



食品与发酵工业

Food and Fermentation Industries

ISSN 0253-990X, CN 11-1802/TS

《食品与发酵工业》网络首发论文

题目: 基于 FT-NIR 和电子鼻技术的苹果霉心病无损检测
作者: 杨晨昱, 袁鸿飞, 马惠玲, 任亚梅, 任小林
DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025671
收稿日期: 2020-09-15
网络首发日期: 2020-11-13
引用格式: 杨晨昱, 袁鸿飞, 马惠玲, 任亚梅, 任小林. 基于 FT-NIR 和电子鼻技术的苹果霉心病无损检测. 食品与发酵工业.
<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025671>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 FT-NIR 和电子鼻技术的苹果霉心病无损检测

杨晨昱¹, 袁鸿飞^{1,2}, 马惠玲³, 任亚梅^{1✉}, 任小林⁴

1 (西北农林科技大学 食品科学与工程学院, 陕西 杨凌, 712100) 2 (河南省口岸食品检验检测所, 河南 郑州, 450003) 3 (西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌, 712100) 4 (西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌, 712100)

*通信作者 (任亚梅为通讯作者, E-mail: 715189648@qq.com)

摘要 为研究傅里叶近红外光谱技术 (Fourier transform near infrared spectroscopy, FT-NIRS) 和电子鼻技术分别结合化学计量学的方法对苹果霉心病的判别效果。以“红富士”霉心病苹果和健康苹果为试材, 利用近红外光谱技术基于主成分分析建立 Fisher 判别和多层感知器 (multi-layer perceptron, MLP) 神经网络模型; 同时利用电子鼻技术分别结合 Fisher 判别、MLP 神经网络和径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络 3 种化学计量学的方法建立判别模型。根据建模集和验证集的预测准确率综合考虑, 基于主成分分析建立的 MLP 神经网络模型和电子鼻结合 MLP 神经网络模型对苹果霉心病的判别效果最好, 验证集中的正确判别率分别达到 87.7% 和 86.2%。说明电子鼻和近红外光谱技术均可以较好地判别苹果霉心病。

关键词 苹果; 霉心病; 近红外光谱; 电子鼻; 化学计量学

DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025671

Nondestructive detection of apple moldy core based on FT-NIR and electronic nose technology

YANG Chenyu¹, YUAN Hongfei^{1,2}, MA Huiling³, REN Yamei^{1✉}, REN Xiaolin⁴

1 (College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China) 2 (Food Inspection and Testing Institute of Henan Province, Zhengzhou 450003, China) 3 (College of Life Science, Northwest A & F University, Yangling 712100, China) 4 (College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract Study on Fourier near-infrared spectroscopy (FT-NIRS) and electronic nose technique was used to identify the efficacy of apple moldy core in combination with chemometrics. With “Red Fuji” moldy core and healthy apples as test materials, the near-infrared spectroscopy model of multi-layer Perceptron (MLP) neural network and Fisher discriminant was established based on the principal component analysis. Meanwhile, a discriminant model was established by the electronic nose combined with Fisher discrimination, MLP neural network and radial basis function (RBF) neural network, respectively. According to the comprehensive consideration of the prediction accuracy of the modeling set and the verification set, the MLP neural network model based on principal component analysis and the electronic nose combined with the MLP neural network model had the best discriminating effect on the apple mildew heart disease and the correct discriminating rate of verification set reached 87.7% and 86.2% respectively. It shows that the electronic nose and near-infrared spectroscopy used for distinguishing apple mold core are feasible.

Key words apple, moldy core, FT-NIRS, electronic nose, chemometric

苹果霉心病是果树在开花期由多种真菌侵染导致的病害, 具有一定的潜伏期, 是目前苹果急需解决的常见病害之一。2009 年, 陕西省渭北地区苹果发生大面积霉心病害, 产区果实发病率达到 37%; 近年来苹果霉心病的危害程度仍有上升趋势, 特别是豫西地区。苹果霉心病造成巨大的经济损失, 国内外学者非常重视苹果霉心病的防治研究, 努力从源头上控制霉心病的发生^[1-5]。苹果感染霉心病后, 果肉内部在室温下会迅速腐烂, 但从外表不易区分病果, 给苹果病果的筛选过程带来巨大不

收稿日期: 2020-09-15

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项项目 (Z225020701); 陕西省农业科技创新与攻关项目 (2019NY-112)

作者简介: 杨晨昱: 硕士研究生

网络首发时间: 2020-11-13 17:03:22 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1802.TS.20201113.1645.002.html>

便。目前,针对苹果霉心病的检测方法主要有低频磁共振法^[6]、CT 成像法、生物阻抗特性法^[7]、计算机视觉法^[8]、高光谱法^[9]。但这些技术存在费时、检测成本高、需要专业人员操作等不足,无法保证出售水果的质量。因此,亟需一种快速无损检测技术及早期地识别出苹果霉心病,保障苹果的贮藏和出口品质,进而提升我国苹果的知名度。

