

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

杨泽鹏¹, 王培鉴², 湛凯兰¹, 冯婉清¹, 陈广川³, 肖万勇⁴, 唐勇^{1*}

(1. 西华大学食品与生物工程学院, 成都 610039; 2. 成都信息工程大学软件学院, 成都 610225;
3. 成都奕阳现代科技有限公司, 成都 610041; 4. 成都奕阳现代食品安全技术研究中心, 成都 610041)

摘要: **目的** 研究高压静电场(high-voltage electrostatic field, HVEF)协同低温保鲜对莴笋贮藏品质的影响以及电子鼻对莴笋新鲜度的无损检测。**方法** 本研究以新鲜莴笋茎为研究对象, 4℃协同 HVEF 冷藏保鲜为实验组, 4℃常规冷藏保鲜为对照组, 测定其贮藏期间感官评分、呼吸速率、硬度、失重率、色差、叶绿素含量和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI), 同时利用电子鼻结合主成分分析(principal component analysis, PCA)和线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)研究贮藏过程中不同新鲜度莴笋的挥发性气味变化。**结果** HVEF 组莴笋贮藏期可达 35 d。贮藏期间莴笋呼吸速率得到抑制, 硬度、色泽、叶绿素、水分等品质得到较好的保持, PCA 和 LDA 对不同新鲜度莴笋均有良好的区分效果。**结论** HVEF 协同低温保鲜能够减缓莴笋品质劣化, 延长贮藏期; 电子鼻结合 PCA 和 LDA 可对不同新鲜度莴笋进行区分, 对莴笋贮藏过程中的无损检测具有重要意义。

关键词: 莴笋; 高压静电场; 低温; 保鲜; 品质; 电子鼻

Study on storage quality effects of *Lectica sativa* L. by high-voltage electrostatic field synergistic low temperature preservation and the non-destructive detection of freshness by electronic nose

YANG Ze-Peng¹, WANG Pei-Jian², CHEN Kai-Lan¹, FENG Wan-Qing¹,
CHEN Guang-Chuan³, XIAO Wan-Yong⁴, TANG Yong^{1*}

(1. School of Food and Bioengineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. School of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 3. Chengdu Esun Modern Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 4. Chengdu Esun Modern Food Safety Technology Research Center, Chengdu 610041, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of high-voltage electrostatic field (HVEF) combined with low-temperature preservation on the storage quality of *Lectica sativa* L. and the non-destructive detection of *Lectica sativa* L. freshness by electronic nose. **Methods** In this study, fresh *Lectica sativa* L. was taken as the research object, the experimental group was refrigerated at 4℃ with HVEF, and the control group was kept fresh at 4℃ without HVEF. The sensory score, respiration rate, firmness, weight loss rate, color difference, chlorophyll content, and magnetic resonance imaging (MRI) of *Lectica sativa* L. in different treatment groups were measured during

基金项目: 四川省重点研发项目(2021YFQ0071)

Fund: Supported by the Key Research and Development Project of Sichuan Province (2021YFQ0071)

*通信作者: 唐勇, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: jacktangy@gamil.com

*Corresponding author: TANG Yong, Ph.D, Professor, School of Food and Biological Engineering, Xihua University, No.999, Jinzhou Road, Jinniu District, Chengdu 610039, China. E-mail: jacktangy@gamil.com

storage. At the same time, electronic nose combined with principal component analysis (PCA) and linear discriminant analysis (LDA) were used to study the volatile odor changes of *Lectica sativa* L. with different freshness during storage. **Results** The storage period of *Lectica sativa* L. in the HVEF group was up to 35 days. During the storage period, the respiration rate of *Lectica sativa* L. in the HVEF group was inhibited, and the quality of firmness, color, chlorophyll, and moisture were well maintained. PCA and LDA had good distinguishing effects on *Lectica sativa* L. with different freshness. **Conclusion** HVEF combined with low temperature preservation can slow down the quality deterioration of fresh *Lectica sativa* L. and prolong the storage period. The electronic nose combined with PCA and LDA can distinguish *Lectica sativa* L. with different freshness, which is of great significance to the non-destructive testing of *Lectica sativa* L. during storage.

KEY WORDS: *Lectica sativa* L.; high-voltage electrostatic field; low temperature; preservation; quality; electronic nose

0 引言

莴笋(*Lectica sativa* L. var. *angus tata* Irish ex Bremer)又名莴苣, 菊科, 属 1 年生或 2 年生草本植物, 含有多糖、有机酸、树脂、甘露醇、蛋白质及莴苣素等^[1], 营养价值较高, 且具有一定保健功效, 是春季及秋冬重要的蔬菜之一^[2]。莴笋根据生长时间可分为春莴笋和秋莴笋, 春莴笋主要用于食品加工, 而秋莴笋由于其成熟于低温期, 耐寒性更强, 更多作为贮藏的主要对象。秋莴笋在贮藏过程中存在呼吸强度高^[3]、褐变、切割表面木质化以及营养成分损失严重等现象, 而传统莴笋保鲜方式(如冷藏法、气调包装法)存在贮藏过程烦琐、贮藏时间较短、保鲜成本高等问题^[4]。

