卜素的含量并不表现出单一的增大或减小趋势, 其中 LT 组的类胡萝卜素含量先增大后减小, 并在第 9 天达到峰值 0.23 $\mu\text{g/g}$; IT 组的类胡萝卜素逐渐增大, 在第 15 天达到 0.21 $\mu\text{g/g}$; 而 LT+LVEF 组和 IT+LVEF 组的类胡萝卜素含量在贮藏过程中出现较大波动, 这可能类胡萝卜素作为植物体次生代谢产物中的一类重要物质, 其生物合成、积累以及裂解受多种基因家族代谢调控, 而低压静电场对其代谢机制产生了某种作用的结果^[27]。

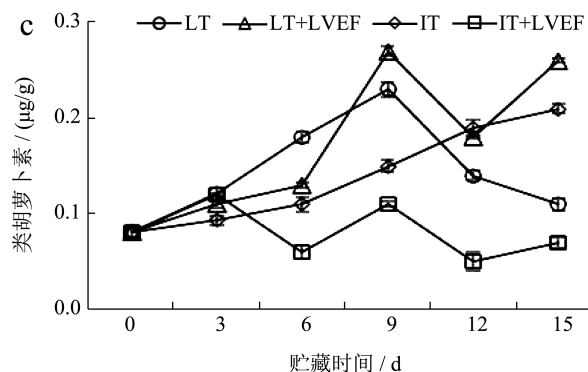
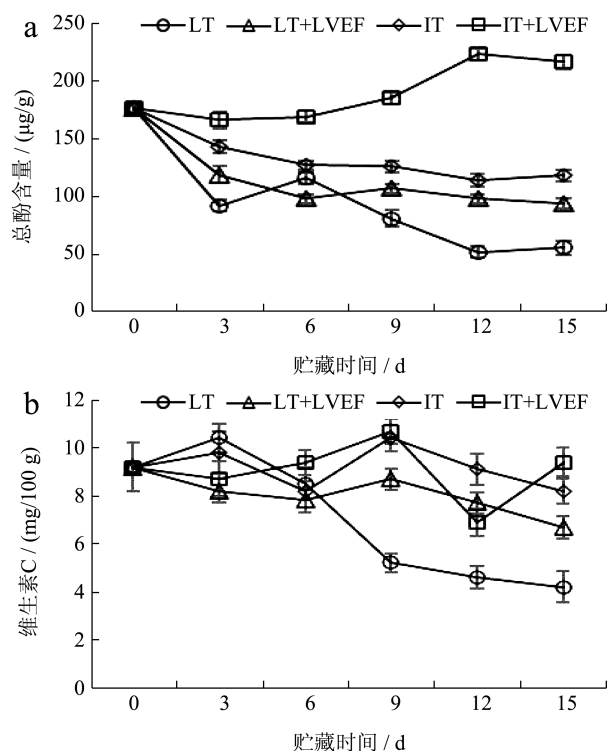


图 8 不同处理贮藏期间果实的营养品质变化

Fig.8 Changes of nutritional quality of fruits during storage under different treatments

2.4 不同贮藏处理下水蜜桃果实软化和衰老相关酶活性变化

水蜜桃在贮藏期间的果实软化是复杂变化的过程, 软化的主要原因是细胞壁结构及组分的变化, 果实细胞壁结构的主要表现为质壁分离、微纤维间的果胶和糖蛋白质溶解、微纤维排列松散、胞间层电子密度降低等现象, 与这一进程相关的关键酶包括 PG、 β -gal、PME 等^[28-34]。同时, 在果实成熟达到高峰进入衰老进程后, 果实自身产生活性氧不断积累, 造成膜脂过氧化, 加剧果实衰老, 从而引发果实内部的氧化防御体系清除活性氧, 植物内果实衰老及氧化防御体系相关的关键酶包括 LOX、SOD、POD 等^[35,36]。

