

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.09.010

水果腐败传感监测系统设计与试验

Design and test of spoilage sensing monitoring system for fruit

郭 闯¹ 郭志明¹ 孙 力¹ 宋 焯² 邹小波¹GUO Chuang¹ GUO Zhi-ming¹ SUN Li¹ SONG Ye² ZOU Xiao-bo¹

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 中华全国供销合作总社济南果品研究院, 山东 济南 250220)

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. Jinan Fruit Research Institute, All China Federation of Supply & Marketing Cooperatives, Jinan, Shandong 250220, China)

摘要:目的:解决水果腐败多气体动态监测和早期预警的难点。方法:设计了气体传感器模块、数据采集模块等模块,开发了检测软件,集成研制了基于气体传感器阵列检测系统。以苹果为验证对象,探析了苹果腐败前气体传感器的响应差异及变化规律。结果:建立了线性判别分析、K-最近邻和反向传播人工神经网络(BP-ANN)3种苹果腐败前天数的判别模型,其中BP-ANN识别率达99%;通过联合区间、遗传算法、模拟退火、蚁群算法和竞争自适应重加权抽样法(CARS)5种变量筛选方法结合偏最小二乘法(PLS)筛选特征变量,建立了腐败前天数定量预测模型,CARS-PLS模型的预测效果最优,相关系数可达0.974。结论:基于气体传感器技术的水果腐败检测是可行的,为水果腐败检测系统的研发提供参考。

关键词:水果;腐败;气体传感器;检测;模式识别;变量筛选

Abstract: Objective: In order to solve the difficulty of multi-gas dynamic monitoring and early warning of fruit spoilage. **Methods:** Based on the gas sensor, the fruit spoilage sensor detection system was developed, and the gas sensor module, data acquisition module and other modules were designed. Developed inspection software and integrated inspection system. Taking apple as the verification object, the response difference and change law of the gas sensor before apple corruption were analyzed. **Results:** The linear discriminant analysis, k-nearest neighbor and back-

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC1600802);国家自然科学基金项目(编号:31972151);江苏省重点研发计划项目(编号:BE2019359);江苏大学第19批大学生科研课题立项资助项目(编号:19A394);济南市“高校20条”资助项目(编号:2020GXRC028)

作者简介:郭闯,男,江苏大学在读硕士研究生。

通信作者:郭志明(1982—),男,江苏大学教授,博士生导师,博士。E-mail:guozhiming@ujs.edu.cn

收稿日期:2021-04-13

propagation artificial neural network (BP-ANN) chemometric methods were used to establish the classification model of apple before spoilage. The recognition rate of BP-ANN was the highest, the training set and prediction set were 99.53% and 99.38% respectively. Synergy interval, genetic algorithm, simulated annealing, ant colony algorithm and competitive adaptive reweighted sampling (CARS) combined with partial least square (PLS) were used to screen characteristic variables to establish the prediction model of days before corruption. The CARS showed an optimal performance in predicting the days before corruption, to achieve R_p of 0.974. **Conclusion:** It shows that the fruit spoilage detection based on gas sensor technology is feasible, and it provides a reference for the research and development of fruit spoilage detection system.

Keywords: fruit; spoilage; gas sensor; monitor; pattern recognition; variable selection

2019年中国水果产量达2.74亿t,并呈惯性增长态势。水果产业在促进农业结构调整、优化居民饮食结构、增加果农收入方面发挥了重要作用^[1]。水果在采收及产后贮藏期间若处理不当,极易被微生物侵染,导致腐败变质。据不完全统计^[2],中国水果损失率约15%~20%,造成巨大的产后经济损失。

传统的水果腐败检测方法主要有人工肉眼辨识^[3]和理化指标检测^[4]。肉眼检测只能辨别腐败中期和晚期的水果,难以实现早期预警。理化指标检测的专业知识要求高,无法满足实际检测环境需求。随着无损检测技术的发展,近红外光谱和高光谱等技术已被广泛应用于水果腐败检测,具有快速、无损的优点,是研究趋势之一^[5]。Lorente等^[6]通过近红外光谱仪采集柑橘光谱,结合线性判别分析对新鲜与腐败柑橘进行分类,识别率达97.8%;张海辉等^[7]利用果实直径对苹果霉心病的透

射光谱进行修正,实现了苹果霉心病的准确判别。高光谱成像技术结合计算机图像技术和光谱技术获取黄瓜^[8]和香蕉^[9]的特征信息,融合马氏距离建立了相应腐败预警模型。张建锋等^[10]通过核磁共振成像仪获取香梨内部褐变的核磁共振图像,建立了香梨褐变的判别模型。上述无损检测技术虽然检测速度快、操作简便,但只针对单个样本进行检测,无法满足水果腐败实际检测的需要。

