

低压静电场对杨梅采后贮藏期间感官和营养品质的影响

黄桂丽¹, 李江阔², 全鑫瑶¹, 王毓宁^{1,*}, 孙灵湘¹, 林琳³, 张洪良⁴, 李超飞⁵

(1. 苏州市农业科学院, 江苏 苏州 215105; 2. 天津市农业科学院农产品保鲜与加工技术研究所(国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)), 农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室, 天津市农产品采后生理与贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384; 3. 江苏大学, 江苏 镇江 212013; 4. 苏州食行生鲜电子商务有限公司, 江苏 苏州 215000; 5. 江苏省精创电气股份有限公司, 江苏 徐州 221116)

摘要:为降低采后杨梅腐烂率, 提高果实商品性和市场竞争力, 以‘荸荠’杨梅为试材, 研究低压静电场(Low voltage electrostatic field, LVEF)处理对采后杨梅贮藏品质的影响。采用 LVEF 处理, 分析在冰温(-0.5 ± 0.5)℃和相对湿度 85%条件下贮藏期间杨梅外观色泽(a^* 、 b^* 、 L^* 值), 可溶性固形物(TSS)、可滴定酸(TA)、维生素 C(VC)、花色苷、可溶性糖、还原糖和蔗糖含量等品质指标, 以及杨梅整体感官风味的变化。结果表明:LVEF 处理能明显延缓杨梅 a^* 、 b^* 、 L^* 值的降低, 维持杨梅的红色、黄色和明亮度, 抑制 TSS、VC、花色苷、可溶性糖、蔗糖的降解, 减缓 TA 含量的降低和还原糖含量的升高; 贮藏期间杨梅整体风味发生了变化, 但 LVEF 处理能明显抑制烃类化合物、硫化物等导致果品劣变气味的产生; 对贮藏期间杨梅品质指标的主成分分析发现, 可溶性糖含量变化对贮藏过程中杨梅品质变化的影响最大, 蔗糖和还原糖次之, 且可溶性糖与贮藏过程中色泽及 TA、VC 和花色苷含量呈显著正相关。综上, LVEF 处理可以延缓采后杨梅的感官劣变, 维持杨梅贮藏期间的营养品质, 有效延长杨梅的保鲜期。

关键词:杨梅; 低压静电场; 感官品质; 营养品质

Effect of Low Voltage Electrostatic Field on Sensory and Nutritional Quality of Bayberry during Postharvest Storage

HUANG Guili¹, LI Jiangkuo², QUAN Xinyao¹, WANG Yuning^{1,*}, SUN Lingxiang¹, LIN Lin³, ZHANG Hongliang⁴, LI Chaofei⁵

(1. Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 215105, China; 2. Institute of Agricultural Products Preservation and Processing Technology, Tianjin Academy of Agricultural Sciences (National Agricultural Products Preservation Engineering Technology Research Center (Tianjin)), Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage of Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage of Agricultural Products, Tianjin 300384, China; 3. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 4. Suzhou Shihang Fresh E-commerce Co., Ltd., Suzhou 215000, China; 5. Jiangsu Jingchuang Electronics Co., Ltd, Xuzhou 221116, China)

基金项目:苏州市科技计划项目(SNG2022069, SNG2021024); 姑苏乡土人才项目(23045)

作者简介:黄桂丽(1986—), 女, 汉族, 博士, 助理研究员, 研究方向为果蔬保鲜与加工。

***通信作者:**王毓宁, 硕士, 研究员, 研究方向为果蔬保鲜与加工。

Abstract: In order to reduce the decay rate of bayberry after harvest, and improve the commodity and market competitiveness of the fruit, this study investigated the effect of low voltage electrostatic field (LVEF) treatment on the postharvest quality of ‘Biqi’ bayberry, analyzed the appearance color (a^* , b^* , and L^* value), quality indicators such as total soluble solids (TSS), titratable acid (TA), vitamin C (VC), anthocyanin, soluble sugar, reducing sugar and sucrose contents, and the overall sensory flavor change of bayberry during storage under ice temperature (-0.5 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$, 85% relative humidity condition. The results showed that LVEF treatment could significantly delay the decrease of a^* , b^* , and L^* values of bayberry, which maintained its red, yellow, and brightness, inhibited the degradation of TSS, VC, anthocyanin, soluble sugars, and sucrose; slowed the decrease of TA content, and blocked the increase of reducing sugar content. During storage, the overall flavor of bayberry also changed, and LVEF treatment could significantly inhibit the generation of deteriorated odors such as hydrocarbon compounds and sulfides in fruit products. The principal component analysis of the quality indices of bayberry during storage suggested that the change in soluble sugar content had the greatest impact on the quality changes of bayberry during storage, followed by sucrose and reducing sugar. Moreover, there was a significant positive correlation between soluble sugar and color, TA, VC and anthocyanin content during storage. In summary, LVEF treatment can delay the sensory deterioration of postharvest bayberry, maintain its nutritional quality during storage, and effectively extend shelf life.