图 9 为四种不同贮藏条件下, 水蜜桃果实软化和衰老进程相关的关键酶的活性变化。图 9a、9b 和 9c 中与果实软化相关的 PG、PME 和 β -gal 酶活性在贮藏过程中均呈逐渐增大趋势, 在 12 d 后, LT 组的果实 PG 酶活性现减小, 这可能是因为 PG 酶在调控果实成熟以后活性开始降低。贮藏第 15 天时, LT 组和 LT+LVEF 组水蜜桃果实的软化相关酶活性增大最显著 ($P<0.05$), PG、PME 和 β -gal 酶相比新鲜样品均增大 2 倍以上, 且 IT+LVEF 组的 PG、PME 和 β -gal 酶活性最小, 说明 LVEF 处理对于贮藏过程中果实软化相关酶活性具有一定的抑制作用, 且 LVEF 协同冰温对软化相关酶活性抑制作用最强。图 9d、9e、9f 是与果实衰老及氧化防御体系相关的关键酶 LOX、SOD、POD 在贮藏中的酶活性变化。如图 9d 所示, LOX 和 SOD 酶活在 LT 与 IT 组呈先增高后降低趋势, 在 LT+LVEF 与 IT+LVEF 组呈缓慢升高趋势, LT、LT+LVEF、IT 与 IT+LVEF 组的 LOX 酶活性分别在第 6 天、第 12 天、第 15 天、第 15 天时达到最大值 0.76、0.67、

0.41 和 0.33 $A_{234}/(g \cdot min)$), 贮藏过程中 LT+LVEF 组 LOX 酶活性最小。如图 9e 所示, SOD 酶活性在第 3 天时, LT 和 LT+LVEF 组分别达到最大值 6.20 和 5.76 $U/(g \cdot min)$, 对比第 0 天分别增大 51% 和 40%, 而 IT 与 IT+LVEF 组对比第 0 天分别仅增大 11% 和 4%, 但随着后期 LT、LT+LVEF、IT 组 SOD 酶活性的降低, 第 15 天时 IT+LVEF 组 SOD 酶活性最大。如图 9f 所示, POD 酶活性呈现先降低后增高的趋势, 第 15 天时, LT+LVEF、IT 与 IT+LVEF 组的 POD 酶活性均高于 LT 组, 分别为常规冷藏处理组的 1.15、1.40、1.46 倍, 第 15 天时 IT+LVEF 组 POD 酶活性最大。图 9e、9f 说明 LT+LVEF 处理贮藏水蜜桃过程中能够增强果实的 SOD 和 POD 酶

活性, 许昌^[18]也发现 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 LVEF 处理可有效提高油杏果实的 SOD 和 POD 活力。SOD 酶和 POD 酶作为植物细胞组织中较为重要的抗氧化酶类, 通过相互协同清除活性氧, 增强果实采后耐贮性。冰温及低压静电场导致水蜜桃果实内部代谢紊乱, 产生较多自由基类物质, 从未诱导 SOD 酶活性增大, 而 SOD 酶清除自由基后产生过氧化氢化合物, 进一步诱导 POD 酶活性增大, 通过酶协同催化延缓贮藏过程中活性氧引起的植物细胞老化。从图 9 来看, LVEF 协同 IT 能够抑制水蜜桃中果实软化相关的 PG、PME 和 β -gal 酶活性以及 LOX 酶活性, 并激活 SOD 和 POD 酶活性, 从而延缓水蜜桃的成熟和衰老进程。

