

基于电子鼻检测鸭梨新鲜度及损伤程度

任紫烟^{1,2}, 程玉豆¹, 关晔晴¹, 杨相政², 关军锋^{1*}

(1. 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 石家庄 050051;

2. 中华全国供销合作总社济南果品研究院, 济南 250014)

摘 要: 目的 探究鸭梨果实流通过程中新鲜度变化及损伤程度。**方法** 以不同跌落角度处理(0°、20°、40°、60°)的鸭梨为试材, 测定鸭梨果实呼吸速率、乙烯释放速率的变化, 同时利用电子鼻结合主成分分析(principal components analysis, PCA)、线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)和载荷分析(loading analysis, LA)研究不同贮藏时间和不同损伤程度下果实的挥发性气体变化。**结果** 完好果实贮藏 4 d 时出现呼吸高峰和乙烯释放高峰; 与完好果实相比, 机械伤处理提高了呼吸速率和乙烯释放速率, 并且损伤越严重, 变化趋势越明显。LDA 对不同贮藏点和不同损伤程度鸭梨的区分效果优于 PCA。LA 结果表明当果实成熟和受损时, 传感器 W1S、W5S、W1W、W2W、W2S 变化较为明显, 意味着刺激了甲烷、氮氧化物、有机硫化物和芳香族化合物、醇类物质的生成。**结论** 传感器 W1S、W5S、W1W、W2W、W2S 可反映鸭梨的挥发性气体变化情况, 其中 W2S 传感器响应值可区分果实损伤程度, 这对于实时监测果实品质具有重要意义。

关键词: 鸭梨; 机械损伤; 电子鼻; 挥发性气体

Detection of freshness and damage degree of *Pyrus bretschneideri* Rehd. based on electronic nose

REN Zi-Yan^{1,2}, CHENG Yu-Dou¹, GUAN Ye-Qing¹, YANG Xiang-Zheng², GUAN Jun-Feng^{1*}

(1. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 2. Jinan Fruit Research Institute, China Supply and Marketing Cooperatives, Jinan 250014, China)

ABSTRACT: Objective To study the change of freshness and damage degree of *Pyrus bretschneideri* Rehd. during the circulation. **Methods** *Pyrus bretschneideri* Rehd. with different damaged treatments (drop angle as 0°, 20°, 40° and 60°) was used as the material to measure the changes of respiration and ethylene release rates. At the same time, the electronic nose combined with principal components analysis (PCA), linear discriminant analysis (LDA) and loading analysis (LA) were used to study the changes of volatile gases in fruits under different storage times and different degrees of damage. **Results** Peaks of the respiration and ethylene release rates were found at the fourth day of storage in intact (undamaged) fruit. The respiration and ethylene release rates increased greatly in damaged fruit, and change trends showed more obvious with damaged more seriously. LDA was better than PCA in distinguishing pears at different storage points and different degrees of damage. The results of LA showed that the

基金项目: 国家财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-28-23)

Fund: Supported by the National Modern Agricultural Industrial Technology System Project of National Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Affairs (CARS-28-23)

***通信作者:** 关军锋, 博士, 研究员, 主要研究方向为果实品质生物学。E-mail: junfeng-guan@263.net

***Corresponding author:** GUAN Jun-Feng, Ph.D, Professor, Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China. E-mail: junfeng-guan@263.net

response values of sensors, such as W1S, W5S, W1W, W2W and W2S, were changed significantly, indicating to stimulate the production of methane, nitrogen oxides, organosulfides and aromatic compounds, alcohols. **Conclusion** The electronic nose sensors W1S, W5S, W1W, W2W and W2S can detect the change of volatile gas of *Pyrus bretschneideri* Rehd.. Among them, the response value of W2S sensor can determine damage degree of the fruit, which is of great significance for timely monitoring quality of fruit.

KEY WORDS: *Pyrus bretschneideri* Rehd.; mechanical damage; electric nose; volatile gas

0 引言

鸭梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.cv.Yali)含有丰富的维生素 B、C 和钙、铁、磷等矿物质,具有生津止渴、清心润肺、止咳平喘、醒酒解毒等功效。此外,丰富的酚类物质对防治与自由基损伤相关的疾病及抗衰老有重要作用^[1-2]。鸭梨在采后流通过程中,通常包装在瓦楞纸箱或塑料容器内,并被纸袋或泡沫网袋等包装材料包裹,难以通过目测检测其新鲜度以及是否受损。采后分选虽然剔除了一部分劣果,但由于梨果实肉质酥脆,含水量高,一方面在贮藏期间容易因自身生理代谢失水皱缩,新鲜度下降;另一方面在之后的流通过程中仍存在遭受碰撞、挤压等机械伤害的可能^[3]。鸭梨是跃变型果实,一旦带入贮藏状态,机械伤会加速果实乙烯的产生,呼吸作用的增强,诱发果实进行“伤乙烯”“伤呼吸”,果实生理代谢异常,进而导致挥发性成分发生改变,果实品质下降,加速果实衰老、腐烂,甚至影响整批果实商品品质,造成巨大的经济损失^[4]。