高压静电场(high-voltage electrostatic field, HVEF)能够电离空气产生离子雾和臭氧, 其中负离子具有抑制果蔬新陈代谢、减缓呼吸活动、降低酶活性等作用, 而臭氧既能起杀菌作用, 也能与乙烯、乙醇和乙醛等发生反应, 间接起到保鲜作用^[5], 具有一次投入、长期使用、无污染等优势, 能使果蔬最大限度地保持其品质和营养, 是一种具有良好应用前景的新技术^[6]。已有研究表明: HVEF 处理青花菜后, 呼吸速率降低, 腐烂指数减小, 维持了较高的维生素 C 含量, 使得青花菜具有更好的贮藏品质^[7]; HVEF 处理能够抑制采后鲜切黄甜竹笋的木质纤维化和褐变, 延缓品质劣变^[8]; HVEF 处理使得鲜切西兰花的硬度和色泽得到良好的保持, 将储存期延长至 40 d^[9]; HVEF 处理蔓越莓后, 呼吸速率得到抑制, 色泽和可溶性固形物得到良好保持, 大大延长了货架期^[10]。莴笋作为我国城乡居民的主要蔬菜之一, 贮藏过程中容易发生品质劣变导致经济效益降低, 而 HVEF 作为新型的物理保鲜手段在莴笋贮藏中却鲜有研究, 探究 HVEF 对莴笋贮藏品质的影响, 可为莴笋的贮藏保鲜提供新的理论基础。

本研究以新鲜莴笋为实验原料, 采用 3 kV 的 HVEF (高压电晕电场^[11]), 以感官评分、呼吸速率、叶绿素含量、硬度、失重率和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)为评价指标, 对比 HVEF 协同 4℃冷藏与常规 4℃冷

藏环境中贮藏品质变化情况, 同时使用电子鼻设备对莴笋贮藏过程中的新鲜度进行无损检测, 以期为莴笋的 HVEF 保鲜和电子鼻无损检测提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜秋莴笋采摘于茂县家庭农场, 生长周期约为 80 d, 精选茎粗、无空心、未抽苔的莴笋, 摘去叶片, 擦去叶痕流出的白色汁液后 2 h 内运回实验室。

丙酮、碳酸钙(分析纯, 成都市科隆化学品有限公司)。

1.2 仪器与设备

BOS-3000 高压静电场设备(四川奕阳现代农业开发有限公司); CO₂-RS485 二氧化碳传感器(成都奕阳现代食品安全技术研究中心); V0.2.68 数字化系统(成都奕阳现代科技有限公司); AK-223 常压冷库(湖北黄石市奥控电子有限公司); GY-3 果蔬硬度计(上海高致精密仪器有限公司); WF32 精密色差计(深圳市威福光电科技有限公司); MesoMR23-040V-1 核磁共振分析仪(苏州纽迈分析仪器股份有限公司); JY2000 百分之一感量天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司); V-1300 可见分光光度计(上海美析仪器有限公司); PEN3 电子鼻(德国 AIRSENSE 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

将莴笋使用保鲜袋包裹分装成 2 根一袋, 然后装入塑料箱(规格 60 cm×40 cm×23 cm)中, 转入 4℃、85%湿度的 HVEF 冷库(输出电压 3 kV)和常压冷库中进行贮藏, 每 5 d 进行一次指标测定。

1.3.2 感官评价

参照李泽珍等^[12]的方法制定感官评分标准, 结合评分标准对食品专业 10 位学生进行培训后, 以 10 位评价人员感官评分的平均值作为莴笋的最终得分。同时, 根据莴笋的整体品质、颜色、气味等将莴笋的新鲜度可划分为 4 个等级^[13]。感官评定标准见表 1。

表 1 莴笋新鲜度分级及感官评价标准
Table 1 *Lectica sativa* L. freshness grading and sensory evaluation criteria

新鲜度等级	分值(x)	评价标准
新鲜	$8.0 \leq x < 9.0$	品质完好、深绿色、表面无褐变, 具有莴笋特有清香, 可出售
次新鲜	$7.0 \leq x < 8.0$	品质完好、深绿色、表面轻微褐变, 气味正常, 出售受限
可接受	$5.0 \leq x < 7.0$	品质一般、浅绿色、表面出现明显褐变, 可食用
腐败	$x < 5.0$	品质差、颜色暗淡、大部分发生褐变甚至腐败、出现异常气味, 食用受限

1.3.3 果蔬呼吸速率的测定

每次取用 500 g 莴笋置于规格为 350 cm×265 cm×100 mm 的密封、透明盒子中, 并放入物联化 CO₂ 传感器, 静置 1 h 后, 读取盒子内 CO₂ 含量, 每组进行 3 组重复。

1.3.4 失重率的测定

采用称重法^[14], 测定并记录各组莴笋的原始重量, 每隔 5 d 重新测定一次重量, 按照公式(1)计算莴笋失重率:

$$\text{失重率}/\% = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_0 表示第 0 d 莴笋重量, g, m_i 表示第 i d 莴笋重量, g。

1.3.5 硬度的测定

采用便携式果实硬度计(GY-3)测定样品的硬度^[15]。分别在莴笋径的上、中、下 3 段削去大约 1 cm² 表皮, 使用 8 mm 的测试探头进行穿刺实验(压头压入深度 10 mm), 结果以 mg/cm² 表示。

1.3.6 色差的测定

采用精密色差仪进行测定^[15]。色差仪经过黑白校正后, 对样品进行 L^* 、 a^* 、 b^* 参数的测定, 其中 L^* 表示亮度, 值越大, 亮度越大; a^* 表示绿红度, 负值表示绿色, 正值表示红色, 绝对值越大, 颜色越深; b^* 表示黄蓝度, 负值表示蓝色, 正值表示黄色, 绝对值越大, 颜色越深。

总色差, 用 ΔE 表示, 公式为式(2):

$$\Delta E = (L_i^* - L_0)^2 + (a_i^* - a_0)^2 + (b_i^* - b_0)^2 \quad (2)$$

式中, L_0 、 a_0 、 b_0 分别为 0 d 莴笋的色泽参数; L_i^* 、 a_i^* 、 b_i^* 分别为莴笋样品贮藏第 i d 的色泽参数。

1.3.7 叶绿素的测定

参照曹建康等^[16]的方法略作修改, 使用分光光度计法对莴笋鲜物质中叶绿素含量进行测定。

提取: 称取 1.0 g 果蔬样品放入研钵(提前经过冷藏)中, 加少量石英砂和碳酸钙粉及 2~3 mL 80%丙酮溶液, 研磨成匀浆, 再加 10 mL 80%丙酮溶液继续研磨至组织变白, 静置 3~5 min 提取。然后使用 80%丙酮将样品溶液过滤至容量瓶中, 并定容至 50 mL, 摇匀。