近红外光谱和电子鼻技术是分析化学领域发展产生的高新技术,具有操作简单、可重复性好、检测迅速、不破坏样品等优点,目前在国内外果蔬品质检测方面得到了广泛应用。使用近红外光谱技术可以得到样品在红外光谱区独特的吸收特征,具有区分病果的前提条件。SHENDEREY C 等^[13]肯定了近红外光谱技术在检测苹果霉心病方面的能力;苏东^[15]等在近红外光谱技术的基础上,结合了苹果直径等因子,提出一种新的检测方法,可以较准确判定苹果霉心病;雷雨^[16]等对果蔬进行了快速无损识别,证实了近红外光谱对检测苹果霉心病有较高的准确度。然而目前国内外研究者多采用近红外透射技术对苹果霉心病进行检测研究^[10-16],鲜有用近红外漫反射光谱技术^[17]。

电子鼻是一种分析、识别物品挥发性成分的仪器,在桃^[18]、猕猴桃^[19]、葡萄^[20,21]、石榴^[22]、香蕉^[23]等水果品质检测、成熟度和货架期^[24-26]鉴定方面得到广泛应用。PAN 等^[26]利用电子鼻正确识别正常草莓与病害草莓,同时可较好地地区分草莓感染的 3 种主要病原菌种类;惠国华等^[27]研究发现电子鼻系统可以快速表征水果的腐败过程;李琦,杨艳菊^[28]证明电子鼻可以对不同品质的苹果进行较好的分类;张鹏^[29]利用电子鼻判别猕猴桃在保鲜过程中的品质,说明电子鼻技术在水果病害的无损检测方面是可行的;何金鑫^[30]等利用电子鼻研究山核桃在氧化过程中各指标的变化,发现电子鼻可以快速预测山核桃氧化程度。但目前尚未有报道电子鼻对苹果霉心病无损检测的研究。

本研究分别利用傅里叶近红外光谱和电子鼻技术建立模型,比较不同方法对识别苹果霉心病准确率的影响,为近红外光谱和电子鼻技术判别苹果霉心病提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

试材:205 个陕西省白水尧禾镇农家果园采收的“红富士”健康苹果和疑似霉心病苹果,均由当地有经验的果农分辨(霉心病苹果与健康果实相比,着色更早、更易脱落、质量上更轻,果实萼口大、萼筒长且与果心相连的更易染病)。要求果实完整、体型一致、表面无明显的机械损伤。在 $(0\pm 1)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 85%~95%的冷库保藏 5 d。试验前,将苹果取出,依次编号,于常温 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 下放置 24h 备用。

仪器:MPA 型傅里叶变换近红外光谱仪,Bruker Optics 公司;PEN3 便携型电子鼻,德国 AIRSENSE 公司;

1.2 方法

1.2.1 近红外光谱采集

将待测苹果水平放置,在苹果赤道处标记三个待测点,使用固体光纤探头采集待测苹果近红外光谱值^[31]。近红外光谱仪分辨率设为 8 cm^{-1} ,波长范围为 $12000\sim 4000\text{ cm}^{-1}$,扫描 64 次。

1.2.2 基于主成分分析建立 Fisher 判别模型

以数字 0 和 1 分别代表健康果和霉心病果,随机选取 40 个健康果和 10 个霉心病果作为 Fisher 判别模型的验证集,剩余 155 个苹果作为建模集。经原始光谱提取的前 15 个主成分作为自变量。

1.2.3 基于主成分分析建立多层感知器神经网络

参照袁鸿飞等人^[33]的研究方法稍作修改,基于主成分分析建立 3 层感知器神经网络。其中模型训练集与测试集的相对数量比为 7:3;模型的输入层单位为 15,代表主成分个数,输出层单位数为 2,代表健康果实和霉心病果实;优化算法选择调整的共轭梯度,模型输出层的激活函数设定为恒等函数,模型隐藏层单位数为 8,隐藏层的激活函数设定为双曲正切函数。

1.2.4 电子鼻信号采集

将样品放置于 1000 mL 的玻璃烧杯中,密封后将玻璃烧杯静置于 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 条件下 1 h^[30]。随后

使用进样针顶空取样检测^[32]。内部空气流量与进样流量均为 300 mL/min, 电子鼻测定 60 s, 采用第 59 s 时的响应值进行数据分析。

电子鼻包含 S1 (W2W, 有机硫化物)、S2 (W35, 芳香烷烃)、S3 (W2S, 乙醇)、S4 (W1W, 硫化氢)、S5 (W1S, 甲烷)、S6 (W5C, 烷烃)、S7 (W6S, 氢气)、S8 (W3C, 氨类)、S9 (W5S 氮氧化物) 和 S10 (W1C, 芳香苯类) 10 个传感器阵列。

1.2.5 电子鼻结合化学计量法

在 Fisher 判别中, 建模集由随机选取的 155 个样本组成, 其中正常苹果 123 个, 霉心病苹果 32 个。验证集为剩余的 50 个样本。因变量为第 59 s 时传感器的响应值, 其中数字 0 和 1 分别代表正常苹果和霉心病苹果。同时建立 4 层 MLP 神经网络模型和 3 层 RBF 神经网络^[33], 输出层激活函数分别为 Sigmoid 和恒等函数; 隐藏层激活函数分别为双曲正切函数和 Softmax。