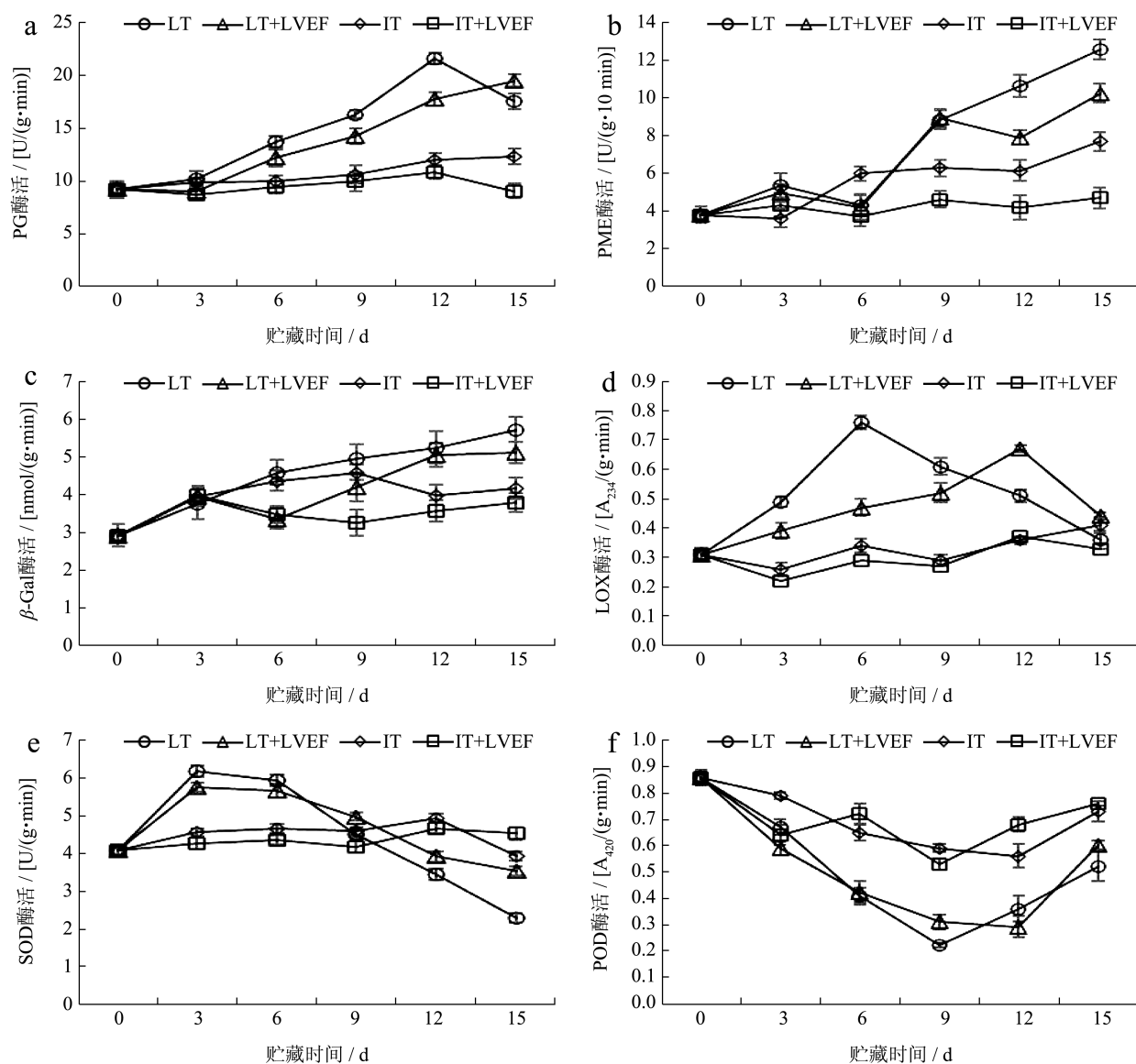


图 9 不同处理下水蜜桃的 PG、PME、 β -Gal、LOX、SOD、POD 酶活性

Fig.9 Enzyme activities of PG, PME, β -Gal, LOX, SOD and POD in peach under different treatments