测定: 以 80%丙酮溶液为空白参比, 用 1 cm 光径比色皿在波长 663 和 645 nm 处分别比色测定提取液的吸光度值, 重复 3 次。

计算: 按公式(3)计算叶绿素含量:

$$\text{叶绿素含量}/(\text{mg}/100 \text{ gFW}) = \frac{(20.29A_{645} + 8.05A_{663}) \times V}{1000 \times m} \quad (3)$$

式中, V 为样品提取液总体积, mL; m 为莴笋样品质量, g; A_{645} 、 A_{663} 为 645、663 nm 下的吸光度值。

1.3.8 MRI 成像

采用低场核磁共振仪^[17]对莴笋样品进行 MRI。取出莴笋切成厚度为 2 cm 的圆柱, 再沿着圆柱直径切分成 4 块, 放入样品管中进行核磁共振成像, 成像后图片进行统一映射和伪彩处理。参数设置为: 以俯视图为成像方位, 重复时间 500 ms, 回波时间 20 ms。

1.3.9 电子鼻的测定

依据感官评价中的莴笋新鲜度评级, 进一步探究莴笋贮藏过程中挥发性气味的变化, 利用 PEN3 电子鼻测定不同新鲜度样品的气味, 表 2 为内置 10 个选择性金属氧化半导体传感器所对应的敏感物质类型。称取 50 g 莴笋放入塑料罐中密封, 在室温条件下静置 30 min, 用电子鼻吸取顶空气体进行检测, 每组平行检测 8 次。测定参数设置为: 样品准备时间 5 s, 检测时间 100 s, 清洗时间 120 s, 进样流速 300 mL/min, 利用电子鼻系统自带软件对结果进行分析。

表 2 PEN3 型电子鼻各传感器敏感物质类型
Table 2 Types of sensitive substances of PEN3 electronic nose sensors

传感器序号	金属氧化物传感器名称	性能描述
S1	W1C	芳香成分
S2	W5S	灵敏度大, 对氮氧化物很灵敏
S3	W3C	氨水, 对芳香物灵敏
S4	W6S	主要对氢气有选择性
S5	W5C	烷烃, 芳香成分
S6	W1S	对甲烷灵敏
S7	W1W	对硫化物灵敏
S8	W2S	对乙醇灵敏
S9	W2W	芳香成分, 对有机硫化物灵敏
S10	W3S	对烷烃灵敏

1.4 数据分析

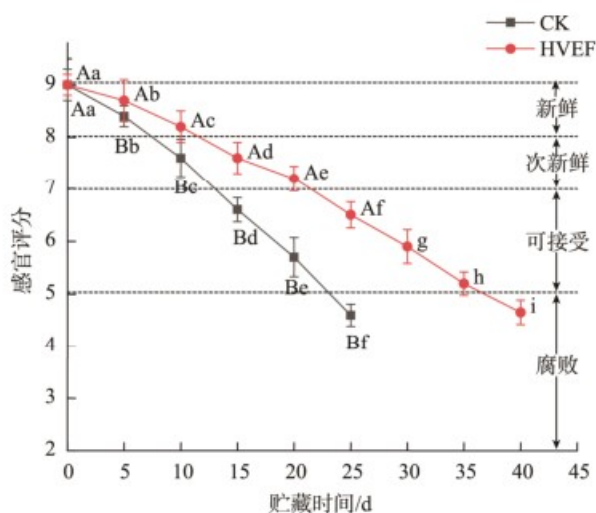
使用 SPSS 26.0 软件及 Origin Pro 8.5 软件对实验数据进行处理、分析和作图; 电子鼻数据利用 Win muster 软件进行数据的线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)

和主成分分析(principal component analysis, PCA)。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间感官评分的变化

由图1可以看出, 莴笋在4℃条件下感官评分呈现不断下降的趋势。贮藏0 d的莴笋样品呈深绿色, 表面无褐变, 具有莴笋独特的清香味, 感官评分接近9.0分。在贮藏25 d时, HVEF组莴笋感官评分仍然可达到6.5分, 而对照组(CK组)莴笋感官评分已经低于5分, 莴笋颜色暗淡, 大部分发生褐变甚至腐败, 出现异常气味, 食用受限。在贮藏至35 d时, HVEF组莴笋感官评分为5.2分, 仍然具有食用价值, 同比CK组明显延长了贮藏期。



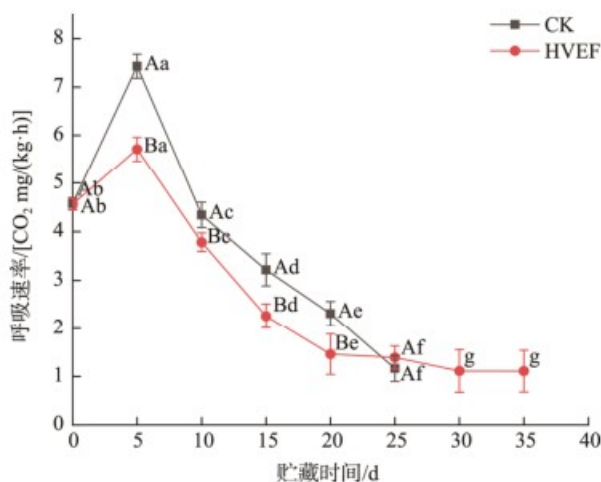
注: 不同大写字母表示相同贮藏时间不同贮藏方式之间的差异显著, 不同小写字母表示相同贮藏方式不同贮藏时间之间的差异显著($P < 0.05$), 图2同。