电子鼻通过样本的挥发性气体对检测对象进行分析评价,具有易操作、高灵敏的优点,同时具有分析样本整体信息的能力,被广泛应用于食品、环境和农业等领域。通过电子鼻获取不同贮藏时间水果的气体信息,以实现沃柑^[11]、桃^[12]和猕猴桃^[13]贮藏期的判别。徐静等^[14-15]分别利用电子鼻和乙醇传感器获取草莓的气体信息,实现了新鲜度的判别,同时准确定位了草莓腐败的位置。范霞等^[16]通过分析不同贮藏期桃子的气体成分,对桃的风味物质和品质特性进行了讨论。徐赛等^[17]将电子鼻技术与高光谱技术融合获取番石榴的特征信息,通过多源信息融合的方法对水果机械损伤程度进行判别,正确率高达 97.44%。袁鸿飞等^[18]利用电子鼻和近红外光谱技术对苹果水心病进行判别,识别率达 100%。然而,上述电子鼻系统大多针对水果的单一指标进行研究,无法实现水果腐败过程的多气体动态监测,不能满足复杂环境下水果腐败检测的需要。

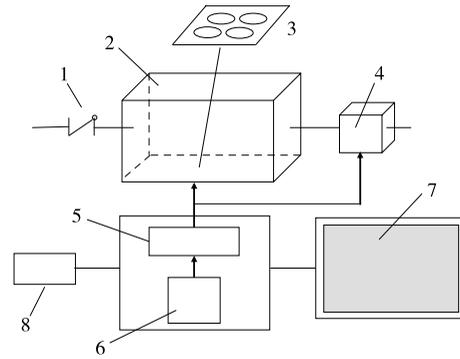
为解决水果腐败的多气体动态监测和早期预警的难点,研究水果腐败过程中气体传感器的响应差异及变化规律,模块化设计关键检测单元,研发基于气体传感器阵列的水果腐败传感检测预警系统。文章拟以典型大宗水果——苹果为验证对象,采集苹果腐败前的气体传感信息,结合化学计量学方法,构建苹果腐败前天数的判别模型和定量预测模型,验证系统的可行性和适用性,为水果腐败早期预警提供新思路。

1 水果腐败传感检测系统

水果腐败传感检测系统主要由气体传感器阵列、数据采集模块、数据存储模块、数据显示模块组成,其整体结构如图 1 所示。其中,气体传感器阵列用于获取水果各挥发性气体的信息;以单片机为核心的数据采集模块用于传感器阵列信号的采集和 AD 转换,并控制气泵和单向阀的开关等;数据存储模块和数据显示模块分别用于存储和显示气体传感器和腐败信息的数据;供气动力装置包括气室、微型气泵、单向阀等部件,单向阀用于气路的控制,微型气泵用于排气和气室内气体的流通。

1.1 检测系统的硬件结构

1.1.1 主控芯片的选型 单片机具有高可靠、低功耗、以及强抗干扰的优点,选用型号为 STC8A8K64S4A12_



1. 单向阀 2. 气室 3. 传感器阵列 4. 气泵 5. 控制电路
6. 单片机 7. 串口屏 8. TF 卡模块

图 1 水果腐败传感检测系统结构示意图

Figure 1 Schematic representation of fruit spoilage sensing monitoring system

LQFP48 的单片机作为主控芯片,该单片机具有较多的 I/O 端口和较高转换率。以单片机为核心的数据采集模块通过控制微型气泵和单向阀实现气路的通断;气体传感器阵列通过获取气室气体浓度的变化,利用数据采集模块对信号进行 AD 转换后通过串口屏实时显示,各气体传感器数据均保存至存储模块中。

1.1.2 气体传感器的选择 气体传感器对某些或某种气体具有高响应值,但是对其他的气体具有低响应值,灵敏度易受环境因素影响,将气体传感器进行整合成传感器阵列能够有效解决上述问题。经广泛调研和试验,选择高灵敏、低功耗、稳定性好的红外传感器和电化学型气体传感器搭建传感器阵列。

调研发现,影响水果品质的主要气体为氧气(O_2)、二氧化碳(CO_2)、挥发性有机物(VOC)和乙烯(C_2H_4)。 O_2 和 CO_2 是水果呼吸作用相关的气体, CO_2 浓度过高会导致二氧化碳中毒现象;不同水果释放的 C_2H_4 浓度不同,水果呼吸作用与水果类型有关, C_2H_4 对水果的生长和衰老起非常重要的作用;VOC则反映了水果的新鲜度。因此,选择二氧化碳、氧气、乙烯和挥发性有机物传感器构建传感器阵列。表 1 为选择的各气体传感器的检测量程、采样精度和重复性。