电子鼻(electric nose)是通过特定的传感器和模式识别系统对样品挥发性气味的整体响应,具有简单、快速,可以对样品进行无损分析和自动收集数据等优点^[5],且在水果方面的应用主要包括品种鉴别、采收期及货架期判断、病害识别、新鲜度、成熟度及腐烂度的检测^[6-10]。已有研究表明,电子鼻技术在苹果^[11]、橙^[12]、草莓^[13]新鲜度判别和番石榴^[14]、桃^[15]、草莓^[16]等果实机械伤检测方面均有应用。目前,在梨果实方面,已有涉及贮藏保鲜^[17-18]、腐败程度^[19]的研究,但在鸭梨新鲜度及机械损伤方面的研究还鲜有报道。因此,为了快速掌握流通过程中的果实品质,本研究以鸭梨为试验对象,应用电子鼻监测不同贮藏时间及不同损伤程度果实的挥发性气体变化情况,通过主成分分析(principal components analysis, PCA)、线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)、载荷分析(loading analysis, LA)等方法,探讨基于电子鼻判别鸭梨新鲜度及损伤程度的可行性,并确定对鸭梨果实损伤敏感的特征传感器,以期对鸭梨采后品质评估提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与处理

鸭梨采自河北省晋州市一生产管理良好的果园,采后迅速运回河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所实验室。挑选大小均匀一致,且无病虫害和机械伤的果实作为实验材料。次日,利用单摆碰撞装置^[20],对鸭梨进行不同程度机械伤(跌落角度: 20°、40°、60°)处理,分别记为轻度损伤(G1)、中度损伤(G2)、重度损伤(G3),以不经机械伤碰撞的鸭梨作为对照,记为完好果实(G0)。当日所有处理的果实放置 2 h 后进行相关指标检测;对 G0 果实每隔 2 d 测定一次。每组 12 个果实,重复 3 次,于室温(20℃)条件下贮藏。

1.1.2 仪器与设备

HWF-1A 型 CO₂ 红外分析仪(江苏金坛市科析仪器有限公司); GC 9790 IIB 气相色谱仪(浙江福立色谱仪器有限公司); PEN3 型便携式电子鼻(德国 Airsense 公司)。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 呼吸速率和乙烯释放速率测定

根据文献^[21-22]分别测定果实呼吸速率和乙烯释放速率。

1.2.2 电子鼻分析

根据文献^[23]并修改。

将果实置于干燥器中密封 3 h,用电子鼻探头测定挥发性物质。电子鼻检测参数设置为:样品间隔时间 1 s,清洗时间 200 s,归零时间 5 s,样品准备时间 5 s,测试时间 150 s,载气流速 400 mL/min,进样流量 400 mL/min,选定 145 s 时的响应值进行数据分析。PEN3 型电子鼻的 10 个传感器敏感物质说明见表 1^[19]。

1.2.3 数据处理与分析

采用 Excel、GraphPad Prism 8 进行数据整理及制图,并用 GraphPad Prism 8 对所得数据进行差异显著性分析;使用 Minitab 19、SPSS 18.0、Win Muster 软件分别对 PCA、LDA、LA 进行处理和绘图。

表 1 PEN3 型电子鼻各传感器响应特征	
Table 1 Sensors response characteristics in electronic nose PEN3	
名称	传感器响应特征
W1C	对芳香族化合物敏感
W5S	对氮氧化物敏感
W3C	对氨类、芳香族化合物敏感
W6S	对氢气敏感
W5C	对烷烃、芳香族化合物敏感
W1S	对甲烷敏感
W1W	对硫化物和萜烯类敏感
W2S	对醇类和部分芳香族化合物敏感
W2W	对有机硫化物和芳香族化合物敏感
W3S	对烷烃敏感