图1 莴笋新鲜度划分和贮藏过程中的感官得分($n=10$)

Fig.1 *Lactuca sativa* L. freshness classification and sensory score during storage ($n=10$)

2.2 贮藏期间呼吸速率的变化

呼吸强度主要用来反映莴笋在贮藏期间新陈代谢的变化^[18]。从图2中可以看出, 莴笋经过预冷后进入保鲜库呼吸强度约为4.57 CO₂ mg/(kg·h)。通过连续测量呼吸强度, 得出莴笋在贮藏5 d前后呼吸强度最高, 此时HVEF组莴笋呼吸速率约为5.85 CO₂ mg/(kg·h), CK组莴笋呼吸速率约为7.43 CO₂ mg/(kg·h); 在整个贮藏过程中, HVEF组呼吸强度明显低于CK组; CK组达到贮藏终点后, HVEF组莴笋仍然具有一定生理活动, 这是由于HVEF使得贮藏环境中产生大量的负离子, 抑制了莴笋的新陈代谢^[19]和呼吸作用, 降低了呼吸峰值, 与陈庆^[20]在绿芦笋上的研究结果一致。



注: CK组莴笋贮藏至25 d时达到终点。

图2 贮藏期间莴笋呼吸速率的变化($n=3$)

Fig.2 Changes in the respiration rates of *Lactuca sativa* L. during storage ($n=3$)

2.3 贮藏期间硬度、失重率、色差和叶绿素变化

表3中显示了在贮藏期间莴笋的失重率、硬度、叶绿素含量及色差的变化规律。由表3可知, 在贮藏过程中, 随着贮藏时间的延长, 各组莴笋的硬度、叶绿素含量呈下降趋势, 同时失重率和色差呈上升趋势。在贮藏至25 d时, CK组莴笋的硬度下降了30.15%, 显著高于HVEF组(13.95%) ($P < 0.05$), 同时CK组莴笋失重率(4.17%)显著高于HVEF组(2.84%) ($P < 0.05$); 随着贮藏时间的延长, 莴笋叶绿素不断降低、色泽发生变化, 在贮藏至25 d时, CK组莴笋的叶绿素含量下降至3.18 mg/100 gFW, 显著低于HVEF组(3.88 mg/100 gFW) ($P < 0.05$), 并且CK组莴笋总色差达到8.01, 而HVEF组总色差为4.42。

莴笋的各项贮藏品质指标综合表明, HVEF能够很好地保持莴笋的水分, 抑制了莴笋硬度和失重率的变化, 使得莴笋品质得到较好的保持, 与孙贵宝等^[21]在皇冠梨上的研究结果一致。这可能是由于HVEF能够改变莴笋细胞的跨膜电位, 降低酶活性, 延缓细胞的新陈代谢, 减缓了莴笋贮藏期间的品质劣变速度^[22]。

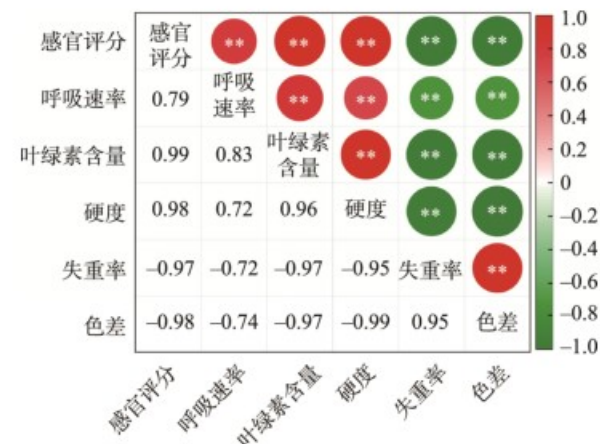
2.4 各指标的相关性分析

为探究贮藏过程中莴笋各指标之间的联系, 绘制了如图3所示的Pearson的相关性系数图, 红色表示正相关, 绿色表示负相关。莴笋贮藏过程中各指标之间呈现出较强的相关性, 其中感官评分与呼吸速率、叶绿素含量、硬度呈极显著正相关($P < 0.01$), 与失重率和色差呈极显著负相关($P < 0.01$), 这是因为呼吸作用是植物体内物质不断分解的过程, 散发出大量的呼吸热, 往往容易消耗大量的营养物质, 导致叶绿素含量降低、硬度下降、失重率和色差增大, 衰老劣变加速^[23], 进而使得感官综合评分降低。

表 3 莴笋贮藏期间品质指标的变化(n=3)
Table 3 Changes in quality indicators of *Lectica sativa* L. during storage (n=3)