2.5 贮藏过程中水蜜桃品质指标的相关性分析

贮藏过程中水蜜桃保鲜品质及酶活性的相关性热图如图 10 所示。在贮藏过程中, 水蜜桃的 ΔE 、硬度、可溶性固形物、pH 值、维生素 C、类胡萝卜素、PG、PME、 β -Gal、LOX、POD 之间在 $P \leq 0.01$ 水平下具有显著相关性, 而 SOD 酶与上述指标之间在 $P \leq 0.05$ 水平下相关性不显著。水蜜桃电子舌中的 Sweetness 传感器响应值与除 SOD、Astringency 外的其他外观、感官、营养品质以及关联酶活性均呈显著相关, 而电子舌中的 Bitterness、Astringency、Aftertaste-B、Aftertaste-A 的响应值与多数外观、感官、营养品质以及关联酶活性在 $P \leq 0.05$ 水平下相关性不显著。水蜜桃电子鼻的 W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S 传感器响应值与 ΔE 、硬度、可溶性固形物、pH 值、维生素 C、类胡萝卜素、PG、PME、 β -Gal、LOX、POD 的相关性较强, 与 SOD 酶在 $P \leq 0.05$ 水平下无显著相关性。

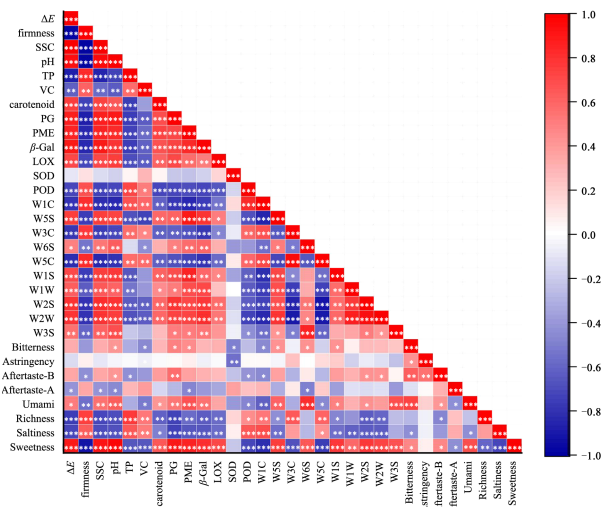


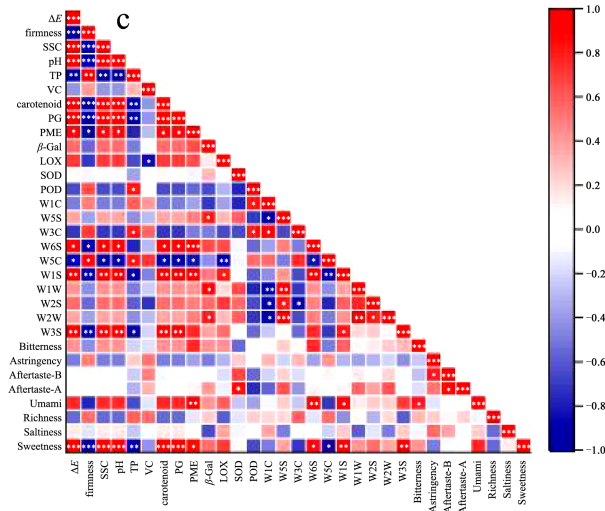
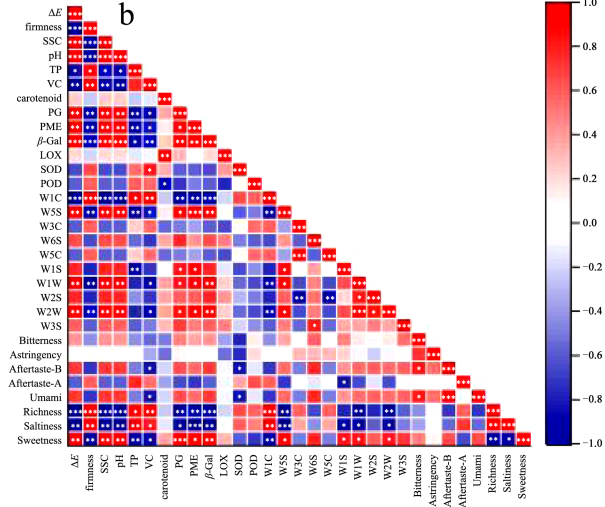
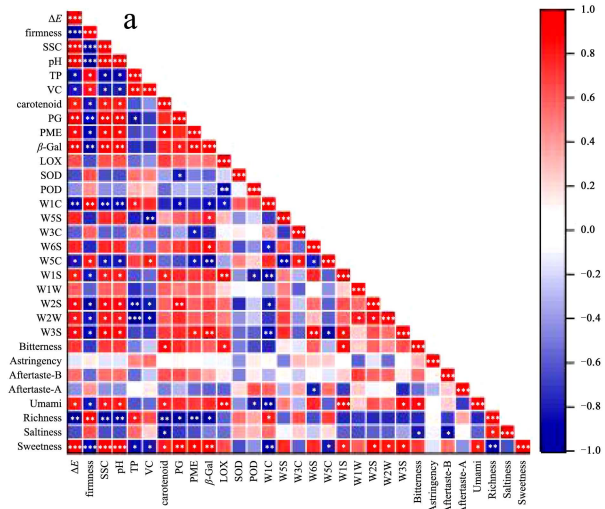
图 10 贮藏过程中水蜜桃保鲜品质及酶活性的相关性热图