2 结果与分析

2.1 呼吸速率和乙烯释放速率的变化

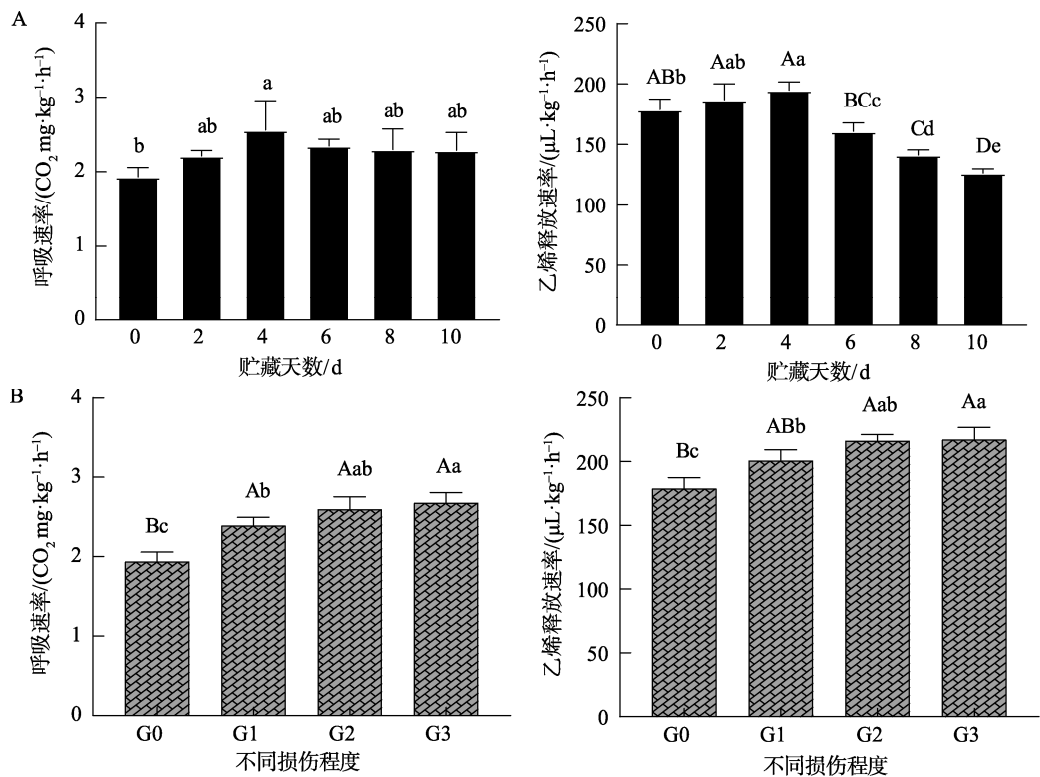
呼吸速率和乙烯释放速率是影响果实贮藏品质及香气变化的重要因素。在整个贮藏期间,鸭梨呼吸速率和乙烯释放速率均呈先上升后下降的趋势(图 1A)。贮藏至第 4 d 时,果实出现呼吸高峰和乙烯释放高峰,峰值分别为 2.56 CO₂·mg·kg⁻¹·h⁻¹、194.80 μL·kg⁻¹·h⁻¹,显著高于初始值($P<0.05$)。高峰过后,呼吸速率和乙烯释放速率快速下降。至贮藏结束,呼吸速率、乙烯

释放速率分别为 2.29 CO₂·mg·kg⁻¹·h⁻¹、126.54 μL·kg⁻¹·h⁻¹,是初始值的 1.18、0.71 倍。

图 1B 显示,鸭梨经损伤处理后,呼吸速率和乙烯释放速率明显升高,且损伤程度越大,上述变化趋势越明显。G1、G2、G3 组呼吸速率为 2.39、2.59、2.68 CO₂·mg·kg⁻¹·h⁻¹,极显著高于 G0 ($P<0.01$); G0、G1、G2、G3 乙烯释放速率为 178.92、200.68、216.23、217.08 μL·kg⁻¹·h⁻¹,其中 G1 与 G0 差异显著($P<0.05$),G2、G3 与 G0 差异极显著($P<0.01$)。这与蜜柚^[24]、富士苹果^[25]、砀山酥梨^[26]和哈密瓜^[27]损伤处理对呼吸强度和乙烯释放量的影响结果类似。

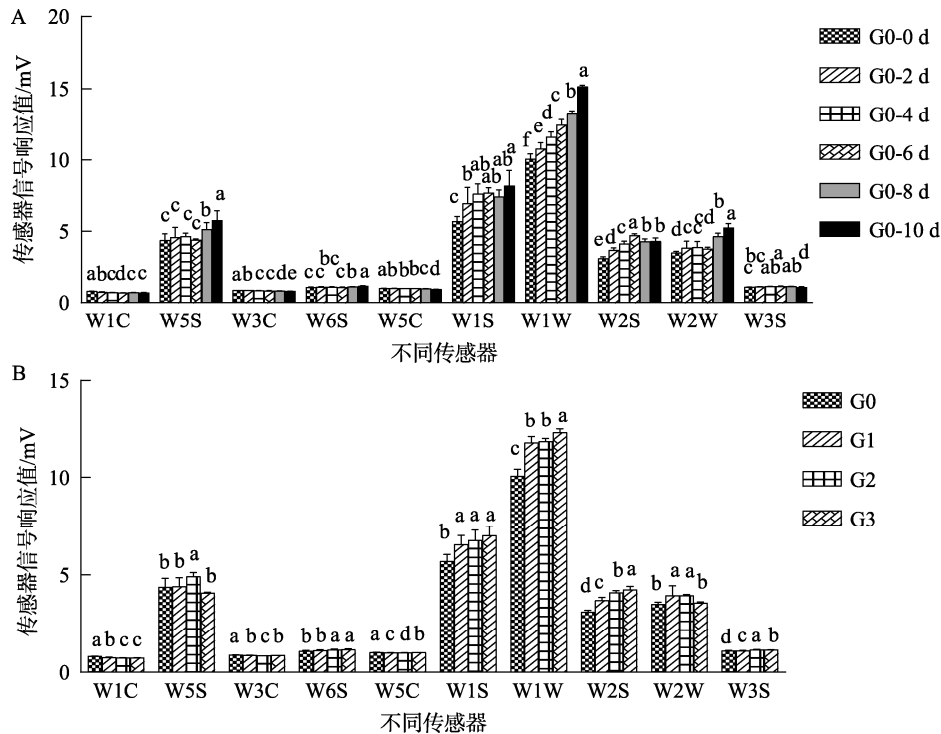
2.2 各传感器响应值变化

鸭梨果实不同贮藏时间和不同损伤程度的挥发性气体响应值如图 2 所示。两者整体变化趋势相同,传感器 W5S、W1S、W1W、W2S 和 W2W 响应值较其他传感器大,对鸭梨挥发性气体贡献率较大。与贮藏初期(G0-0 d)的响应值相比,随着贮藏时间的延长,完好果实 W5S、W1S、W1W、W2S 和 W2W 响应值均有不同程度的增加,贮藏期间(2~10 d) W1S、W1W、W2S 响应值均显著高于初始值($P<0.05$),而 W5S、W2W 检测结果显示,贮藏后期(8~10 d)的响应值与初始值呈显著差异($P<0.05$)。说明利用电子鼻检测贮藏期间鸭梨香气的变化具有可行性。