贮藏时间/d	分组	硬度/(mg/cm ²)	失重率/%	色差(ΔE)	叶绿素/(mg/100 gFW)
0	CK	14.76±0.20 ^{Aa}	0.00±0.00 ^{Aa}	0.00±0.00 ^{Aa}	5.24±0.04 ^{Aa}
	HVEF	14.77±0.21 ^{Aa}	0.00±0.00 ^{Aa}	0.00±0.00 ^{Aa}	5.26±0.07 ^{Aa}
5	CK	14.30±0.17 ^{Bb}	1.34±0.22 ^{Ab}	0.89±0.23 ^{Ab}	5.07±0.09 ^{Bb}
	HVEF	14.35±0.16 ^{Ab}	0.36±0.10 ^{Bb}	0.49±0.11 ^{Bb}	5.19±0.08 ^{Aa}
10	CK	13.37±0.24 ^{Bc}	2.34±0.21 ^{Ac}	2.89±0.22 ^{Ac}	4.38±0.08 ^{Bc}
	HVEF	14.34±0.11 ^{Aab}	1.05±0.16 ^{Bc}	1.03±0.07 ^{Bc}	4.91±0.11 ^{Ab}
15	CK	11.97±0.26 ^{Bd}	3.43±0.19 ^{Ad}	4.68±0.21 ^{Ad}	4.03±0.08 ^{Bd}
	HVEF	14.23±0.17 ^{Aab}	1.58±0.23 ^{Bd}	1.38±0.10 ^{Bd}	4.39±0.09 ^{Ac}
20	CK	11.03±0.23 ^{Bc}	3.94±0.11 ^{Ac}	7.52±0.39 ^{Ac}	3.41±0.08 ^{Bc}
	HVEF	13.16±0.19 ^{Ac}	2.43±0.12 ^{Bc}	2.65±0.19 ^{Bc}	4.16±0.09 ^{Ad}
25	CK	10.31±0.18 ^{Bf}	4.17±0.17 ^{Af}	8.01±0.17 ^{Af}	3.18±0.06 ^{Bf}
	HVEF	12.71±0.15 ^{Ad}	2.84±0.20 ^{Bf}	4.42±0.13 ^{Bf}	3.88±0.08 ^{Ac}
30	CK	/	/	/	/
	HVEF	11.28±0.14 ^e	3.49±0.21 ^g	7.32±0.12 ^g	3.59±0.19 ^f
35	CK	/	/	/	/
	HVEF	10.46±0.16 ^f	3.90±0.13 ^h	7.90±0.17 ^h	3.42±0.11 ^g

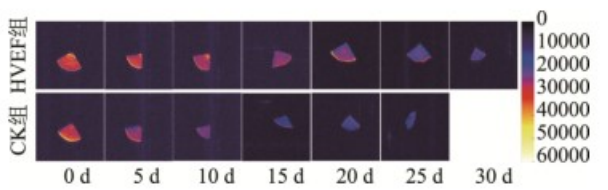
注: /表示 CK 组在 30 和 35 d 样品腐败无测量数据; 不同大写字母表示相同贮藏时间不同贮藏方式之间的差异显著, 不同小写字母表示相同贮藏方式不同贮藏时间之间的差异显著(P<0.05)。



注: *P<0.05, **P<0.01。
图 3 贮藏过程中莴笋各指标相关性系数
Fig.3 Correlation coefficient of each index of *Lectica sativa* L. during storage

2.5 贮藏期间 MRI 成像

MRI 成像是一种对食品基质内部结构的无损可视化技术, 目前已广泛应用于食品水分分布的研究^[24]。为了更直观地了解莴笋在贮藏过程中内部水分的变化情况, 对不同贮藏方式中的莴笋进行了 MRI 成像分析。图像经过伪彩处理后如图 4 所示, 图中越亮(越趋近于黄色)的区域表示氢质子密度信号越强, 该区域的水分越多, 反之(越趋近于蓝色), 则氢质子密度信号越弱, 该区域的水分越少^[25]。如图 4 所示, 莴笋在两组贮藏条件下, 氢质子密度信号强度



注: CK 组莴笋贮藏至 25 d 时达到终点。
图 4 莴笋贮藏期间(0、5、10、15、20、25、30 d) MRI 成像
Fig.4 MRI imaging of *Lectica sativa* L. during storage (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 d)

随着贮藏时间延长逐步降低, 说明莴笋在储存过程中水分在不断的丧失, 这可能是因为莴笋在贮藏期间的呼吸作用导致水分含量不断散失, 与莴笋的失重率趋势相符合。对比 CK 组和 HVEF 组, HVEF 下莴笋氢质子密度信号衰弱趋势明显低于 CK 组, 证明 HVEF 可以抑制莴笋水分的流失, 可能是由于果蔬体内的蛋白质等物质由于带有电荷性, 在 HVEF 处理下, 发生定向移动, 影响果蔬细胞内物质流动和能量分布, 可以抑制果蔬采后各类生物化学反应进程, 对莴笋水分保持具有积极作用^[26]。

2.6 贮藏期间挥发性气味变化及电子鼻无损检测研究

2.6.1 载荷分析

载荷分析(Loadings analysis)通过研究传感器在分析中的负荷变化, 判断各个传感器在分析中的重要程度^[27]。图 5 为不同新鲜度莴笋样品在电子鼻传感器中的

Loadings 图, 其中各点表示 10 个不同的传感器, 各点与坐标(0,0)的距离表示各传感器对样品区分的贡献率大小, 继而解释了在样品区分过程中起主要区分作用的挥发性物质类型^[28-29]。从图 5 中可以看出, 第一主成分贡献率为 88.97%, 第二主成分贡献率为 9.61%, 载荷分析的总贡献率为 98.58%, 达到了 97%以上, 基本可以代表莴笋样品的全部特征信息^[30]。利用电子鼻 PEN3 系统进行 Loadings 分析可以得出, 传感器 W1W(硫化物)的贡献率最大, 其次为 W1C(芳香成分)、W2W(芳香成分和有机硫化物)和 W2S(醇类)等, 而传感器 W6S、W1S、W5C 和 W3C 的坐标接近于 (0,0), 对载荷分析贡献率较低, 说明莴笋的挥发性成分中芳香成分含量最高, 并且在贮藏期间伴随醇类物质的产生, 可作为区分莴笋新鲜度的重要气味指标。