Key words: bayberry; low voltage electrostatic field; sensory quality; nutritional quality

中图分类号:S667.6

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2024.11.003

杨梅为源于我国南方的传统特色水果,具有色泽艳丽、风味浓郁、口感酸甜、营养丰富等特点^[1-2],其富含维生素、花青素和酚酸等生物活性物质^[3-4],及锌、铁等微量元素,具有较高的食用、药用价值和多种健康功效,如抗氧化、抗炎症、预防心血管疾病等^[5-6]。杨梅成熟于闷热多雨的初夏季节^[7],成熟时间集中,采收期短,采后易霉变,这不仅会造成巨大的经济损失,而且还会引起杨梅鲜品的食品安全问题。品质劣变快、商品性差、贮藏保鲜难等问题是制约杨梅鲜食产业健康可持续发展的瓶颈。

随着社会的进步,以及人们消费理念的不断升级,人们对绿色优质果品的需求愈发强烈。除了采取产前栽培管理来提升杨梅的品质外,产后的保鲜技术也是提升杨梅品质、延长杨梅销售半径的关键。目前,杨梅采后保鲜方法主要包括化学保鲜(如 1-甲基环丙烯(1-MCP)^[8]、茉莉酸甲酯(MeJA)^[9-10]、二氧化氯(ClO_2)处理)、生物保鲜(如壳聚糖涂膜^[11])和物理保鲜(如气调保鲜^[12-13]、低温贮藏、电场处理)。生物、化学保鲜剂容易有残留,会造成安全隐患而影响消费安全。因此亟需生态安全的物理保鲜手段来提升采后杨梅的贮运质量,延缓其品质劣变。

静电场保鲜是一种非加热、低能耗的新兴保鲜处理技术。根据输出电压分为高压静电场和低压静电场。相比于高压静电场,低压静电场(LVEF)的输出电

压较低,理论上相对安全。低压静电场保鲜最初主要用于水产品 and 肉制品的保鲜与解冻。有学者研究发现,低压静电场对果蔬,如灵武大枣^[14]、白玉菇^[15]、贵妃红桃^[16]、葡萄^[17]、无花果^[17]、草莓^[18]、水蜜桃^[19]具有很好的保鲜效果。李海波等^[20]研究表明,低压静电场协同低温能够维持‘舟山晚稻’杨梅可溶性糖和 VC 含量、硬度等品质指标。目前冰温条件下低压静电场对余姚‘荸荠’杨梅的感官和营养品质的影响不明晰。

本研究通过分析冰温条件下低压静电场对杨梅外观品质及可溶性固形物、VC、花色苷、可溶性糖、蔗糖、还原性糖含量等关键品质指标及感官风味的影响,并解析表观变化与营养品质指标的相关性,以期明确低压静电场对杨梅的保鲜效果,为改善杨梅的贮藏品质并增强其市场竞争力提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

‘荸荠’杨梅(约 9 成熟),于 2022 年 6 月采自浙江省余姚市丈亭镇。

三氯乙酸、聚乙烯吡咯烷酮、草酸、偏磷酸、乙酸、硫酸、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-Na_2)、钼酸铵,上海国药集团化学试剂有限公司;蔗糖、葡萄糖、蒽酮,上海沪试实验室器材股份有限公司;还原糖含量检测试

剂盒、蔗糖含量检测试剂盒,北京索莱宝科技有限公司。以上试剂均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

PEN3 电子鼻,德国 Airsense 公司;TMS-PRO 质构仪,美国 FTC 公司;TU-1900 双光束紫外可见光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;PAL-1 型数显糖度计,日本 Atago 公司;FiveGo F2 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;DNBA+低压静电场发射器,德恩伯亚(中国)有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理

杨梅采后于基地预冷 2 h,挑选大小均一、颜色一致、无机械损伤、无病虫害的果实。采用 54 颗装杨梅包装盒(208 mm×310 mm)包装。分成 2 组,将其置于 $(-0.5\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 的冰温库中贮藏,对照(CK)组不加低压静电场,LVEF 处理组整个贮藏过程均施加低压静电场(输出电压 150 V,50 Hz)。

1.2.2 测定指标与方法

1.2.2.1 色度

参照 Chen 等^[21]及 Jiang 等^[22]的方法,选择杨梅赤道面 2 个点,使用色差仪测定 a^* 、 b^* 、 L^* 值,每组测试 6 个杨梅, a^* 代表红绿数值, b^* 代表黄蓝数值, L^* 代表亮度数值。

1.2.2.2 可溶性固形物(TSS)、可滴定酸(TA)和 VC 含量

可溶性固形物含量:使用手持糖度计测定^[22],每组取 6 个杨梅,对杨梅果肉挤出的汁液进行测定,结果取平均值,单位为%。

可滴定酸含量:采用酸碱滴定法测定^[23],单位为%。

VC 含量:采用钼酸铵比色法^[24]测定。取 0.5 g 样品,加入 4 mL 草酸-EDTA- Na_2 提取液,冰浴,涡旋,4 $^{\circ}\text{C}$,10 000 r/min 离心 20 min,取上清 1 mL,加入草酸-EDTA- Na_2 3 mL、偏磷酸-乙酸 0.5 mL、5%硫酸 1 mL、5%钼酸铵 2 mL,加完试剂摇匀,置 30 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中保温 15 min,将溶液混匀,测定 $OD_{760\text{ nm}}$,以 VC 当量计算。

1.2.2.3 花色苷含量

采用 pH 示差法^[25]测定。称取杨梅样品 0.5 g,加入 95%的甲醇(0.1 mol/L HCl)6 mL,振荡提取 4 h,4 $^{\circ}\text{C}$ 12 000 r/min 离心 15 min,取上清液,分别用 0.4 mol/L 乙酸钠(pH 4.5)和 0.025 mol/L KCl 缓冲液(pH 1.0)稀释 10 倍,室温放置 15 min,测定溶液在 520 nm 和 700 nm 处的吸光度,按照以下公式计算花色苷含量。

$$\text{花色苷含量}(\text{g/kg}) = \frac{A \times M \times f}{\varepsilon \times l}$$

式中: A 为 pH 1.0 时($A_{520\text{ nm}} - A_{700\text{ nm}}$)和 pH 4.5 时($A_{520\text{ nm}} - A_{700\text{ nm}}$)之差; M 为氰化-3-葡萄糖苷的摩尔质量; f 为稀释因子; ε 为消光系数(26 900 L/(mol·cm))。