注: A: 完好果实(G0); B: 不同损伤程度(G0、G1、G2、G3)果实; 不同小写字母表示显著水平 $P<0.05$; 不同大写字母表示极显著水平 $P<0.01$, 下同。

图 1 不同处理鸭梨果实呼吸速率和乙烯释放速率变化($n=3$)
Fig.1 Changes of respiration rates and ethylene release rates of *Pyrus bretschneideri* Rehd. fruit with different treatments ($n=3$)



注: A: 完好果实(G0); B: 不同损伤程度(G0、G1、G2、G3)果实。

图2 鸭梨果实挥发性气体传感器信号响应值变化(n=3)

Fig.2 Changes of sensors signal response value of volatile gas in *Pyrus bretschneideri* Rehd. fruit (n=3)

随着损伤程度的提高,轻度损伤(G1)时 W5S、W1S、W1W、W2S 和 W2W 响应值分别是 G0 响应值的 1.01、1.15、1.17、1.19、1.13 倍,中度损伤(G2)是 G1 响应值的 1.12、1.03、1.01、1.11、1.00 倍,重度损伤(G3)是 G2 响应值的 0.83、1.04、1.04、1.04、0.90 倍。其中, W1S、W1W、W2S 检测结果显示,损伤越严重的鸭梨(G1、G2、G3),其响应值与完好果实(G0)差异越显著($P<0.05$),而 W5S、W2W 检测结果显示, G2 处理的鸭梨其响应值与 G0 呈显著差异($P<0.05$)。说明利用电子鼻检测机械损伤对鸭梨挥发性气体的改变具有可行性。

2.3 主成分分析

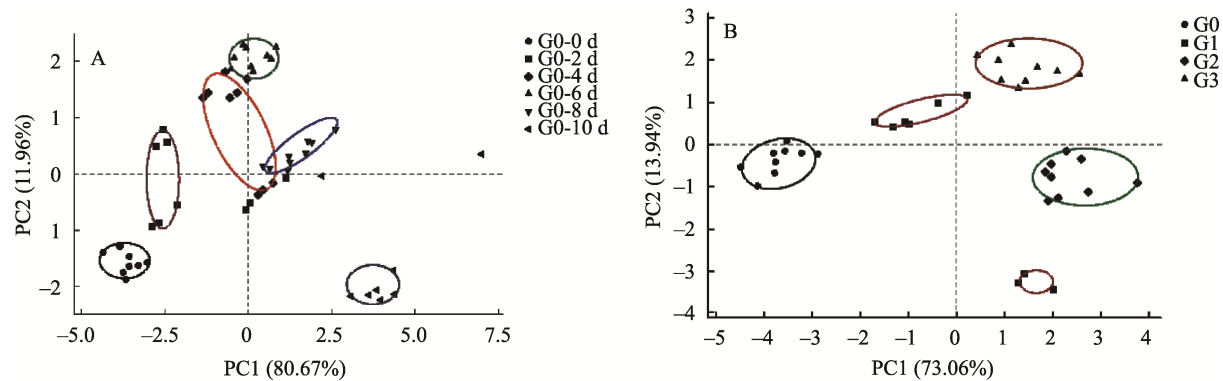
PCA 作为考察多个变量间相关性的方法,其贡献率越大,表明主成分可以更好地反映原始数据信息^[28]。图 3A 显示了电子鼻结合 PCA 对贮藏期间鸭梨挥发性物质变化的区分,第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的贡献率分别为 80.67%和 11.96%,两个主成分可以解释整体变异的 92.63%,基本代表样品的所有信息。图中仅贮藏 4 d 和 8 d 的分布区域略有重叠,其他贮藏点均能完全分开。贮藏 4 d 较 2 d 时在 PC1 方向上发生明显右移,且与贮藏 6、8 d 距离较近,结合呼吸速率和乙烯释放速率的变化可知,这是由于果实达到呼吸高峰和乙烯释放高峰,挥发性物质积累。贮藏 10 d 的数据点明显偏离其他时间点,这是由于果实进一步成熟衰老导致挥发性气体变得浓郁、复杂。HUI

等^[11]采用电子鼻结合 PCA 分析可以将贮藏期间不同新鲜程度(新鲜、次新鲜、衰老)的富士苹果进行区分。本结果显示,电子鼻能对常温贮藏中鸭梨香气的变化进行区分。