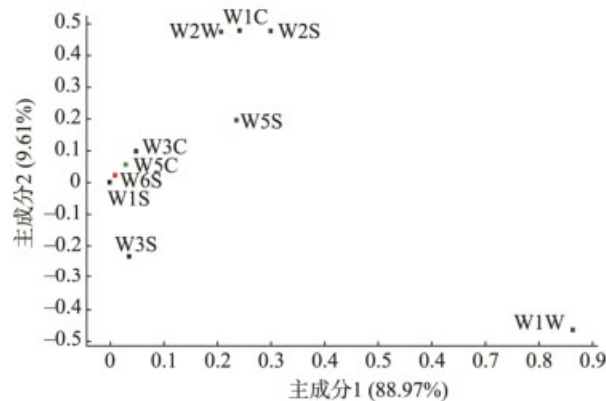


图 5 电子鼻传感器载荷分析
Fig.5 Loadings analysis of electronic nose sensor

2.6.2 电子鼻传感器响应分析

为探究基于挥发性特征风味的莴笋新鲜度分类快速无损检测, 对不同新鲜度莴笋进行了气味采集和传感器响应分析, 图 6 为电子鼻内各个传感器对不同新鲜度响应的雷达图指纹图谱, 运用雷达图可以将电子鼻多维数据进行二维图形的可视化分析^[31]; 图 7 则是在雷达图的基础上将不同新鲜度莴笋样品的电子鼻传感器响应值的对比进行更进一步分析的柱状图。由图 6、7 可知, 电子鼻 W1W、W2S、W1C 和 W2W 传感器对莴笋样品的响应较其他 5 种传感器更强, 不同新鲜度莴笋样品的挥发性气味物质主要以芳香类物质、醇类、有机硫化物和醇类为主, 且不同新鲜度莴笋之间存在明显差异。

2.6.3 主成分分析和线性判别分析

PCA 是一种降维统计方法, 可以直观地展示数据集包含的所有信息, 有助于发现样本差异所在^[32]。以 10 个传感器对不同新鲜度莴笋样品响应值的数据矩阵进行 PCA, 结果如图 8 所示, 第一主成分的贡献率为 88.97%, 第二主成分的贡献率为 9.61%, 累计总贡献率为 98.58%, 表明第一主成分和第二主成分可以代表莴笋样品的整体信

息特征, 模型拟合效果较好, 能够有效区分不同新鲜度的挥发性气味特征变化^[33]。由图 8 结果可知, 电子鼻可以清晰区分不同新鲜度的莴笋气味, 说明随着贮藏时间的延长, 莴笋挥发性气味发生了明显的变化, 进一步证明了电子鼻结合 PCA 分析能够区分不同新鲜度的莴笋样品。

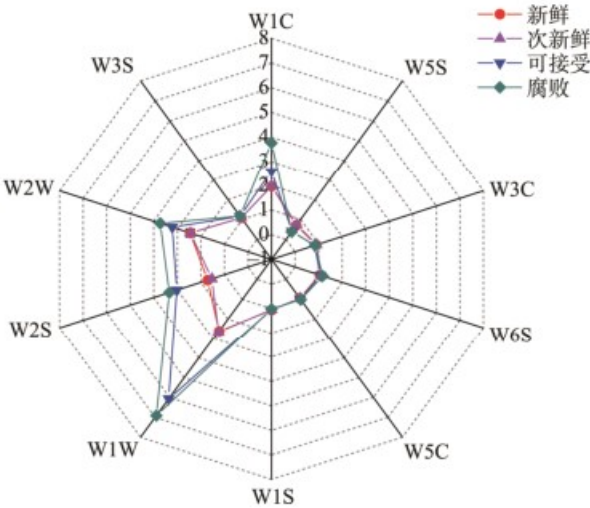
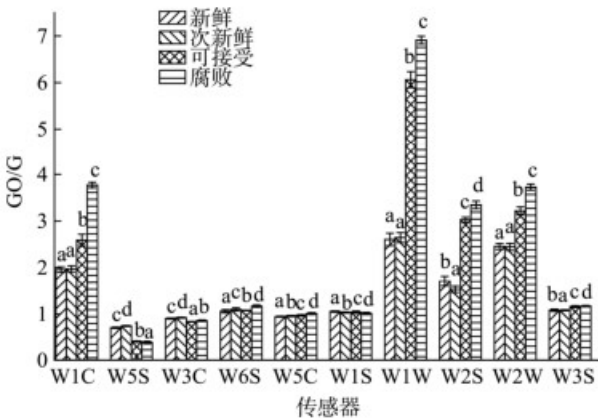


图 6 不同新鲜度莴笋的电子鼻传感器响应雷达图
Fig.6 Radar plot of electronic nose sensor response of *Lactuca sativa* L. at different freshness levels



注: GO/G 表示传感器响应值; 不同小写字母表示同一传感器对不同新鲜度莴笋的响应值具有显著性差异($P<0.05$)。

图 7 不同新鲜度莴笋的电子鼻传感器响应值柱状图

Fig.7 Histogram of electronic nose sensors response values of different fresh *Lactuca sativa* L.

LDA 是将高维度的样品信号数据投影到具有良好分类可区分性的低维空间, 使组间差异与组内差异之比最大化^[34]。图 9 为不同新鲜度莴笋样品的 LDA 图, 由于 LDA 使组内差异最小化, 因此较 PCA 具有更好的区分效果。图 9 中第一线性判别函数的贡献率为 56.14%, 第二线性判别函数的贡献率为 37.93%, 累计总贡献率高达 94.07%, 说明第一线性判别函数和第二线性判别函数能够代表莴笋样品的主要信息。由图 9 可知, 不同新鲜度莴笋样品的挥发性

气味通过 LDA 得到了很好的区分效果, 其中, 不同新鲜度莴笋样品之间距离较远, 电子鼻结合 LDA 分析能够区分不同新鲜度的莴笋样品, 且区分效果优于 PCA。

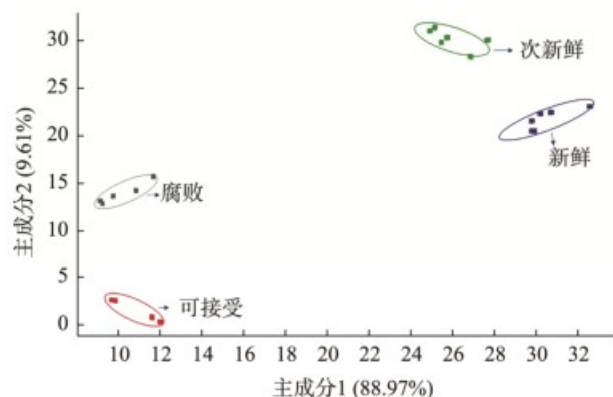


图8 不同新鲜度莴笋的 PCA 图

Fig.8 PCA diagram of different freshness of *Lactuca sativa* L.