1.2 检测系统软件设计

检测系统软件具备硬件间通讯、采集传感器数据、显示腐败信息和传感器数据曲线、结果保存等功能。水果腐败传感检测系统的软件是基于 QT C++ 框架自主开发,用户可通过触摸屏进行人机交互,实现在线数据采集及相关参数信息的结果显示。系统可通过设置采样间隔进行间歇式检测,同时在检测空闲时期抽离气室多余气体,避免气体传感器长时间与挥发性气体反应,延长气体传感器的使用寿命。检测系统工作流程图如图 2 所示,可实时显示采集的气体数据曲线和调用模型计算后的腐

表 1 各气体传感器的型号、检测量程、采样精度和重复性

Table 1 Type, detection range, sampling precision and repeatability of each gas sensors

传感器名称	型号	检测量程/(mg·m ⁻³)	采样精度/%FS	重复性/%FS
乙烯	7NE/C ₂ H ₄ -100	0~12.5	±0.25	±0.125
氧气	7NE/O ₂ -30%	0~42	±0.84	±0.042
挥发性有机物	7NE/VOC-50	0~125	±2.5	±1.25
二氧化碳	7NE/CO ₂ -5000	0~9 821	±196.42	±98.21

败预警信息等。

2 试验结果与分析

2.1 试验对象

苹果:红富士苹果,挑选尺寸、色泽、大小相似,成熟度一致,无机械损伤的苹果,以保证苹果成熟度的一致性,市售;

黑曲霉:中国工业微生物菌种保藏管理中心(CICC)。

2.2 试验步骤

2.2.1 黑曲霉的活化与培养 将黑曲霉菌悬液涂布于 PDA 平板上,28 °C 恒温恒湿培养 1 周,取性状稳定的第 3 代菌作为试验用菌。用一次性接种环刮取菌孢子于无菌水中,配置成菌悬液,用血球计数板对菌悬液进行计数,用无菌水将菌悬液稀释至 10⁵CFU/mL。

2.2.2 苹果接种 用纯水擦去苹果表面污染物,用 75% 的酒精擦拭苹果表面杀菌消毒,于无菌操作台紫外线下照射 30 min;沿苹果赤道部分用注射器刺 3 mm(直径)× 5 mm(深度)的伤口,用移液枪注入 20 μL 黑曲霉菌悬液,利用封口胶进行缠绕,共接种 30 个苹果。将苹果样本置于 25 °C 恒温恒湿培养箱中,每 24 h 利用检测系统间歇获取苹果的数据信息。

2.2.3 数据获取 苹果发生腐败前,每 24 h 取出苹果样本,25 °C 下将样本置于集气容器中集气 1 h,利用自研检测系统获取各气体数据。每个样品检测时间为 130 s,清洗时间为 200 s,共采集 4 次数据。

2.2.4 数据分析 苹果样本腐败前天数的 C₂H₄、CO₂、VOC 和 O₂ 传感器的响应值如图 3 所示。其中,C₂H₄、CO₂ 和 VOC 传感器的响应值随接种时间的增加而增大,O₂ 的响应值随接种时间的增加而降低,可能是苹果自身的营养成分被代谢,消耗 O₂ 产生 C₂H₄、CO₂、VOC 气体,说明系统能较好地表征苹果腐败前的过程,随着苹果的腐败,差异性逐渐增大,验证了实现苹果腐败早期预警的可行性。

2.3 苹果腐败预警模型

检测系统采集的数据格式是以二维表的格式存储的,对于每一次采集的数据而言,均可视为 130×4 的二维数组,为了后续数据分析的准确性,对数据进行扁平化处理。分别将每个苹果数据由 130×4 的二维矩阵转换为 520×1 的一维矩阵,同时将 30 个苹果样本间歇采集 4 次的 120 个一维矩阵进行拼接,最终形成 520×120 的苹果气体信息数据库。

主成分分析(PCA)是数据降维和特征提取的多元统计方法,将高维的数据通过线性变换投影到低维空间,以代表主方差的特征向量为主成分,对高维数据进行降维^[19]。线性判别分析(LDA)是常用的模式识别方法^[20],可以对数据类之间的差异进行建模,以最小化类内的方差,被广泛应用于检测技术中的分类和特征提取。K-最近邻(KNN)是一种基于回归和分类问题的算法,其使用方便、易于实现^[21]。反向传播人工神经网络(BP-ANN)是利用非线性可微函数进行权值训练的反向传播网络,在处理多变量非线性复杂信息时具有强大的表达能力^[22]。

将苹果气体信息数据库作为数据模型输入,对 30 个苹果 4 d 的数据进行分析。其中训练集与预测集按 3:2 的比例进行划分,所有数据均使用 MATLAB_R2014b 进行处理。利用 LDA、KNN 和 BP-ANN 建立的腐败前天数的判别模型,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,前 3 个主成分的累积方差贡献率达 99.11%。其中苹果腐败前 1 d 和其他天数区分效果较