图 3B 显示了电子鼻结合 PCA 对不同损伤程度鸭梨挥发性物质变化的区分,PC1 和 PC2 贡献率分别为 73.06%和 13.94%,总贡献率 87.00%。G0、G1、G2 和 G3 挥发性气体分布区域彼此相互独立,无交叉重叠,说明损伤程度改变时,鸭梨果实挥发性气体发生了明显变化,且损伤鸭梨分布区域明显偏离完好鸭梨,损伤程度越大,在 PC1 和 PC2 正方向上值越大。电子鼻可以对不同损伤程度鸭梨挥发性气体的变化进行区分。

2.4 线性判别分析

LDA 更加关注样本在空间中的分布情况,以及他们之间的距离分析,样本信息通过运算法则投影到某个方向,以使各组之间的投影尽可能地分开^[29]。图 4A 显示了电子鼻结合 LDA 对贮藏期间鸭梨挥发性物质变化的区分,第一线性判别因子(LD1)和第二线性判别因子(LD2)的贡献率分别为 65.86%和 17.68%,总贡献率为 83.54%。相较于 PCA 中 4 d 和 8 d 的分布区域略有重叠, LDA 能将不同贮藏点完全分开。有研究采用电子鼻结合 LDA 检测雪青梨贮藏期间气味变化,实现了对不同贮藏点的区分^[17]。这进一步说明,电子鼻结合 LDA 分析可以评价梨果实贮藏期间挥发性气体的变化。



注: A: 完好果实(G0); B: 不同损伤程度(G0、G1、G2、G3)果实。

图 3 不同处理鸭梨的挥发性气体 PCA 分析

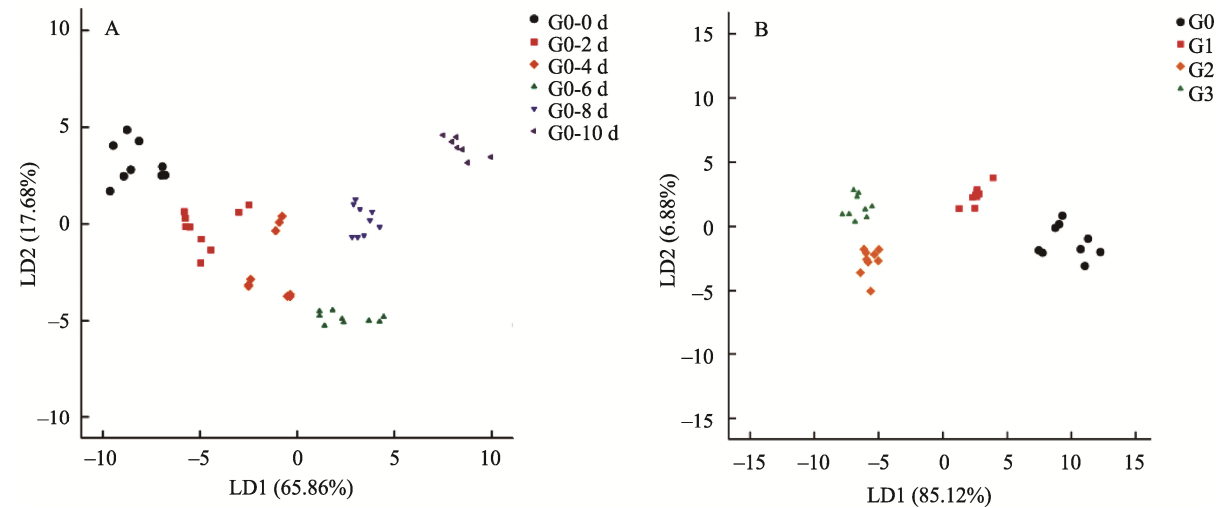
Fig.3 PCA analysis of volatile gas in *Pyrus bretschneideri* Rehd. fruit with different treatments

图4B显示了电子鼻结合LDA对不同损伤程度鸭梨挥发性物质变化的区分, LD1 和 LD2 贡献率分别为 85.12%和 6.88%, 总贡献率 92.00%。LDA 能将不同损伤程度的鸭梨完全分开。李莹^[30]利用电子鼻结合 LDA 可以实现对苹果不同损伤程度分级。相较于 PCA 分析, 各处理分布区域更为集中, LDA 区分效果优于 PCA。徐赛等^[14]在番石榴损伤试验和程绍明等^[31]在番茄苗损伤实验中也得到一致结论: 电子鼻结合 PCA、LDA 判别机械损伤时, LDA 优于 PCA。

2.5 载荷分析

由图 5 可知, 10 个传感器对梨果实气味响应不一, 在区分鸭梨不同贮藏点和不同损伤程度(G0、G1、G2、G3)的挥发性气体时, W1S、W5S、W1W、W2W 和 W2S 传感器距离原点较远, 是区别挥发性气体变化的敏感传感器。