Fig.10 Correlation heat map of fresh-keeping quality and enzyme activity of peach during storage

注: * $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$ 。

四种不同处理下水蜜桃的外观、感官、营养品质以及关联酶活性的相关性分析热图如图 11 所示。可以看出, 图 11c 和图 11d 中受测指标间的整体相关性较图 11a 和图 11b 更弱, 说明冰温贮藏抑制了果实保鲜品质和软化衰老相关酶活性的变化的同时, 使得部分指标间的相关性明显减弱, 其中, 低压静电场协同冰温条件下, 保鲜品质、相关酶活性间的整体相关性最弱。值得注意的是, 图 11b 和图 11d

中, 类胡萝卜素与其他外观、感官、营养品质间的相关性显著低于图 11a 和图 11c, 说明低压静电场处理明显削弱了水蜜桃果实中类胡萝卜素与其他指标间的相关性, 其具体作用机制还有待进一步研究。



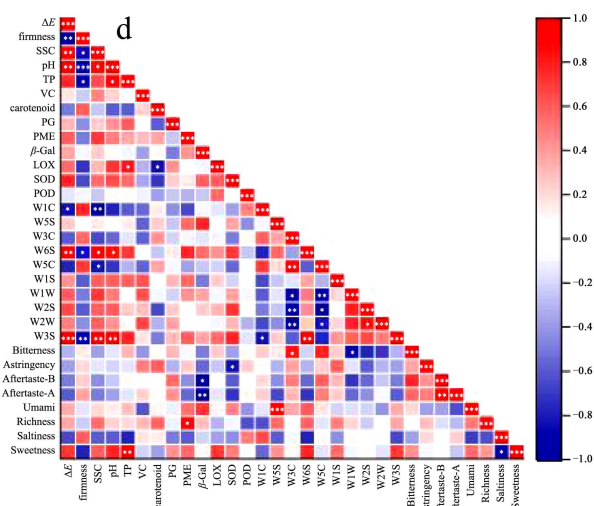


图 11 不同处理下水蜜桃保鲜品质及酶活性的相关性热图

Fig.11 Correlation heat map of fresh-keeping quality and enzyme activity of peach under different treatments