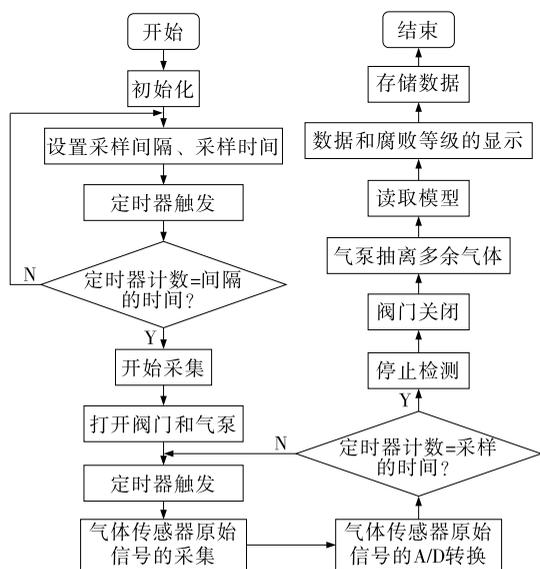


图 2 检测系统的软件流程图

Figure 2 Software flow chart of monitoring system

好,表明气体传感器数据可用于苹果腐败前天数的分类。由图 4 和表 2 可知,LDA 在主成分数为 2 时结果最佳,预

测集的结果可达 93.75%;KNN 的结果略优于 LDA,最高可达 97.92%;BP-ANN 在隐含层神经元数量为 13 时分

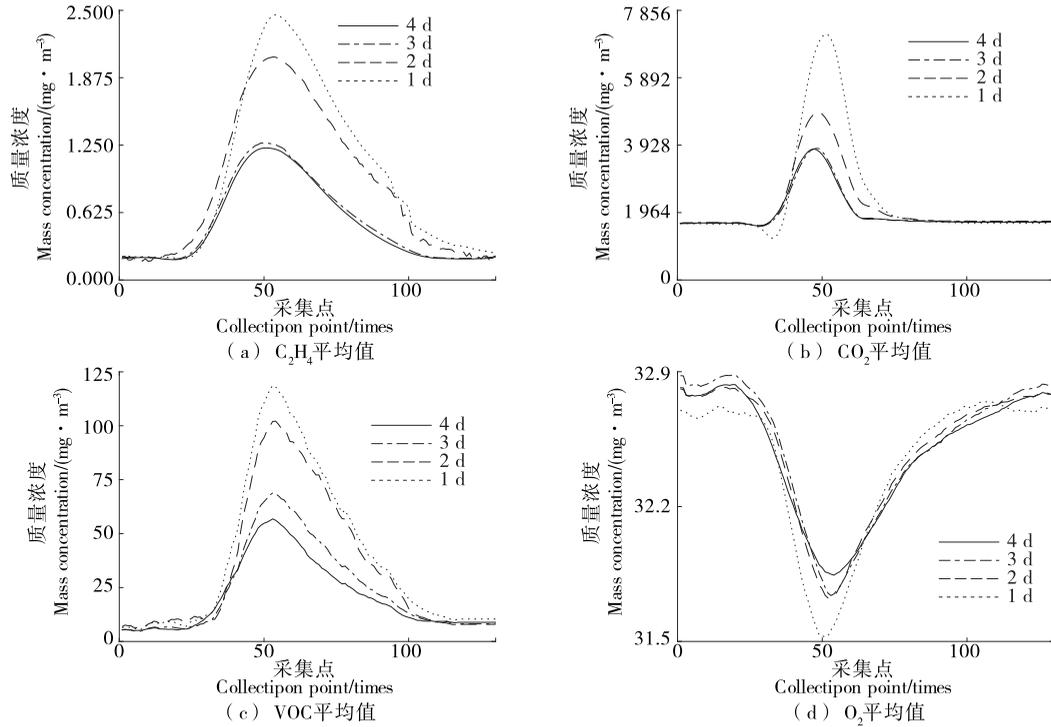


图 3 苹果样本腐败前天数的 C₂H₄、CO₂、VOC 和 O₂ 平均值

Figure 3 Mean values of C₂H₄, CO₂, VOC and O₂ in apple samples on different days before spoilage