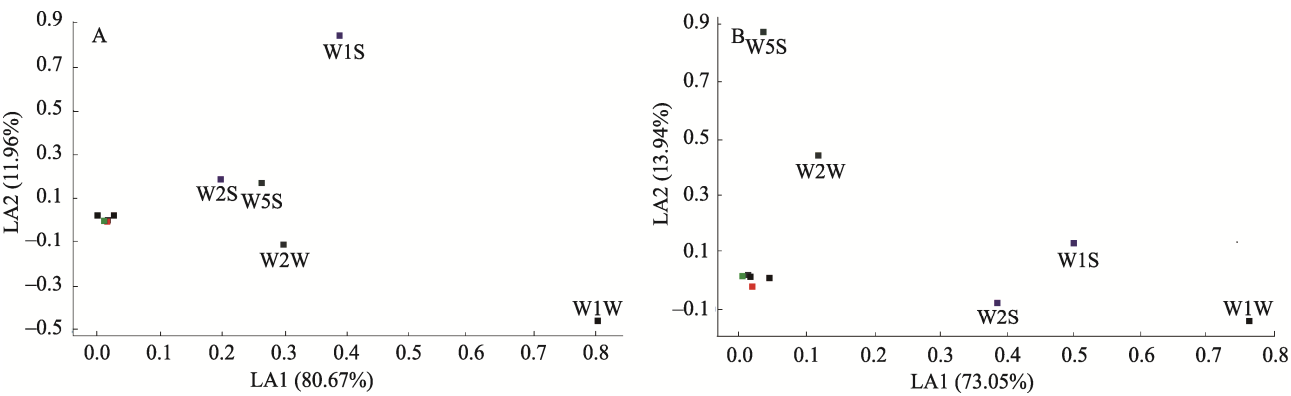
推断鸭梨在成熟衰老和受损时, 产生了较多的烷烃、氮氧化物、硫化物、乙醇类、萜烯类和芳香族化合物。冯蕾^[32]基于电子鼻研究樱桃番茄贮藏期间风味变化, 得到硫化物、萜类、酯类、醇类、氮氧化合物是主要敏感化合物, 这与本研究结果较一致。其中, W1S、W1W 为贡献率最大的传感器, 说明随着鸭梨受损和新鲜度的下降, 甲烷(W1S)、硫化物和萜烯类物质(W1W)含量变化显著。但两者在传感器贡献率略有差别, 相较于图 5A, 不同损伤程度果实中 W1S、W2S 特征值沿 PC1 正向移动, W2W、W5S 特征值沿 PC2 正向移动, 说明果实受损可能刺激了甲烷、醇类、芳香族化合物、氮氧化合物和有机硫化物的生成, 也进一步说明果实受损后与果实正常成熟衰老的挥发性物质在成分及含量上有所区别。



注: A: 完好果实(G0); B: 不同损伤程度(G0、G1、G2、G3)果实。

图 4 不同处理鸭梨的挥发性气体 LDA 分析

Fig.4 LDA of volatile gas in *Pyrus bretschneideri* Rehd. fruit with different treatments



注: A: 完好果实(G0); B: 不同损伤程度(G0、G1、G2、G3)果实。

图 5 传感器响应信号值的载荷分析

Fig.5 Loadings analysis of sensors signal response value

2.6 鸭梨损伤程度与传感器响应值相关性分析

为衡量损伤鸭梨挥发性气体各传感器响应值与损伤程度的关系, 对其进行相关性分析(见表 2)。由表可知, 除 W5S、W5C 和 W2W 传感器响应值与损伤程度关系不显著外, 其他传感器与损伤程度均有较好的相关性, 且相关系数均极显著。其中, W2S 传感器响应值与损伤程度相关性最大, 相关系数为 0.930, 其次为 W1C、W1W、W3S、W1S、W6S、W3C,

相关系数分别为-0.886、0.853、0.852、0.706、0.657、-0.637。结合 LA 可知, W1S、W5S、W1W、W2W 和 W2S 为区分不同损伤程度鸭梨的敏感传感器。因此, 可以选择与损伤程度相关性最高的传感器 W2S 作为判断鸭梨损伤程度的特征传感器。朱娜等^[15]对桃果实瘀伤的研究试验中发现 W5C、W1W、W2W 和 W3S 是其特征传感器。这说明水果种类或品种不同, 受损后释放的挥发性物质组成与含量可能存在差异。

表 2 不同损伤程度鸭梨果实挥发性物质传感器响应值相关性分析

Table 2 Correlation analysis of sensor response value of volatile gas in <i>Pyrus bretschneideri</i> Rehd.fruit with different damage degrees											
	W1C	W5S	W3C	W6S	W5C	W1S	W1W	W2S	W2W	W3S	G
W1C	1.000										
W5S	-0.147	1.000									
W3C	0.879**	-0.462**	1.000								
W6S	-0.552**	-0.192	-0.357*	1.000							
W5C	0.597**	-0.530**	0.874**	-0.228	1.000						
W1S	-0.837**	0.125	-0.719**	0.443**	-0.462**	1.000					
W1W	-0.894**	0.024	-0.776**	0.482**	-0.541**	0.701**	1.000				
W2S	-0.984**	0.027	-0.791**	0.598**	-0.467**	0.849**	0.878**	1.000			
W2W	-0.360*	0.612**	-0.720**	-0.141	-0.880**	0.297	0.428**	0.211	1.000		
W3S	-0.847**	0.312	-0.748**	0.546**	-0.481**	0.621**	0.676**	0.843**	0.195	1.000	
G	-0.886**	-0.097	-0.637**	0.657**	-0.311	0.706**	0.853**	0.930**	0.060	0.852**	1.000