1.2.2.4 可溶性糖、还原糖和蔗糖含量

可溶性糖含量:采用蒽酮比色法^[26]测定,用葡萄糖绘制标曲计算;还原糖和蔗糖含量:采用北京索莱宝科技有限公司的还原糖检测试剂盒和蔗糖检测试剂盒测定。

1.2.2.5 整体风味

杨梅挥发性成分由 PEN3 电子鼻测定^[27-28]。取 10 g 杨梅置于 25 mL 的烧杯中,保鲜膜封口,30 $^{\circ}\text{C}$ 平衡 30 min 后,使用电子鼻测定。仪器测试条件:传感器清洗时间 60 s,自动调零时间 10 s,样品准备时间 5 s,测试时间 60 s,进样流量 400 mL/min,每组测试 6 个平行,每个平行选取稳定性较好的 52、53、54 s 的数据进行分析。电子鼻传感器及对应敏感物质信息如表 1 所示^[29]。

表 1 电子鼻传感器及其对气味化合物的响应

Table 1 Electronic nose sensors and their response to odorant compounds

传感器名称	性能描述
W1C	对芳香性成分敏感
W5S	对氮氧化物反应灵敏,尤其是对阴性氮氧化物感应更加灵敏
W3C	对氨类、芳香型化合物敏感,主要对氨水灵敏
W6S	主要对氢气敏感
W5C	对烷烃、芳香型化合物敏感,极性很小的化合物
W1S	主要对烃类敏感,灵敏度高
W1W	主要对硫化物敏感,对很多的萜烯类和有机硫化物也都很敏感
W2S	对醇类灵敏,对羰基也都有响应
W2W	对芳香成分和有机硫化物敏感
W3S	对烷烃敏感,对甲烷非常敏感

1.2.3 数据处理

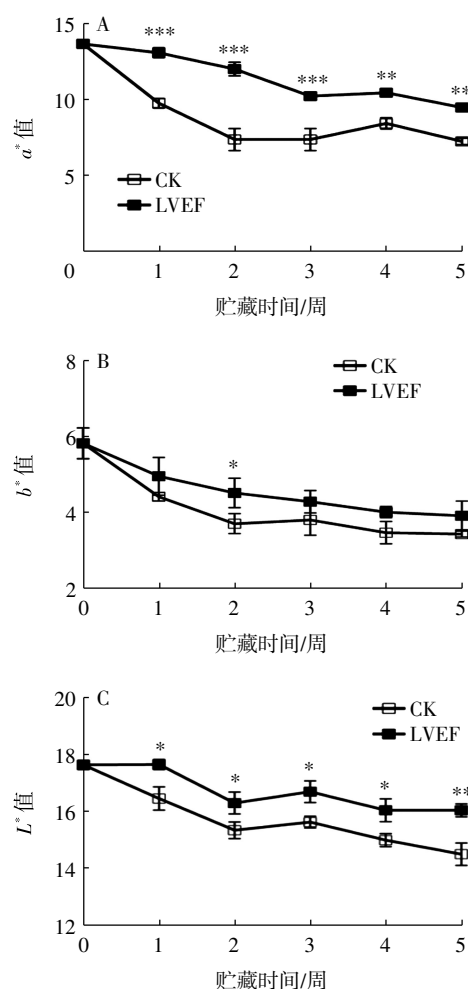
采用 GraphPad Prism 6 和 Origin 2021 软件作图及单因素方差分析(One-way analysis of variance, ANOVA),所有试验进行 3 次重复,数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示。

2 结果与分析

2.1 LVEF 处理对杨梅色泽的影响

果实的色泽是其成熟度、外观品质和新鲜度的重要标志,在一定程度上反映了果实的商品价值。色泽鲜艳的水果通常具有更好的营养价值和品质。 a^* 值的

负和正代表颜色的绿和红, b^* 值的负和正代表颜色的蓝和黄, L^* 值代表明亮度^[30]。由图 1A 可知,两组杨梅的 a^* 值在贮藏期间均不断下降,LVEF 组的 a^* 值整体高于 CK 组。贮藏前期,CK 组的 a^* 值迅速下降,至贮藏第 2 周时,降至 7.38 ± 0.60 ,比 LVEF 组的 12.04 ± 0.37 低 38.70%,在随后贮藏中,CK 组 a^* 值趋于平缓。LVEF 组的 a^* 值在整个贮藏期间下降相对缓慢。统计学分析发现,整个贮藏期间,LVEF 组的 a^* 值显著高于 CK ($P < 0.001, P < 0.01$)。由图 1B 可知,在整个贮藏期间,两组杨梅的 b^* 值均呈下降趋势,CK 组下降更快,LVEF 组的 b^* 值均高于 CK 组,贮藏第 2 周时,二者间 b^* 值差异显著 ($P < 0.05$)。在杨梅的整个贮藏期间 L^* 值逐渐降低,CK 组下降较快,贮藏前 2 周迅速下降,之后缓慢下降;LVEF 组的 L^* 值在贮藏第 1 周变化较小,第 2 周时迅速下降,之后曲折缓慢下降 (图 1C)。统计学分析发现,在整个贮藏期间,



注:同一时间 CK 和 LVEF 组相比,*, $P < 0.05$, **, $P < 0.01$, ***, $P < 0.001$ 。图 2~图 6 同。

图 1 LVEF 处理对杨梅色度值 a^* (A)、 b^* (B)和 L^* (C)的影响
Fig.1 Effect of LVEF treatment on a^* (A), b^* (B) and L^* (C) of bayberry

LVEF 组的 L^* 值显著高于 CK 组 ($P < 0.05, P < 0.01$)。以上结果表明,LVEF 组和 CK 组的杨梅在贮藏期内色泽均发生了变化,红色、黄色和明亮度明显降低,但 LVEF 处理的杨梅色泽变化相对缓慢,表明其能延缓杨梅的色泽变化进程。