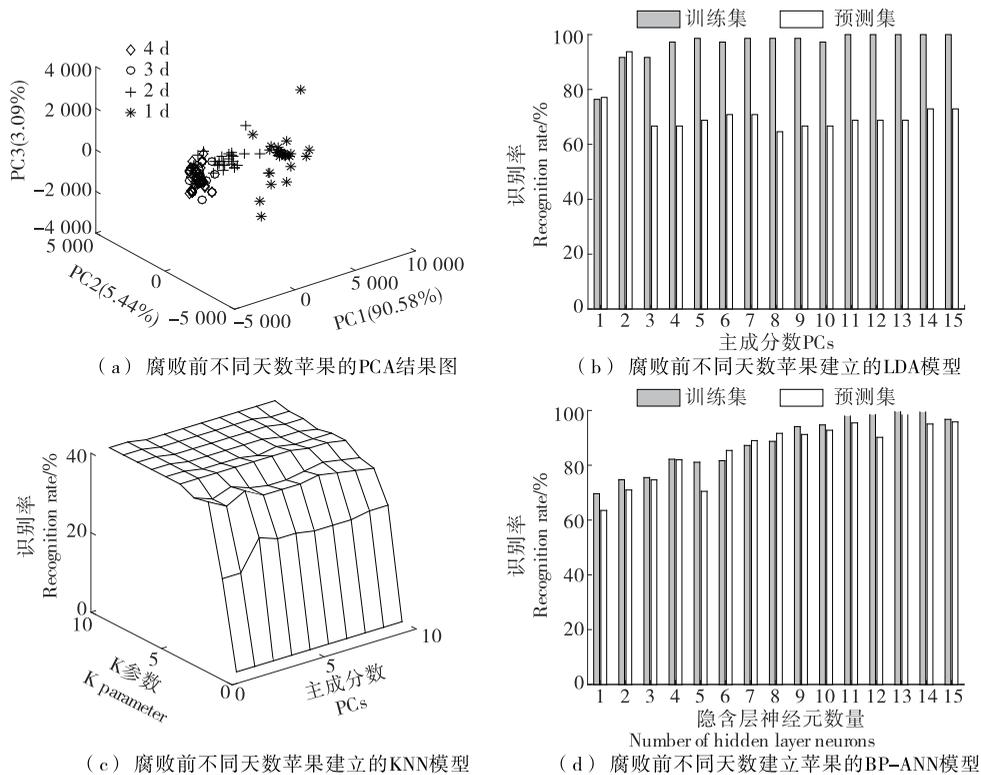


图 4 气体传感器数据建立的判别模型结果

Figure 4 Results of discriminant model using sensor data

类效果最佳,训练集与预测集的分类率分别为 99.53% 和 99.38%。综上,基于气体传感器的检测系统通过不同阶段苹果产生挥发性气体的差异性,可实现苹果的腐败前天数的分类。

2.4 苹果腐败预测模型

偏最小二乘法(PLS)为应用广泛的多元校正方法^[23],所建模型的交叉验证均方根误差(R_{MSECV})和预测均方根误差(R_{MSEP})越小,相关系数越接近 1,表明所建模型越准确、越稳定。由于气体传感器的数据包括相关性较弱的变量,会降低 PLS 模型准确性,可以通过变量筛选方法筛选数据的特征变量,剔除无关变量,可提高 PLS 的预测精度。

采用联合区间(SI)、遗传算法(GA)、模拟退火(SA)、蚁群(ACO)和竞争自适应重加权采样(CARS)5 种变量筛选方法筛选特征变量建立腐败前天数的 PLS 预测模型。SI 将所有数据分成若干个等宽子区间,由不同子区

间组合而成,选取 RMSECV 最小的区间组合^[24]。GA 是基于自然选择和进化机制^[25],能在短时间内达到全局最优,降低了陷入局部最优搜索的风险。SA 是基于固态物理退火工艺的演化而来的求解组合优化问题的算法^[26]。ACO 算法是通过蚁群的活动规律,优化所创建路径的能力,以改进最优变量的选择,具有较强的通用性和鲁棒性^[27]。CARS 通过模仿达尔文进化论而建立,可以有效剔除不相关变量,简化和提高模型的预测精度^[28]。

分别利用全变量和选择变量建立苹果腐败前天数的 PLS 预测模型,其散点图如图 5 所示。以预测集的相关系数作为定量模型的评价标准,建立的 PLS 模型相关系数均 >0.91 ,说明变量筛选方法可有效去除无关变量,提高预测模型的准确性。

由图 5 可知,CARS-PLS 筛选出 37 个特征变量构建预测模型,其中 $R_c=0.975, R_{MSEC}=0.249, R_p=0.974, R_{MSEP}=0.253$,对于苹果腐败前天数的预测最佳,说明系统通过不同阶段苹果产生气体成分的差异性,对苹果腐败前天数进行预测,表明实现早期腐败预警的可能性,验证了检测系统预测水果腐败的可行性。

表 2 基于 LDA、KNN 和 BP-ANN 算法的苹果腐败前天数的分类结果

Table 2 Classification results of days before apple corruption based on LDA, KNN and BP-ANN methods

算法	训练集/%	预测集/%
LDA	91.67	93.75
KNN	95.83	97.92
BP-ANN	99.53	99.38

3 结论

(1) 构建了由气体传感器阵列、数据采集模块、数据存储模块、数据显示模块组成的水果腐败传感检测系统。通过数据采集模块获取气体传感器阵列的信号,采用 QT Creator 软件开发检测系统显示界面,有效地获取水果的各挥发性气体信息,系统运行稳定可靠,实现了水果腐败