注: G: 损伤程度; *: 有显著性差异 $P<0.05$; **: 有极显著性差异 $P<0.01$ 。

3 结 论

本研究以鸭梨为试材, 应用电子鼻探究常温贮藏下

鸭梨果实挥发性气体的变化, 并利用 PCA、LDA 对不同贮藏点和损伤程度的鸭梨进行区分。结果显示气味响应值的变化主要集中于传感器 W5S、W1S、W1W、W2S 和

W2W, 其中 W2S 可作为检测鸭梨损伤程度的敏感传感器。电子鼻结合 PCA、LDA 能对鸭梨不同贮藏期和损伤程度进行区分, 且 LDA 更适用于电子鼻检测鸭梨贮藏期挥发性气体变化的数据分析。这对鸭梨贮藏过程中品质监测具有重要意义, 下一步需要建立鸭梨贮藏时间和损伤程度的预测模型并应用。

参考文献

- [1] 关玉婷, 李唯熙, 温思萌, 等. 鸭梨功能性成分及食品开发研究进展[J]. 农产品加工, 2021, (6): 59–62.
GUAN YT, LI WX, WEN SM, *et al.* Research progress on functional ingredients and food development of Ya pear [J]. Farm Prod Process, 2021, (6): 59–62.
- [2] 李政红. 梨果褐变机理研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2016.
LI ZH. Study on the mechanism of browning of pear [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2016.
- [3] ALIASGARIAN S, GHASSEMZADEH HR, MOGHADDAM M, *et al.* Mechanical damage of strawberry during harvest and postharvest operations [J]. Acta Technol Agric, 2015, 18(1): 1–5.
- [4] 吴主莲. 不同类型, 不同品种苹果机械伤研究及壳聚糖对机械伤苹果的生理效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
WU ZL. Research on mechanical damage of different types and varieties on apple and the effects of chitosan on damage fruit [D]. Yanglin: Northwest Agriculture & Forestry University, 2012.
- [5] 任二芳, 牛德宝, 温立香, 等. 电子鼻和电子舌在水果检测中的应用进展[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 261–264.
REN ERF, NIU DB, WEN LX, *et al.* Application research progress of electronic nose and electronic tongue in fruits detection [J]. Food Ind, 2019, 40(10): 261–264.
- [6] 刘妍, 周新奇, 俞晓峰, 等. 无损检测技术在果蔬品质检测中的应用研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 27–37.
LIU Y, ZHOU XQ, YU XF, *et al.* Research progress of nondestructive testing techniques for fruit and vegetable quality [J]. J Zhejiang Univ (Agric Life Sci Ed), 2020, 46(1): 27–37.
- [7] DOU TX, SHI JF, LI Y, *et al.* Influence of harvest season on volatile aroma constituents of two banana cultivars by electronic nose and HS-SPME coupled with GC-MS [J]. Sci Hortic, 2020, 265: 109214.
- [8] JIA WS, LIANG G, TIAN H, *et al.* Electronic nose-based technique for rapid detection and recognition of moldy apples [J]. Sensors, 2019, 19(7): s19071526.
- [9] WEI X, ZHANG YC, WU D, *et al.* Rapid and non-destructive detection of decay in peach fruit at the cold environment using a self-developed handheld electronic-nose system [J]. Food Anal Methods, 2018, 11(11): 2990–3004.
- [10] LIU Q, ZHAO N, ZHOU DD, *et al.* Discrimination and growth tracking of fungi contamination in peaches using electronic nose [J]. Food Chem, 2018, 262: 226–234.
- [11] HUI GH, WU YL, YE DD, *et al.* Fuji apple storage time predictive method using electronic nose [J]. Food Anal Methods, 2012, 6(1): 82–88.
- [12] NATALE CD, MACAGNANO A, MARTINELLI E, *et al.* The evaluation of quality of post-harvest oranges and apples by means of an electronic nose [J]. Sens Actuators B, 2001, 78(1): 26–31.
- [13] 张雨辰. 基于挥发物无损测量技术的草莓新鲜度及机械伤快速检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
ZHANG YC. Rapid determination of freshness and mechanical damage of strawberry based on nondestructive volatile compound detection techniques [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [14] 徐赛, 陆华忠, 周志艳, 等. 基于高光谱与电子鼻融合的番石榴机械损伤识别方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 214–219.
XU S, LU HZ, ZHOU ZY, *et al.* Identification for Guava mechanical damage based on combined hyper-spectrometer and electronic nose [J]. J Agric Mach, 2015, 46(7): 214–219.
- [15] 朱娜, 潘磊庆, 毛淑波, 等. 基于电子鼻判别桃果实瘀伤的研究[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(1): 137–141.
ZHU N, PAN LQ, MAO SB, *et al.* Non-destructive detection of peach fruit bruise by electronic nose [J]. J Nanjing Agric Univ, 2013, 36(1): 137–141.
- [16] 邢梦珂, 孙柯, 赵楠, 等. 基于电子鼻技术的草莓损伤检测系统的开发[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(3): 555–561.
XING MK, SUN K, ZHAO N, *et al.* Development of an electronic nose system to detect strawberry bruise [J]. J Nanjing Agric Univ, 2018, 41(3): 555–561.
- [17] 岳盈肖, 何近刚, 赵江丽, 等. 窖藏和冷藏条件下鸭梨挥发性物质及其相关基因表达分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(21): 4635–4649.
YUE YX, HE JG, ZHAO JL, *et al.* Comparison analysis on volatile compound and related gene expression in Yali pear during cellar and cold storage condition [J]. Sci Agric Sin, 2021, 54(21): 4635–4649.
- [18] 闫子茹, 岳盈肖, 赵江丽, 等. 基于电子鼻分析 1-MCP 对“香红”梨后熟进程的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 271–281.
YAN ZR, YUE YX, ZHAO JL, *et al.* Effect of 1-MCP on the ripening process of ‘Xianghong’ pears based on the electronic nose analysis [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(4): 271–281.
- [19] 闫子茹, 张阳, 高聪聪, 等. 基于电子鼻检测香红梨腐烂程度[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4529–4535.
YAN ZR, ZHANG Y, GAO CC, *et al.* Detection of decay degree of Xianghong pear based on electronic nose [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(11): 4529–4535.
- [20] KOMARNICKI P, STOPA R, SZYJEWICZ D, *et al.* Evaluation of bruise resistance of pears to impact load [J]. Postharvest Biol Technol, 2016, 114: 36–44.
- [21] 冯云霄, 何近刚, 程玉豆, 等. 1-MCP 处理对早熟苹果常温贮藏生理及品质的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(12): 130–136.
FENG YX, HE JG, CHENG YD, *et al.* Effects of 1-MCP treatment on the physiology and quality of early-maturing apples stored at ambient temperature [J]. Mod Food Sci Technol, 2019, 35(12): 130–136.
- [22] BISWAS P, EAST AR, BRECHT JK, *et al.* Intermittent warming during low temperature storage reduces tomato chilling injury [J]. Postharvest Biol Technol, 2012, 74(4): 71–78.
- [23] 岳盈肖, 闫子茹, 赵江丽, 等. 利用电子鼻解析采后深州蜜桃品质变化[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(8): 101–108.
YUE YX, YAN ZR, ZHAO JL, *et al.* Analysis on quality changes of postharvest Shenzhou honey peach fruits using electronic nose [J]. Storage