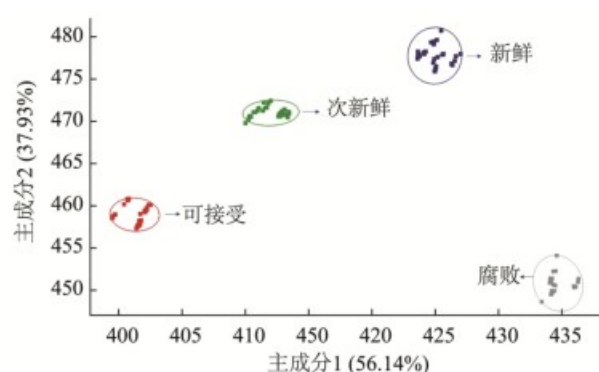


图9 不同新鲜度莴笋的 LDA 图

Fig.9 LDA diagram of different freshness of *Lactuca sativa* L.

3 结论

本研究得出, HVEF 协同低温冷藏保鲜可有效抑制莴笋在贮藏过程中的呼吸作用和降低呼吸峰值, 对莴笋的硬度、色泽、水分、叶绿素含量等贮藏品质的保持均具有积极作用, 可显著延长贮藏期; 贮藏过程中, 莴笋的芳香类物质、硫化物、醇类物质等挥发性风味发生了明显变化, 电子鼻结合 PCA 和 LDA 分析可以实现贮藏过程中莴笋新鲜度的快速无损鉴别。

参考文献

- [1] 戴国辉, 孙志栋, 吴海军, 等. 莴笋的营养保健价值及其加工开发[J]. 农产品加工(学刊), 2008, (11): 43-46.
- DAI GH, SUN ZD, WU HJ, *et al.* Nutrition health care value and processing development on lettuce [J]. Farm Prod Process, 2008, (11): 43-46.
- [2] 高愿军, 吴炜炜, 孟楠, 等. 护色剂对鲜切莴笋褐变的影响[J]. 食品与

机械, 2010, 26(4): 46-48.

GAO YJ, WU WW, MENG N, *et al.* Effect of color-preserving reagent on browning of fresh-cut lettuces [J]. Food Mach, 2010, 26(4): 46-48.

- [3] 郭奇亮, 张正周, 刘继, 等. 莴笋叶真空预冷效果研究[J]. 农业与技术, 2017, 37(9): 27-28.

GUO QL, ZHANG ZZ, LIU J, *et al.* Study on the effect of vacuum pre-cooling of lettuce leaves [J]. Agric Technol, 2017, 37(9): 27-28.

- [4] 董朝贤. 船用混合蔬菜的气调低温贮藏研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.

DONG CX. Study on atmosphere storage at low temperature of mixed vegetables for marine usage [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.

- [5] 陈秋妍. 静电场对去离子水和稀溶液冷冻过程的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.

CHEN QY. Effects of electrostatic field on freezing process of water and dilute solutions [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

- [6] 蒋耀庭. 果蔬食品静电场保鲜机理研究[J]. 农产品加工(学刊), 2011, (1): 65-67.

JIANG YT. Fresh mechanism of fruit and vegetables by high-voltage electrostatic field [J]. Farm Prod Process, 2011, (1): 65-67.

- [7] 蒋耀庭, 常秀莲, 李磊. 高压静电场处理对鲜切青花菜保鲜的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(12): 299-302.

JIANG YT, CHANG XL, LI L. Fresh-keeping effect of high electrostatic field on fresh-cut broccoli [J]. Food Sci, 2012, 33(12): 299-302.

- [8] 周成敏, 杨继, 周紫球, 等. 高压静电场处理对鲜切黄甜竹笋冷藏下品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 319-325.

ZHOU CM, YANG J, ZHOU ZQ, *et al.* Effects of high-voltage electrostatic field (HVEF) treatment on the quality of fresh-cut bamboo shoots (*Acidosasa edulis*) during cold storage [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(23): 319-325.

- [9] KAO NY, TU YF, SRIDHAR K, *et al.* Effect of a high voltage electrostatic field (HVEF) on the shelf-life of fresh-cut broccoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 116: 108532.

- [10] PALANIMUTHU V, RAJKUMAR P, ORSAT V, *et al.* Improving cranberry shelf-life using high voltage electric field treatment [J]. J Food Eng, 2009, 90(3): 365-371.

- [11] 丹阳. 高压静电场对番茄采后成熟、衰老过程的调控及其机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.

DAN Y. Effect of high voltage electrostatic field oil post harvest ripening and senescence of tomatoes and study oil its [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.

- [12] 李泽珍, 狄建兵, 郝利平. 热激处理对鲜切莴笋色泽和质地的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(10): 1955-1962.

LI ZZ, DI JB, HAO LP. Effect of heat-shock treatment on color and texture of fresh-cut *Asparagus lettuce* [J]. J Nucl Agric Sci, 2017, 31(10): 1955-1962.

- [13] 陈远涛, 熊忆舟, 薛莹莹, 等. 基于深度学习的电子鼻食品新鲜度检测与识别技术研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(8): 1131-1138.

CHEN YT, XIONG YZ, XUE YY, *et al.* Research on electronic nose food freshness detection and recognition technology based on deep learning [J]. Chin J Sens Actuators, 2021, 34(8): 1131-1138.