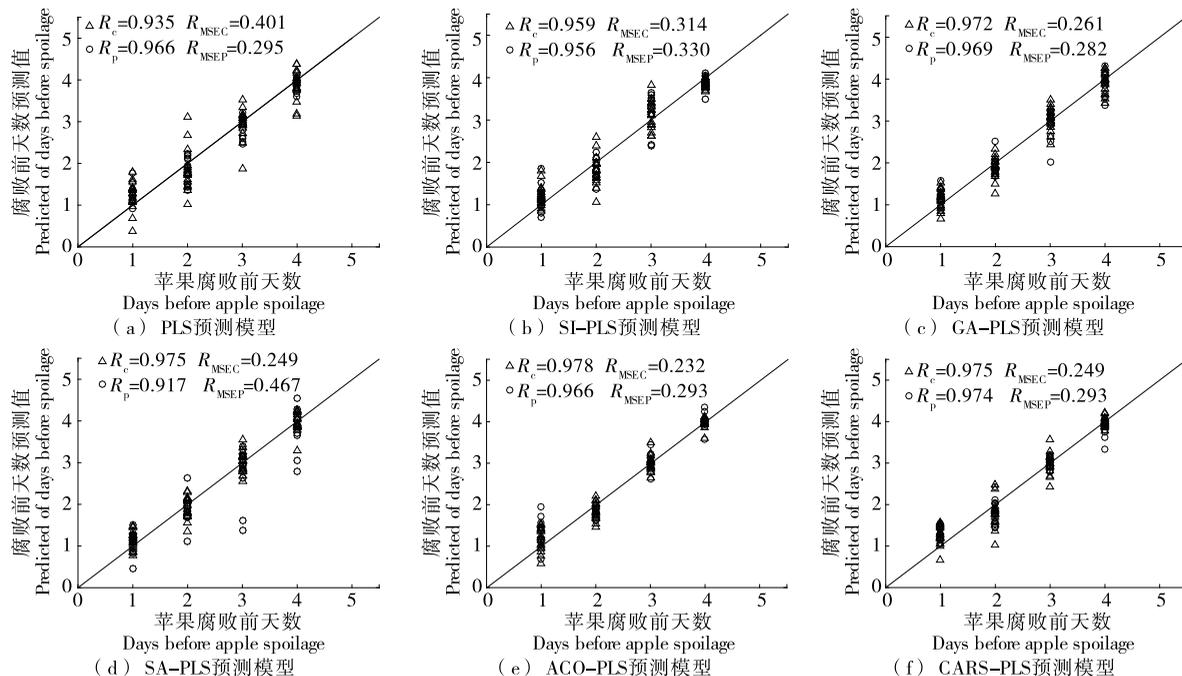


图 5 基于传感器数据建立的苹果腐败前天数预测模型

Figure 5 Prediction model of days before apple corruption based on sensor data

的检测。

(2) 以苹果为验证对象,探究苹果腐败过程气体的变化趋势。其中,乙烯、二氧化碳和挥发性化合物含量随苹果腐败程度的增加而增大,而氧气含量反而降低。通过LDA、KNN和BP-ANN 3种模式识别方法建立苹果腐败前天数判别模型,其中BP-ANN为最佳预测模型,识别率高达99.38%,表明基于气体传感器技术的水果腐败检测是可行的。

(3) 利用联合区间、遗传算法、模拟退火、蚁群和竞争自适应重加权采样5种变量筛选方法筛选特征变量,建立腐败前天数的PLS预测模型,其中,竞争自适应重加权采样-PLS对于苹果腐败前天数的预测最佳($R_p=0.974$),说明检测系统可用于腐败天数的预测,为水果腐败预警提供了新思路。后续研究应以批量的水果样本作为验证样本,模拟实际水果仓储环境,实现早期腐败预警和实时监测,随时了解仓储中水果的品质状态,快速识别水果的腐败变质,实现水果腐败的早期预警,及时采取处理措施,减少腐败的发生。