2.2 LVEF 处理对杨梅 TSS、TA、VC 和花色苷含量的影响

可溶性固形物、酸度、VC 是果实的关键呈味物质。TSS 是一系列可溶性的物质,其中包括糖、酸、维生素。TSS 是呼吸作用的主要底物,通常用来反映果实采后品质和成熟度。从图 2 可以看出,在贮藏第 1 周,LVEF 组和 CK 组的杨梅 TSS 含量逐渐升高,随后整体呈下降趋势。整个贮藏期间,LVEF 组的 TSS 含量整体高于 CK 组,贮藏第 5 周时,LVEF 组的杨梅 TSS 含量为 $11.37\% \pm 0.26\%$,是 CK 组杨梅含量 ($9.7\% \pm 0.14\%$) 的 1.17 倍。统计学分析表明,在贮藏的第 1、4 和第 5 周,LVEF 组的杨梅 TSS 含量显著高于对照组 ($P < 0.05, P < 0.001$)。

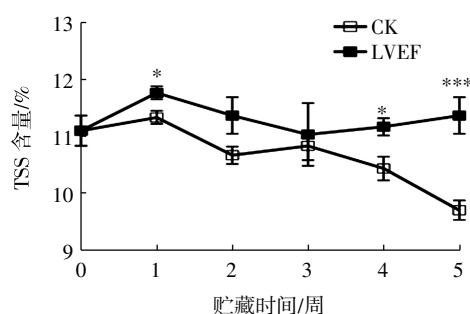


图 2 LVEF 处理对杨梅 TSS 含量的影响
Fig.2 Effect of LVEF treatment on TSS content in bayberry

从图 3 可以看出,在整个贮藏期间,LVEF 组和 CK 组杨梅的可滴定酸含量呈下降的趋势。贮藏前 2 周,CK 组杨梅可滴定酸含量快速下降,第 3 周缓慢下降,第 4 和第 5 周,快速下降;LVEF 组的杨梅可滴定酸含量均匀缓慢下降;在整个贮藏期间,LVEF 组杨梅的可滴定酸含量明显高于 CK 组,且均具有统计学意义 ($P < 0.05, P < 0.01, P < 0.001$)。

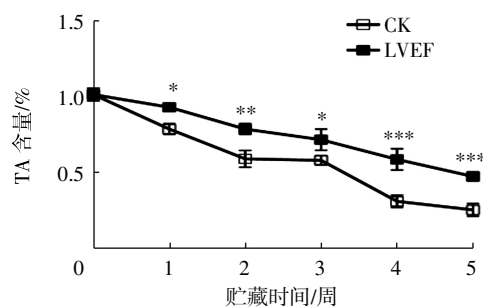


图 3 LVEF 处理对杨梅 TA 含量的影响
Fig.3 Effect of LVEF treatment on TA content in bayberry

从图4中可以看出,在整个贮藏期间,LVEF组和CK组杨梅的VC含量均呈下降趋势,CK组杨梅的VC含量下降更快,贮藏同一时间内均低于LVEF组,且在贮藏的第1、2、3和第5周时二者差异显著($P<0.05$, $P<0.01$)。

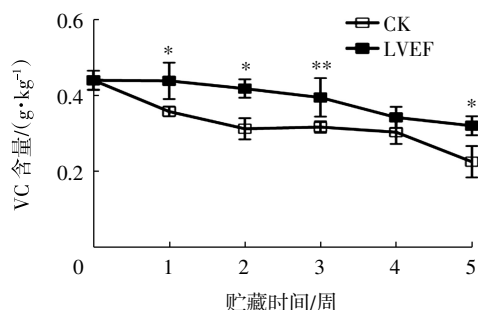


图4 LVEF处理对杨梅VC含量的影响

Fig.4 Effect of LVEF treatment on VC content in bayberry

从图5中可以看出,杨梅花色苷含量随着贮藏时间的延长而降低。CK组在前3周花色苷含量快速下降,第4周趋于平缓,第5周又急剧下降;LVEF组杨梅花色苷含量贮藏期间缓慢下降。在整个贮藏期间,CK组杨梅花色苷含量下降较快,贮藏第5周时,LVEF组的杨梅花色苷含量为(0.560 ± 0.018)g/kg,比CK组的(0.424 ± 0.009)g/kg高32.06%。统计分析结果表明,在整个贮藏期间,LVEF组杨梅花色苷含量明显高于CK组,在第2、3、4、5周差异显著($P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$)。以上结果表明,LVEF处理可延缓杨梅TSS、TA、VC和花色苷含量的降低。

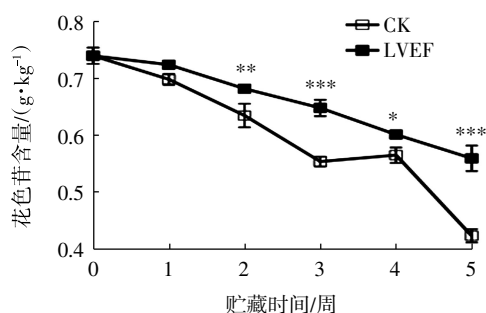


图5 LVEF处理对杨梅花色苷含量的影响

Fig.5 Effect of LVEF treatment on anthocyanin content in bayberry

2.3 LVEF处理对杨梅糖含量的影响

糖分是水果中重要的风味和营养成分,其对于评估水果的营养特性和风味具有重要意义。可溶性糖是水果中主要的糖类,能给水果带来甜味,增加口感。从图6A可知,随着贮藏时间的延长,LVEF组和CK组杨梅的可溶性糖含量逐渐降低。CK组前4周缓慢降低,第5周急剧下降,而LVEF组整体呈现缓慢降低