注: (a) LT; (b) LT+LVEF; (c) IT; (d) IT+LVEF)。

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$ 。

3 结论

对比分析低温贮藏 (8 ± 0.5 °C)、低温 + 低压静电场贮藏 (8 ± 0.5 °C, 150 V)、冰温贮藏 (-0.5 ± 0.5 °C) 和冰温 + 低压静电场贮藏 (-0.5 ± 0.5 °C, 150 V) 四种不同贮藏条件下, 水蜜桃果实在 0~15 d 的外观、感官、营养品质的变化, 结果表明低压静电场协同冰温处理下水蜜桃果实的保鲜品质最佳。第 15 天时, IT+LVEF 组的 PG、PME、 β -gal 和 LOX 酶活性最小, 而 SOD 酶和 POD 酶活性最大, 表明 LVEF 协同 IT 能够抑制水蜜桃中果实软化相关酶以及 LOX 酶活性, 从而延缓水蜜桃的软化成熟, 同时诱导果实的应激代谢反应, 激活 SOD 和 POD 酶活性, 通过酶协同作用延缓水蜜桃的衰老进程。低压静电场 (150 V) 协同冰温 (-0.5 ± 0.5 °C) 处理作为一种物理保鲜方法, 能有效抑制水蜜桃贮藏期间的品质劣变, 延长其货架期。下一步, 低压静电场协同冰温对水蜜桃代谢的具体作用机制有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] 陈凯路.不同温度对桃果实软化相关酶的影响[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [2] 钱铭.桃PG(Polygalacturonase)家族成员在果实成熟软化过程中的表达特性及质地形成中的功能研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2017.
- [3] 梁庆沙,冷平,贺岩龙,等.冰温贮藏后“大久保”桃不同出库方式对果实细胞壁组分及相关酶活性的影响[J].中国

农业大学学报,2010,15(1):5.

- [4] LI J, LI F, QIAN M, et al. Characteristics and regulatory pathway of the Prupe SEP1 SEPALLATA gene during ripening and softening in peach fruits [J]. Plant Science, 2017, 257: 63-73.
- [5] 朱麟,凌建刚,尚海涛,等.冰温对湖景蜜露桃贮藏品质影响[J].食品与机械,2016(12):115-118,123.
- [6] 奚宇.绿原酸对油桃和苹果果实采后成熟衰老的调控作用[D].北京:中国农业大学,2017.
- [7] 布丽根·加冷别克,任建业,胡梓睿,等.水杨酸处理结合冰温贮藏对吊干杏采后品质的影响[J].食品工业科技, 2022,43(13):9.
- [8] FAN X, XI Y, ZHAO H, et al. Improving fresh apricot (*Prunus armeniaca* L.) quality and antioxidant capacity by storage at near freezing temperature [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 231: 1-10.
- [9] CUI K, ZHAO H, SUN L, et al. Impact of near freezing temperature storage on postharvest quality and antioxidant capacity of two apricot (*Prunus armeniaca* L.) cultivars [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019,43 (7): e12857.
- [10] ZHAO H, LIU B, ZHANG W, et al. Enhancement of quality and antioxidant metabolism of sweet cherry fruit by near-freezing temperature storage [J]. Postharvest Biology & Technology, 2019, 147: 113-122.
- [11] ATUNGULU G, ATUNGULU E, NISHIYAMA Y. Electrode configuration and treatment timing effects of electric fields on fruit putrefaction and molding post harvest [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 70(4): 506-511.
- [12] 杨亚丽,刘慧燕,杨文丽,等.保鲜剂结合低压静电场处理对红梅杏贮藏品质的影响及其相关性分析[J].食品与机械,2020,36(4):7.
- [13] 徐纯.低压静电场结合低温对草莓保鲜机理研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [14] BAJGAI T R, HASHINAGA F, ISOBE S, et al. Application of high electric field (HEF) on the shelf-life extension of emblic fruit (*Phyllanthus emblica* L.) [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(3): 308-313.
- [15] 李海波,谢超,梁瑞萍,等.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[J].食品工业科技,2020,41(7):265-270.
- [16] 黎星延,黄丽金,刘汉美,等.不同分子量壳聚糖涂膜对采后西番莲果实贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2023, 44(22):319-326.
- [17] 朱运钦,曾文芳,牛良,等.‘中油桃9号’及其黄肉突变体花和叶片中类胡萝卜素代谢及相关基因的时空表达[J].园艺学报,2018,45(10):1869-1880.
- [18] 许昌.新疆油杏实生变异种生长发育特征及其果实低压静电场近冰温保鲜研究[D].银川:宁夏大学,2022.