- Process, 2021, 21(8): 101–108.
- [24] 李琪, 李喜宏, 李瑶瑶, 等. 不同机械伤对琯溪蜜柚采后生理生化变化影响[J]. 食品科技, 2014, (8): 38–41.
- LI Q, LI XH, LI YY, *et al.* Effects of different mechanical damage on postharvest physiological and biochemical of Guanxi pomelo [J]. Food Technol, 2014, (8): 38–41.
- [25] 马海军, 郑彩霞, 李猛, 等. 碰伤富士苹果果实内源茉莉酸和主要保护酶活性的变化[J]. 西北植物学报, 2010, 30(10): 2002–2009.
- MA HJ, ZHENG CX, LI M, *et al.* Response of endogenous jasmonic acid and activities of protective enzymes in impact bruising Fuji apples [J]. Northwest Bot, 2010, 30(10): 2002–2009.
- [26] 俞雅琼. 机械损伤对采后砀山酥梨生理生化变化的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011.
- YU YQ. Effects of mechanical damage on the postharvest physiology and biochemistry of Dangshan pear [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011.
- [27] HOFFMAN NE, YANG SF. Enhancement of wound-induced ethylene synthesis by ethylene in preclimacteric cantaloupe [J]. Plant Phys, 1982, 69(2): 317–322.
- [28] TANG DS, AO C, GONG SY, *et al.* Analysis of the volatile chemicals of longjing tea from different production locations using electronic nose [J]. J Tea, 2013, 39(4): 199–205.
- [29] TANG XW, GENG HJ, ZHANG LH, *et al.* Evaluation of maturity and flavor of Melons using an electronic nose [J]. Agric Sci Technol, 2011, 12(3): 447–450.
- [30] 李莹. 基于电子鼻的苹果品质无损检测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- LI Y. Non-destructive testing of apple quality based on electronic nose [D]. Yanglin: Northwest Agriculture & Forestry University, 2014.
- [31] 程绍明, 王俊, 王永维, 等. 基于电子鼻信号判别番茄苗机械损伤程度[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 102–106.
- CHENG SM, WANG J, WANG YW, *et al.* Discrimination of tomato plant with different levels of mechanical damage by electronic nose [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2012, 28(15): 102–106.
- [32] 冯蕾. 基于电子鼻及低场核磁共振的黄瓜与樱桃番茄新鲜度智能检测研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- FENG L. Research on freshness intelligent recognition of cucumbers and cherry tomatoes based on electronic nose and low-field nuclear magnetic resonance [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.

(责任编辑: 韩晓红 郑 丽)

作者简介

任紫烟, 硕士, 主要研究方向为果蔬贮藏保鲜。

E-mail: 1852246529@qq.com

关军锋, 博士, 研究员, 主要研究方向为果实品质生物学。

E-mail: junfeng-guan@263.net