的趋势。在同一贮藏期内,LVEF组的杨梅可溶性糖含量高于CK组,且在贮藏第3、4、5周差异显著($P<0.01$, $P<0.001$)。贮藏第5周时,LVEF组杨梅的可溶性糖含量(73.41 ± 2.41)g/kg比CK组(55.53 ± 3.56)g/kg高32.20%。还原糖是分子中具有游离醛基或酮基的糖类,如葡萄糖和果糖。从图6B可以看出,随着贮藏时间的延长,LVEF组和CK组杨梅的还原糖含量逐渐升高,CK组升高更快,在贮藏的3、4、5周,两组具有显著差异($P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$)。贮藏第5周,CK组杨梅还原糖含量(36.53 ± 0.84)g/kg比LVEF组(29.45 ± 0.82)g/kg高24.04%。从图6C可以看出,随着贮藏时间的延长,蔗糖的含量逐渐降低,贮藏前4周LVEF组和CK组杨梅蔗糖含量均快速降低,第4~5周变化趋于平缓。在整个贮藏期间,LVEF组蔗糖含量显著高于CK组($P<0.05$, $P<0.01$)。以上结果表明,LVEF处理能抑制可溶性糖和蔗糖的降解及还原糖含量的升高。

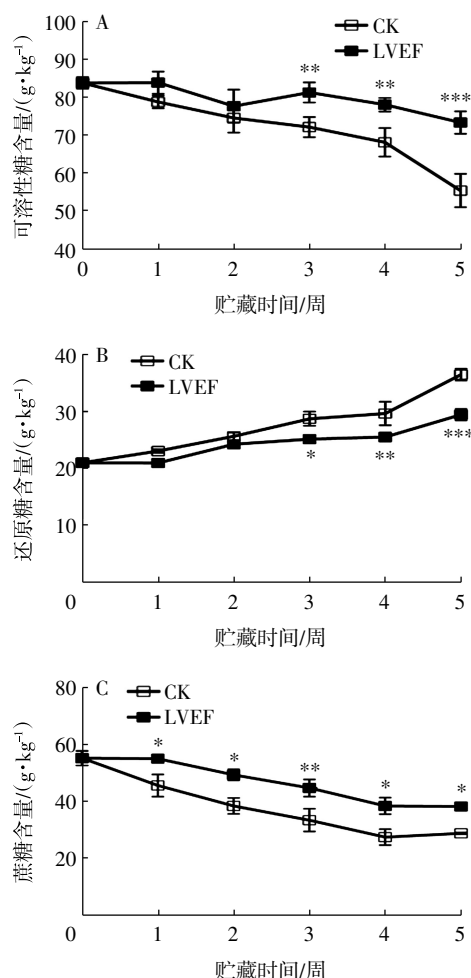


图6 LVEF处理对杨梅可溶性糖(A)、还原糖(B)和蔗糖(C)含量的影响

Fig.6 Effects of LVEF treatment on the contents of soluble sugar (A), reducing sugar (B) and sucrose (C) in bayberry

2.4 LVEF 对杨梅感官风味的影响

香气是果实的重要品质指标,直接影响消费者的喜好^[30]。人类仿生系统电子鼻是根据人类嗅觉系统研制的一种可对挥发性成分进行快速检测的仪器。从图 7A 和图 7B 可以看出,随着贮藏时间的延长,W1S 和 W1W 传感器检测到的风味物质变化比较明显,主要是烃类物质和硫化物等。随着贮藏时间的延长,烃类物质和硫化物含量逐渐增加,LVEF 处理能延缓该类物质的增加速度。在主成分分析(PCA)中,第一主成分贡献率为 90.0%,第二主成分贡献率为 5.1%,累计贡献率为 95.1%,说明其能够代表样本的主要挥发性成分信息特征(图 7C)。由图 7C 可知,随着贮藏时间的延长,LVEF 组和 CK 组杨梅的风味都发生了偏移,且偏移越来越大,贮藏第 5 周的 CK 组杨梅风味距离鲜样最远,风味与鲜样相比相差最大,而贮藏第 5 周的 LVEF 组杨梅风味偏移较近。图 7D 为杨梅风味电子鼻传感器的载荷分析图,与 PCA 基于相同的算法,每个传感器贡献率系数在载荷图 PCA 坐标系上的位置可以体现其对特定气味的分辨力,靠近原点位置的传感器贡献率低,远离原点的传感器贡献率高。从图 7D 可以看出,W1S 的贡献率最高,W1W 的贡献率次之,其余传感器的贡献率较低,以上结果与图 7A 和图 7B 的

结果一致。综上,LVEF 处理能延缓杨梅风味的劣变,保持原有风味的维持,对杨梅具有良好的保鲜效果。

2.5 杨梅品质指标的动态变化及相关性分析

首先对杨梅的色泽、TSS 等感官指标,VC、TA、花色苷、可溶性糖、还原糖、蔗糖含量等营养指标进行热图聚类分析。从图 8A 中可以看出,随着贮藏时间的延长,VC、花色苷、可溶糖和蔗糖的含量逐渐降低,LVEF 处理能明显延缓此类物质含量的降低;还原糖含量随着贮藏时间的延长逐渐升高。对杨梅品质指标进行载荷分析,第一主成分贡献率为 89.0%,第二主成分的贡献率为 8.7%,这两个主成分的总贡献率为 97.7%,能够反映杨梅样品贮藏品质的变化趋势(图 8B)。杨梅营养指标中,可溶性糖、蔗糖和还原糖含量离原点远,对杨梅的新鲜度贡献率最大;TSS、TA、VC、花色苷含量和色度离原点近,对杨梅新鲜度贡献小。通过对贮藏过程中杨梅品质指标的相关性分析发现, a^* 、 b^* 和 L^* 值与可溶性糖、蔗糖含量呈显著正相关,与还原糖含量呈显著负相关($P<0.05$);营养指标 VC、TA 和花色苷含量与可溶性糖、蔗糖含量呈显著正相关($P<0.05$),与还原糖含量呈显著负相关(图 8C 和图 8D)。以上结果表明,LVEF 处理有效延缓了杨梅品质的劣变,且可溶性糖、蔗糖和还原糖可作为杨梅贮运过程中特征