- [19] GAO J, ZHANG Y, LI Z, et al. Role of ethylene response factors (ERFs) in fruit ripening [J]. Food Quality and Safety, 2020, 4(1): 15-20.
- [20] LI S, CHEN K S, GRIERSON D. Molecular and hormonal mechanisms regulating fleshy fruit ripening [J]. Cells, 2021, 10: 1136.
- [21] VASILAKAKIS M, MANGANARIS G A, MANGANARIS A, et al. Investigation of cell wall physicochemical properties as indicators of peach quality, during fruit ripening after cold storage [J]. Food Science Technology International, 2008, 14: 385-391.
- [22] SHI Y, LI B J, SU G, et al. Transcriptional regulation of fleshy fruit texture [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2022, 64(9): 1649-1672.
- [23] CONTADOR L, SHINYA P, INFANTE R. Texture phenotyping in fresh fleshy fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 193: 40-46.
- [24] LI X, XU C J, KORBAN S S, et al. Regulatory mechanisms of textural changes in ripening fruits [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2010, 29: 222-243.
- [25] SUO J, LI H, BAN Q, et al. Characteristics of chilling injury-induced lignification in kiwifruit with different sensitivities to low temperatures [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 135: 8-18.
- [26] 严娟,蔡志翔,张明昊,等.利用电子鼻评价桃果实香气[J].植物遗传资源学报,2021,22(1):274-282.
- [27] GAN Z, SHAN N, FEI L, et al. Isolation of the 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase (NCED) gene from kiwifruit and its effects on postharvest softening and ripening [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 261: 109020.
- [28] AIRIANAH O B, VREEBURG R A M, FRY S C. Pectic polysaccharides are attacked by hydroxyl radicals in ripening fruit: evidence from a fluorescent fingerprinting method [J]. Annals of Botany, 2016(3): 441-455.
- [29] HENG D, YAO C, ZIYU L, et al. SIERF.F12 modulates the transition to ripening in tomato fruit by recruiting the co-repressor topless and histone deacetylases to repress key ripening genes [J]. The Plant Cell, 2022, 34: 1250-1272.
- [30] FULLERTON C G. Kiwifruit softening: a cell wall study. PhD thesis [D]. New Zealand: University of Auckland, New Zealand, 2015.
- [31] ELFALLEH W, GUO L, HE S, et al. Characteristics of cell wall structure of green beans during controlled freezing point storage [J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(5-8): 1756-1772.
- [32] 阚娟,刘俊,金昌海.桃果实成熟软化与细胞壁降解相关糖苷酶及乙烯生物合成的关系[J].中国农业科学,2012, 45(14):2931-2938.
- [33] CHANG E H, LEE J S, KIM J G. Cell wall degrading enzymes activity is altered by high carbon dioxide treatment in postharvest 'Mihong' peach fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 225: 399-407.
- [34] CRISTINA C, DELAFUENTE J I, PIETRO I, et al. Pectin esterase gene family in strawberry fruit: study of FaPE1, a ripening-specific isoform [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(398): 909.
- [35] 杨宏伟,陈小燕,张影,等.油桃采后衰老与病害发生中品质与活性氧代谢的相关性分析[J].食品科学,2011, 32(20):5.
- [36] 李亚玲,崔宽波,石玲,等.近冰温贮藏对杏果实冷害及活性氧代谢的影响[J].食品科学,2020,41(7):177-183.