参考文献

- [1] 郭志明, 郭闻, 王明明, 等. 果蔬品质安全近红外光谱无损检测研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(24): 8 280-8 288. GUO Zhi-ming, GUO Chuang, WANG Ming-ming, et al. Research advances in nondestructive detection of fruit and vegetable quality and safety by near infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(24): 8 280-8 288.
- [2] 张小蓉, 赵敏. 物联网视角下鲜活农产品流通问题及对策探析[J]. 山西农业科学, 2015, 43(12): 1 693-1 696, 1 714. ZHANG Xiao-rong, ZHAO Min. Explore and analyse the problems and countermeasures in fresh agricultural products circulation under the perspective of the Internet of Things[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2015, 43(12): 1 693-1 696, 1 714.
- [3] MASTELLO R B, CAPOBIANGO M, CHIN S T, et al. Identification of odour-active compounds of pasteurised orange juice using multidimensional gas chromatography techniques [J]. Food Research International, 2015, 75: 281-288.
- [4] LASEKAN O, HUSSEIN F K. Classification of different pineapple varieties grown in Malaysia based on volatile fingerprinting and sensory analysis[J]. BMC Chemistry, 2018, 12(1): 140.
- [5] 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 Yan, ZHOU Xin-qi, YU Xiao-feng, et al. Research progress of non-destructive testing techniques for fruit and vegetable quality[J]. Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci), 2020, 46(1): 27-37.
- [6] LORENTE D, ESCANDELL-MONTERO P, CUBERO S, et al. Visible-NIR reflectance spectroscopy and manifold learning methods applied to the detection of fungal infections on citrus fruit [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 163: 17-24.
- [7] 张海辉, 田世杰, 马敏娟, 等. 考虑直径影响的苹果霉心病透射光谱修正及检测[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 313-320. ZHANG Hai-hui, TIAN Shi-jie, MA Min-juan, et al. Detection method of moldy core in apples using modified transmission spectrum based on size of fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 313-320.
- [8] 张棣, 殷勇, 于慧春, 等. 高光谱融合马氏距离的贮藏黄瓜腐败预警方法[J]. 核农学报, 2020, 34(12): 2 749-2 755. ZHANG Di, YIN Yong, YU Hui-chun, et al. Early warning method of cucumber spoilage during storage based on hyperspectral technology and mahalanobis distance[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(12): 2 749-2 755.
- [9] 薛书凝, 殷勇, 于慧春, 等. 香蕉贮藏中腐败基准确定与高光谱信息表征及腐败预警模型构建[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3 871-3 877. XUE Shu-ning, YIN Yong, YU Hui-chun, et al. Determination of spoilage benchmark and its hyperspectral information representation method as well as construction of hyperspectral based spoilage early warning model during banana storage[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(12): 3 871-3 877.
- [10] 张建锋, 何勇, 龚向阳, 等. 基于核磁共振成像技术的香梨褐变检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 169-173, 147. ZHANG Jian-feng, HE Yong, GONG Xiang-yang, et al. Browning detection of fragrant pear using magnetic resonance imaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 169-173, 147.
- [11] 黎新荣. 电子鼻在沃柑贮藏时间识别中的应用[J]. 南方农业学报, 2018, 49(9): 1 827-1 832. LI Xin-rong. Application of electronic nose in identification for storage time of Orah[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(9): 1 827-1 832.
- [12] WEI Xun, ZHANG Yu-chen, WU Di, 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 Analytical Methods, 2018, 11(11): 2 990-3 004.
- [13] 徐赛, 陆华忠, 王亚娟, 等. 基于电子鼻与物理特征融合的猕猴桃贮藏时间识别方法[J]. 食品科技, 2016, 41(3): 292-297. XU Sai, LU Hua-zhong, WANG Ya-juan, et al. Storage time identification of kiwi fruit based on electronic nose and physical characteristic combination [J]. Food Science and Technology, 2016, 41(3): 292-297.
- [14] 徐静, 赵秀洁, 孙柯, 等. 基于电子鼻和乙醇传感器判别草莓新鲜度的研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 117-121. XU Jing, ZHAO Xiu-jie, SUN Ke, et al. Determination on freshness of strawberry based on electronic nose and ethanol sensor [J]. Food & Machinery, 2016, 32(5): 117-121.
- [15] 韩璐, 邢梦珂, 陈继昆, 等. 基于气敏传感器检测草莓腐烂的移动式设备研发[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(9): 2 502-2 508.