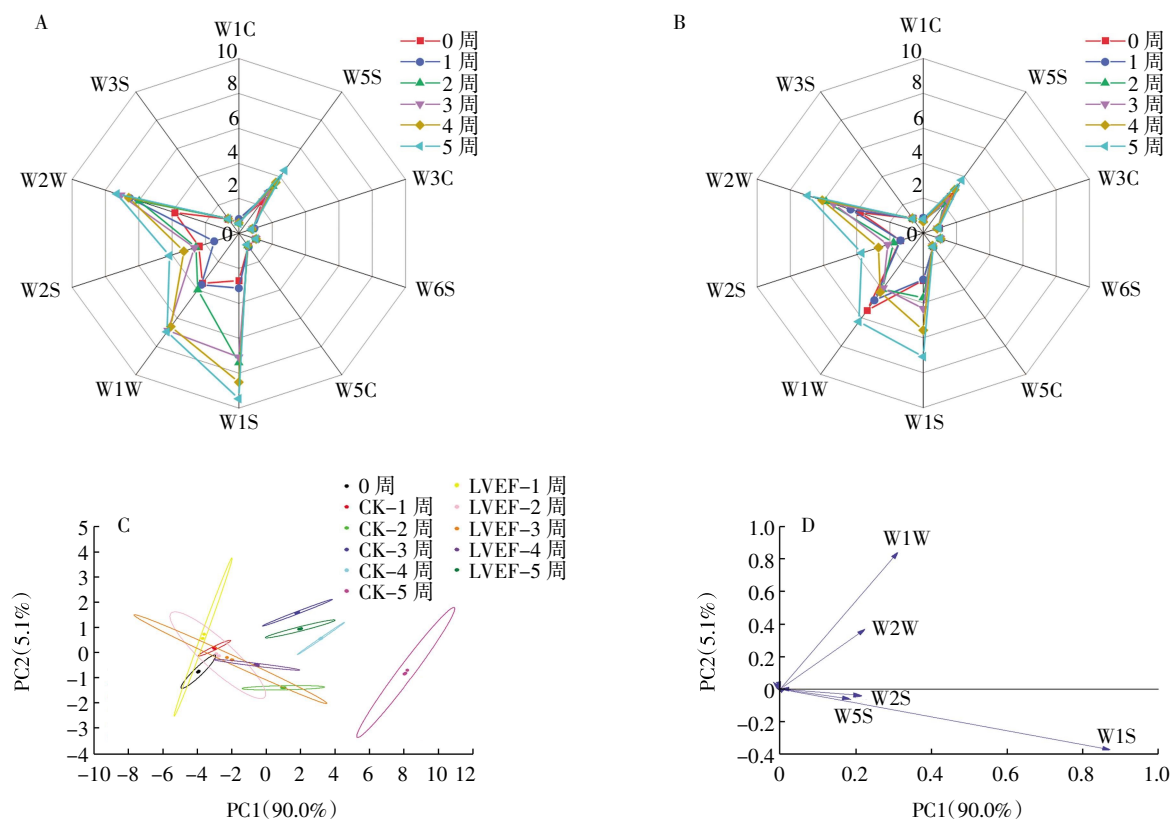
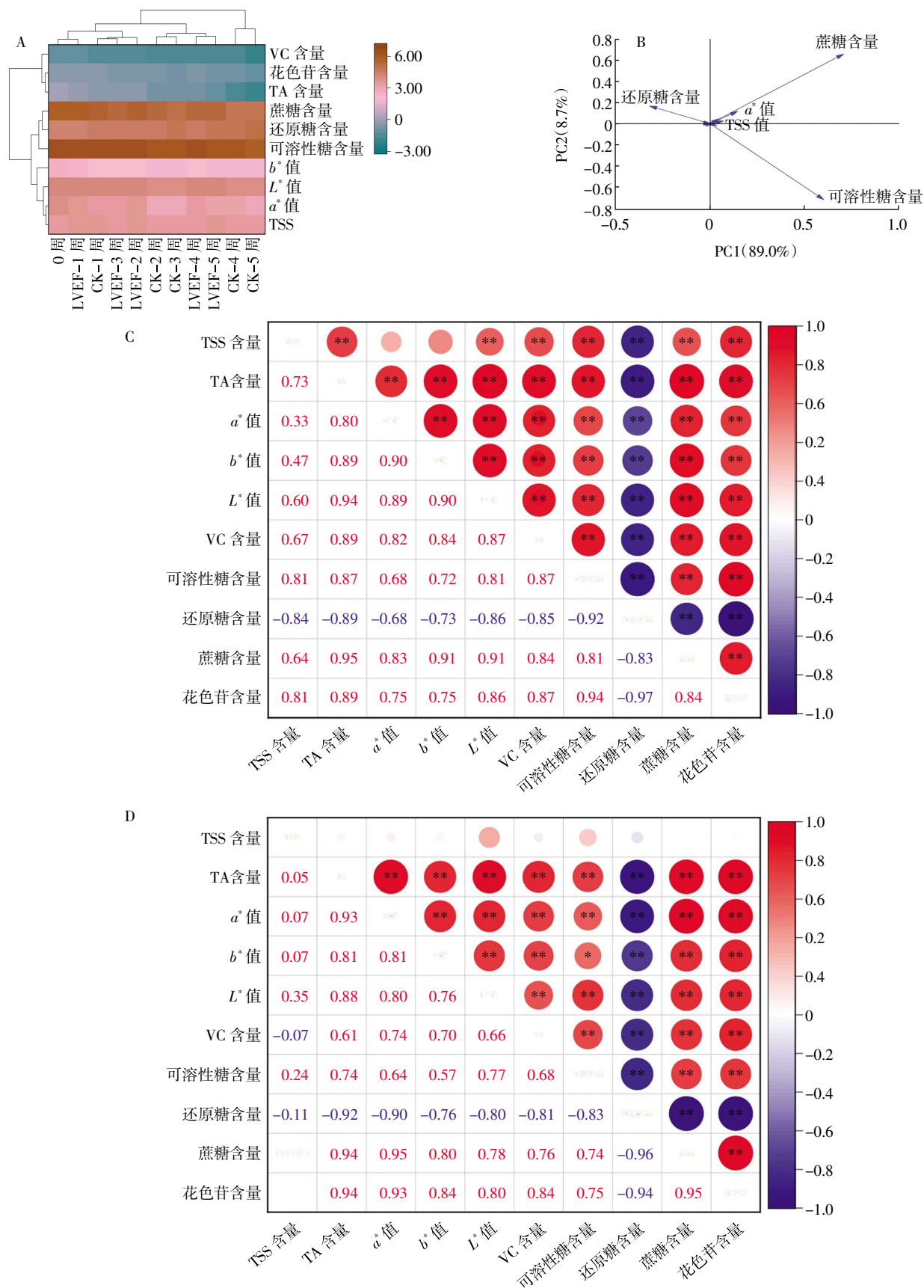