- [14] 田旭静. 壳聚糖涂膜处理对鲜切莴笋贮藏品质的影响[J]. 广东蚕业, 2022, 56(8): 54-56.

- TIAN XJ. Effect of chitosan-coated film treatment on storage quality of fresh-cut lettuce [J]. *Guangdong Seric*, 2022, 56(8): 54–56.
- [15] 毕秀芳, 谢玲, 刘晓翠, 等. 热烫处理对鲜切根茎菜品质的影响[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(4): 45–49.
- BI XF, XIE L, LIU XC, *et al.* Effect of blanching treatments on the quality of fresh-cut root vegetables [J]. *J Xihua Univ (Nat Sci Ed)*, 2019, 38(4): 45–49.
- [16] 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.
- CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press Ltd, 2007.
- [17] 李珊珊. 中等水分芒果果脯的研制与保藏研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- LI SS. Study on preparation and preservation of preserved mango with medium moisture [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [18] 叶春苗. 鲜切莴笋低温贮藏期间的品质变化[J]. *农业科技与装备*, 2016, (11): 54–55.
- YE CM. The change of the quality of fresh-cut *Asparagus lettuce* during the low-temperature storage [J]. *Agric Sci Technol Equip*, 2016, (11): 54–55.
- [19] 张敏欢, 王莉梅, 王治洲, 等. 静电场结合自发气调包装对马铃薯贮藏期间的保鲜效果[J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 269–275.
- ZHANG MH, WANG LM, WANG ZZ, *et al.* Electrostatic field combined with equilibrium modified atmosphere packaging for the preservation of potatoes [J]. *Food Sci*, 2019, 40(9): 269–275.
- [20] 陈庆. 高压静电场对采后绿芦笋生理特性影响的研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- CHEN Q. The research of high voltage electrostatic field treatment on physiological characteristics of the impact of post-harvest green asparagus [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [21] 孙贵宝, 李望. 高压静电场处理黄冠梨的贮藏保鲜试验[J]. *农机化研究*, 2009, 31(8): 166–167.
- SUN GB, LI Y. Research on storage and preservation of Huangguan pear with high voltage electrostatic field [J]. *J Agric Mech Res*, 2009, 31(8): 166–167.
- [22] KAO N, TU Y, SRIDHAR K, *et al.* Effect of a high voltage electrostatic field (HVEF) on the shelf-life of fresh-cut broccoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) [J]. *LWT*, 2019, 116: 108532.
- [23] 丁艳. 预冷时间对生鲜农产品贮藏品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(5): 131–136.
- DING Y. Effect of different precooling time on storage quality of fresh agricultural products [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2019, 35(5): 131–136.
- [24] GIUSEPPINA A, GERARDO I, PAOLA R, *et al.* Moisture migration by magnetic resonance imaging during eggplant drying: A preliminary study [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2014, 49(12): 2602–2609.
- [25] 赵波. 高端刺身鱼储藏加工及待售过程的质量安全分析与控制[D]. 成都: 西华大学, 2021.
- ZHAO B. Analysis and control of quality and safety of high-end sashimi during storage, processing, and the process for sale [D]. Chengdu: Xihua University, 2021.
- [26] 戴瀚斌. 鲜切桃品种筛选及高压静电场保鲜技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- DAI HC. Study on selection of fresh-cut peach varieties and fresh-keeping technology in high voltage electrostatic field [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2021.
- [27] 周亦斌. 基于电子鼻的西红柿与黄酒的检测与评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- ZHOU YB. Inspection and evaluation of tomato and rice wine by the electronic nose [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [28] 郑开迪, 梁杉, 张敏, 等. 添加马铃薯全粉对面条挥发性风味化合物的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(6): 239–245.
- ZHENG KD, LIANG B, ZHANG M, *et al.* Effects of potato flour on volatile flavor compounds in noodles [J]. *Food Sci*, 2020, 41(6): 239–245.
- [29] 张婷婷, 赵宾, 杨丽明, 等. 基于电子鼻技术的小麦种子活力鉴别[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(9): 123–130.
- ZHANG TT, ZHAO B, YANG LM, *et al.* Determination of wheat seeds vigor based on electronic nose [J]. *J Chin Agric Univ*, 2018, 23(9): 123–130.
- [30] 薛友林, 董立超, 张鹏, 等. 电子鼻结合 GC-MS 分析不同处理蓝莓货架期间果实的挥发性成分[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(19): 297–303.
- XUE YL, DONG LC, ZHANG P, *et al.* Analysis of the volatile components of blueberry fruits with different treatments during shelf life by GC-MS combined with electronic nose [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(19): 297–303.
- [31] TRIRONGJITMOAH S, JUENG MUNKONG Z, SRIKULNATH K, *et al.* Classification of garlic cultivars using an electronic nose [J]. *Comp Electron Agric*, 2015, 113: 148–153.
- [32] HUICHUN Y, YONGWEI W, JUN W. Identification of tea storage times by linear discrimination analysis and back-propagation neural network techniques based on the eigenvalues of principal components analysis of E-nose sensor signals [J]. *Sensors*, 2009, 9(10): 8073–8082.
- [33] 崔方超, 李婷婷, 杨兵, 等. 电子鼻结合 GC-MS 分析草脱腥前后风味变化[J]. *食品科学*, 2014, 35(20): 126–130.
- CUI FC, LI TT, YANG B, *et al.* Flavor compounds of fresh and deodorized grass carps as determined by electronic nose combined with GC-MS [J]. *Food Sci*, 2014, 35(20): 126–130.
- [34] RAD I, CIPTOHADIJOYO S, LITANANDA WS, *et al.* Electronic nose based on partition column integrated with a gas sensor for fruit identification and classification [J]. *Comp Electron Agric*, 2016, 121: 429–435.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



杨泽鹏, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: 408911143@qq.com



唐 勇, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: jacktangy@gamil.com