- HAN Lu, XING Meng-ke, CHEN Ji-kun, et al. Development of e-lectronic nose equipment based on gas sensor for mobile detection of strawberry rot[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(9): 2 502-2 508.
- [16] 范霞, 陈荣顺. 水蜜桃采后贮藏期间风味物质及质构特性的研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(4): 30-35.
FAN Xia, CHEN Rong-shun. Changes on flavor substances and the texture properties of peach during postharvest storage[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(4): 30-35.
- [17] 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 Sai, LU Hua-zhong, ZHOU Zhi-yan, et al. Identification for guava mechanical damage based on combined hyper-spectrometer and electronic nose[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 214-219.
- [18] 袁鸿飞, 胡馨木, 杨军林, 等. 基于 FT-NIR 和电子鼻的苹果水心病无损检测[J]. *食品科学*, 2018, 39(16): 306-310.
YUAN Hong-fei, HU Xin-mu, YANG Jun-lin, et al. Nondestructive detection of apple watercore based on FT-NIR and electronic nose[J]. *Food Science*, 2018, 39(16): 306-310.
- [19] 楚松峰, 赵凤霞, 方双, 等. 基于 PCA-SVM 的红枣缺陷识别方法[J]. *食品与机械*, 2021, 37(1): 156-160, 198.
CHU Song-feng, ZHAO Feng-xia, FANG Shuang, et al. Recognition method of jujube defects based on PCA-SVM[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(1): 156-160, 198.
- [20] 郭志明, 黄文倩, 陈全胜, 等. 苹果腐心病的透射光谱在线检测系统设计及试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 283-288.
GUO Zhi-ming, HUANG Wen-qian, CHEN Quan-sheng, et al. Design and test of on-line detection system for apple core rot disease based on transmitted spectrum[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6): 283-288.
- [21] GUO Zhi-ming, GUO Chuang, CHEN Quan-sheng, et al. Classification for *Penicillium expansum* spoilage and defect in apples by electronic nose combined with chemometrics[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 2 130.
- [22] SUN Qing, ZHANG Min, YANG Pei-qiang. Combination of LF-NMR and BP-ANN to monitor water states of typical fruits and vegetables during microwave vacuum drying [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 116: 108548.
- [23] 曹念念, 刘强, 彭菁, 等. 基于近红外光谱技术的黄桃脆片可溶性固形物和硬度定量检测方法[J]. *食品与机械*, 2021, 37(3): 51-57.
CAO Nian-nian, LIU Qiang, PENG Jing, et al. Study on quantitative detection of soluble solids and firmness of yellow peach chips by near-infrared spectroscopy[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(3): 51-57.
- [24] 朱向荣, 李高阳, 苏东林, 等. 基于近红外光谱与组合间隔偏最小二乘法的稻米镉含量快速检测[J]. *食品与机械*, 2015, 31(4): 43-46, 50.
ZHU Xiang-rong, LI Gao-yang, SU Dong-lin, et al. The feasibility of rapid determination of the cadmium content in rice based on near infrared spectroscopy and synergy interval partial least squares[J]. *Food & Machinery*, 2015, 31(4): 43-46, 50.
- [25] KUTSANEDZIE F Y H, AGYEKUM AA, ANNAVARAM V, et al. Signal-enhanced SERS-sensors of CAR-PLS and GA-PLS coupled AgNPs for ochratoxin A and aflatoxin B1 detection [J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126231.
- [26] MUSHARAVATI F, HAMOUDA A S M. Enhanced simulated-annealing-based algorithms and their applications to process planning in reconfigurable manufacturing systems[J]. *Advances in Engineering Software*, 2012, 45(1): 80-90.
- [27] KUTSANEDZIE F Y H, CHEN Quan-sheng, HASSAN M M, et al. Near infrared system coupled chemometric algorithms for enumeration of total fungi count in cocoa beans neat solution[J]. *Food Chemistry*, 2017, 240: 231-238.
- [28] 江水泉, 孙通. 基于可见/近红外光谱和变量选择的脐橙可溶性固形物含量在线检测[J]. *食品与机械*, 2020, 36(2): 89-93.
JIANG Shui-quan, SUN Tong. Online detection of soluble solid content in navel orange based on visible/near infrared spectroscopy and variable selection[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(2): 89-93.
-
- (上接第 59 页)
- [22] 刘伟, 张群, 李志坚, 等. 不同品种黄花菜游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 243-250.
LIU Wei, ZHANG Qun, LI Zhi-jian, et al. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating free amino acids of different cultivars of daylily buds[J]. *Food Science*, 2019, 40(10): 243-250.
- [23] 丁倩, 石玉, 甄润英. 不同授粉品种绿宝苹果主要营养品质及主成分分析[J]. *食品与机械*, 2018, 34(4): 54-57.
DING Qian, SHI Yu, ZHEN Run-ying. Main nutritional quality and principal component analysis of bramley apples with different pollination varieties[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(4): 54-57.
- [24] 武辉, 侯丽丽, 周艳飞, 等. 不同棉花基因型幼苗耐寒性分析及其鉴定指标筛选[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(9): 1 703-1 713.
WU Hui, HOU Li-li, ZHOU Yan-fei, et al. Analysis of chilling-tolerance and determination of chilling-tolerance evaluation indicators in cotton of different genotypes[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(9): 1 703-1 713.
- [25] 荆瑞勇, 卫佳琪, 王丽艳, 等. 基于主成分分析的不同水稻品种品质综合评价[J]. *食品科学*, 2020, 41(24): 179-184.
JING Rui-yong, WEI Jia-qi, WANG Li-yan, et al. Comprehensive quality evaluation of different rice varieties based on principal component analysis[J]. *Food Science*, 2020, 41(24): 179-184.
- [26] 王丽艳, 王鑫淼, 荆瑞勇, 等. 基于氨基酸含量的市售 15 个产区黑木耳的综合评价[J/OL]. *食品工业科技*. (2021-03-25) [2021-04-21]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120050>.
WANG Li-yan, WANG Xin-miao, JING Rui-yong, et al. Comprehensive assessment of *auricularia auricular-judae* for sale from 15 producing areas based on amino acid content[J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*. (2021-03-25) [2021-04-21]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120050>.