图 7 杨梅挥发性成分的电子鼻雷达图(A(CK)、B(LVEF))、主成分(C)和载荷(D)分析

Fig.7 Analysis of volatile components of bayberry by radar map (A(CK), B(LVEF)), principal component analysis (C) and load analysis (D) of electronic nose



注: * 两侧因素间呈显著相关($P < 0.05$); ** 两侧因素间呈极显著相关($P < 0.01$)。

图8 杨梅品质指标的聚类热图(A)、载荷(B)和相关性(C(CK)、D(LVEF))分析

Fig.8 Analysis of cluster heat map (A), load (B), and correlation (C(CK), D(LVEF)) between quality indexes of bayberry

营养指标。

3 讨论

社会在加速演进,日新月异的科技元素注入到日常的衣食住行,人们对高质量果品的需求快速增加。目前已有的杨梅保鲜技术无法满足差异化、品质化、高端化的消费需求,因此亟需开发新的绿色低碳、安全高效的保鲜技术。低压静电场处理作为新兴物理保鲜技术,对杨梅的品质和风味的保鲜效果还不甚明晰。果品的色泽和风味是果品新鲜度最直接的感官指标,直接影响消费者的购买欲^[32]。本文分析了 LVEF 处理对杨梅的色泽(a^* 、 b^* 和 L^* 值)的影响,发现 LVEF 处理能推迟贮藏中杨梅 a^* 、 b^* 和 L^* 值的降低,延缓色泽变暗;营养成分测定结果表明,LVEF 处理能明显维持杨梅原有的营养成分,如 TSS、可滴定酸、VC、花色苷、可溶性糖、蔗糖和还原糖含量等。

果实的挥发性成分是果实的重要感官指标。电子鼻是一种新型的人类仿生系统,可以模拟人类的嗅觉可视化、数字化水果的挥发性成分^[33]。载荷分析可用于判别杨梅营养品质指标对于挥发性成分的贡献率,离原点越远,则贡献率越大。电子鼻载荷分析结果表明 W1S 和 W1W 对贮藏杨梅风味贡献率最大,与雷达图分析结果一致。杨梅营养指标的主成分分析发现,可溶性糖、蔗糖和还原糖含量对贮藏过程中杨梅品质贡献率大,可作为贮藏过程中杨梅新鲜度指示的特征性参数。

4 结论

本研究得出以下结论:LVEF 处理能明显延缓贮藏期间杨梅的衰老,阻滞营养成分的流失,减少挥发性成分的劣变,维持杨梅原有的风味;杨梅品质指标的载荷分析表明,可溶性糖、蔗糖和还原糖含量可作为杨梅贮藏过程中特征营养品质指标,且与色泽指标具有良好的相关性。以上研究结果可为 LVEF 保鲜杨梅的市场化应用奠定良好的研究基础。

参考文献:

- [1] SUN C D, ZHENG Y X, CHEN Q J, et al. Purification and anti-tumour activity of cyanidin-3-O-glucoside from Chinese bayberry fruit[J]. Food Chemistry, 2012, 131: 1287-1294. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.09.121.
- [2] WU D, CHENG H, CHEN J L, et al. Characteristics changes of Chinese bayberry (*Myrica rubra*) during different growth stages[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56: 654-662. DOI: 10.1007/s13197-018-3520-4.
- [3] ZHANG S W, YU Z P, SUN L, et al. An overview of the nutritional value, health properties, and future challenges of Chinese bayberry[J/OL]. PeerJ, 2022, 10[2024-05-05]. <https://peerj.com/articles/13070/>. DOI: 10.7717/peerj.13070.
- [4] ZHANG Q Z, HUANG Z J, WANG Y, et al. Chinese bayberry (*Myrica rubra*) phenolics mitigated protein glycoxidation and formation of advanced glycation end-products: A mechanistic investigation[J/OL]. Food Chemistry, 2021, 361[2024-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814621011080>. DOI: 10.1007/s11130-013-0349-x.
- [5] SUN C H, HUANG C, XU X, et al. Biological activities of extracts from Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.): A review[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2013, 68: 97-106. DOI: 10.1007/s11130-013-0349-x.
- [6] REN H Y, HE Y H, QI X J, et al. The bayberry database: A multiomic database for *Myrica rubra*, an important fruit tree with medicinal value[J/OL]. BMC Plant Biology, 2021, 21: 452[2024-05-05]. <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-021-03232-x>. DOI: 10.1186/s12870-021-03232-x.
- [7] SHI T, SUN J, WU X X, et al. Transcriptome analysis of Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.) fruit treated with heat and 1-MCP[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 133: 40-49. DOI: 10.1016/j.plaphy.2018.10.022.
- [8] 黄钰萍, 刘青娥. 1-MCP 处理对杨梅果实贮藏期间品质及活性氧代谢的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(9):13-20. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2021.09.003.
- [9] WANG S Y, SHI X C, LIU F Q, et al. Effects of exogenous methyl jasmonate on quality and preservation of postharvest fruits: A review[J/OL]. Food Chemistry, 2021, 353[2024-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030881462100488X>. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129482.
- [10] WANG K T, JIN P, CAO S F, et al. Methyl jasmonate reduces decay and enhances antioxidant capacity in Chinese bayberries[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57: 5809-5815. DOI: 10.1021/jf900914a.
- [11] 赖洁玲, 李长秀, 翁胜杰, 等. 壳聚糖和二氧化氯联合处理对杨梅的保鲜效果[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(13):3213-3217. DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2015.13.037.
- [12] 蔡继业, 房祥军, 韩延超, 等. 气调贮藏对东魁杨梅品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(2):352-359. DOI:10.3969/j.issn.1004-1524.2022.02.17.
- [13] 曹鹏飞, 刘青娥. 杨梅贮藏保鲜工艺技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2020(24):221-222, 225. DOI:10.3969/j.issn.1007-5739.2020.24.087.
- [14] 张浩宇, 刘慧燕, 杨亚丽, 等. 低压静电场对灵武长枣低温贮藏品质及呼吸强度的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(1):211-215.
- [15] 孟晓曼, 孙亚男, 程儒杨, 等. 低压静电场-真空协同保鲜对

- 白玉菇采后品质和抗氧化代谢的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(23):72–81. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20211128-341.
- [16] 吴玉婷, 谢超, 周卓颖, 等. 基于低压静电场协同低温对贵妃红桃保鲜效果的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(11):167–172.
- [17] 崔帅, 段玉权, 侯华铭, 等. 低压静电场辅助低温对葡萄和无花果保鲜效果的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13):294–302. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2023.13.035.
- [18] XU C, ZHANG X Y, LIANG J, et al. Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment[J/OL]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192[2024-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925521422001855>. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2022.112017.
- [19] 周英杰, 谢超, 梁佳, 等. 低压静电场协同低温对水蜜桃储藏保鲜过程中品质的影响[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2019, 38(5):429–435. DOI:10.3969/j.issn.1008-830X.2019.05.009.
- [20] 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.044.
- [21] CHEN Y H, XIE H L, TANG J Y, et al. Effects of acidic electrolyzed water treatment on storability, quality attributes and nutritive properties of longan fruit during storage[J/OL]. Food Chemistry, 2020, 320[2024-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814620305033?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.126641.
- [22] JIANG X J, LIN H T, SHI J, et al. Effects of a novel chitosan formulation treatment on quality attributes and storage behavior of harvested litchi fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 252: 134–141. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.095.
- [23] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2007.
- [24] 隋思瑶, 马佳佳, 王毓宁, 等. 自发气调包装对白玉枇杷保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(6):15–20. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2019.06.003.
- [25] 池铭, 孙丽娟, 马立杰, 等. 不同光质处理对采后桃果皮色泽及花色苷代谢的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(3):209–217. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20211229-334.
- [26] 王馨渝, 安容慧, 赵安琪, 等. 真空预冷与雾化 ε -聚赖氨酸共处理对采后上海青品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(6):103–115. DOI:10.12301/spxb202200336.
- [27] LI H Y, WANG Y, ZHANG J X, et al. Prediction of the freshness of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) using E-nose, E-tongue, and colorimeter based on biochemical indexes analyzed during frozen storage of whole fish[J/OL]. Food Chemistry, 2023, 402[2024-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814622022877>. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134325.
- [28] HUANG G L, LIU T T, MAO X M, et al. Insights into the volatile flavor and quality profiles of loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) during shelf-life via HS-GC-IMS, E-nose, and E-tongue[J/OL]. Food Chemistry: X, 2023, 20[2024-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590157523003292>. DOI: 10.1016/j.fochx.2023.100886.
- [29] SHEN C, CAI Y, WU X N, et al. Characterization of selected commercially available grilled lamb shashliks based on flavor profiles using GC-MS, GC x GC-TOF-MS, GC-IMS, E-nose and E-tongue combined with chemometrics[J/OL]. Food Chemistry, 2023, 423[2024-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814623008750>. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136257.
- [30] ZHU X Y, CHEN Y X, LI J Y, et al. Exogenous 2, 4-epibrassinolide treatment maintains the quality of carambola fruit associated with enhanced antioxidant capacity and alternative respiratory metabolism[J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12[2024-05-05]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8212023/>. DOI: 10.3389/fpls.2021.678295.
- [31] 肖作兵, 蒋新一, 牛云蔚. 水果香气物质分析研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(2):14–22. DOI:10.12301/j.issn.2095-6002.2021.02.003.
- [32] HEN L L, NING F J, ZHAO L, et al. Quality assessment of royal jelly based on physicochemical properties and flavor profiles using HS-SPME-GC/MS combined with electronic nose and electronic tongue analyses[J/OL]. Food Chemistry, 2023, 403[2024-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814622023548>. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134392.
- [33] SINGH S B, GAUR S. Development of rapid and non-destructive electric nose (E-nose) system for shelf life evaluation of different edible seeds[J/OL]. Food Chemistry, 2023, 426[2024-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814623011809>. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136562.

收稿日期:2024-08-06