1.3 数据处理

用 SPSS 20.0 软件进行数据分析。

2 结果与讨论

2.1 近红外对苹果霉心病的判别结果分析

2.1.1 健康苹果和霉心病苹果的近红外光谱图

选择近红外光谱范围为 $12000\sim4000\text{cm}^{-1}$, 图 1 可知, 健康苹果和霉心病苹果的近红外光谱形状相似, 并出现了交叉重叠部分, 很难直接从光谱图上直观区分出健康苹果和霉心病苹果, 因此需要结合主成分分析区分霉心病苹果和健康苹果。

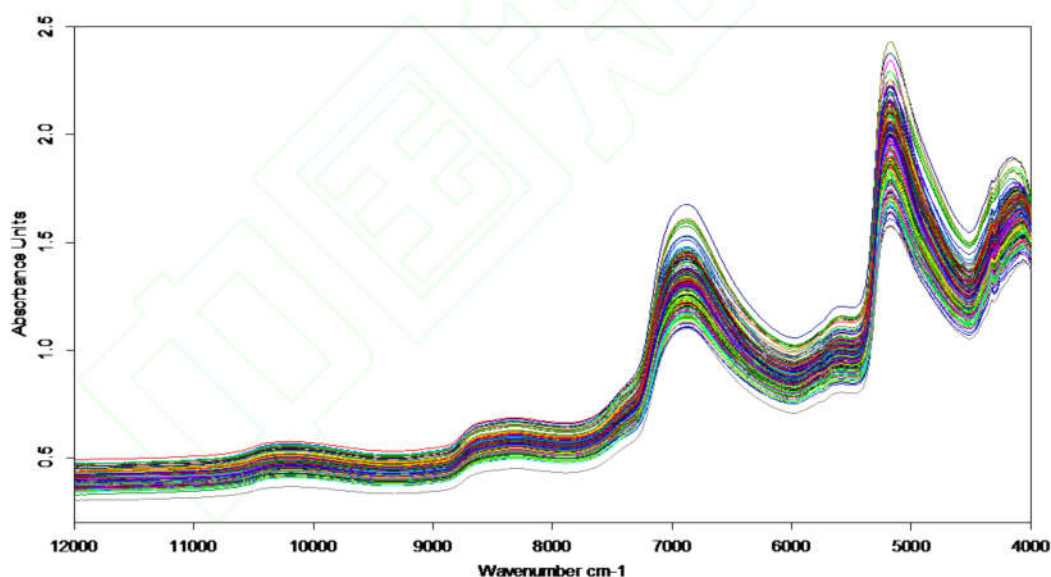


图 1 健康苹果和霉心病苹果的近红外光谱图
Fig.1 Near infrared spectra of healthy apples and mildew apples

2.1.2 主成分提取

将采集苹果的近红外光谱吸光度全部导出, 共有 2074 个数据点, 形成 205×2074 的数据矩阵。由于数据量大, 计算复杂, 因此利用 SPSS 20.0 对原始光谱进行主成分提取。由图 2 可知, 前 4 项、8 项、12 项和 20 项主成分的累积贡献率分别达到 99.853%、99.983%、99.992%和 99.997%, 考虑到主成分选取过少可能会造成较大的判别误差, 为获较高的判别率, 选取前 20 个主成分进行下一步分析。

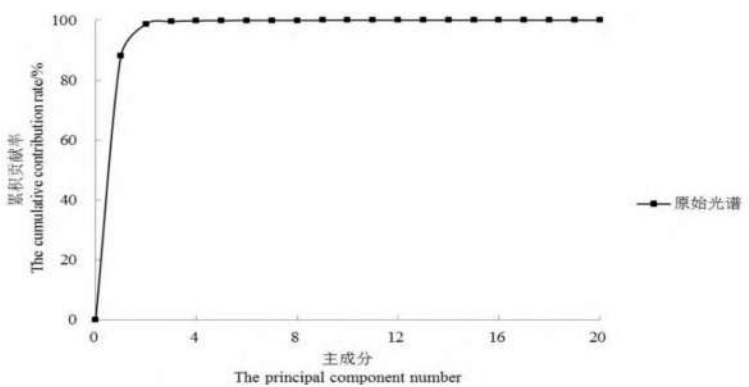


图 2 原始光谱提取的前 20 个主成分的累积贡献率
Fig.2 The cumulative contribution rate of the first 20 principal components extracted from the original spectrum

2.1.3 基于主成分分析的 Fisher 判别

原始光谱结合前 15 个主成分的 Fisher 判别函数：

健康苹果： $Y_0 = -0.602 - 0.234 X_1 + 0.404 X_2 + 0.84 X_3 + 0.426 X_4 + 0.081 X_5 + 0.238 X_6 + 0.055 X_7 - 0.198 X_8 - 0.567 X_9 - 0.107 X_{10} + 0.524 X_{11} + 0.374 X_{12} + 0.446 X_{13} + 0.161 X_{14} - 0.363 X_{15}$

霉心病苹果： $Y_1 = -3.076 + 1.147 X_1 - 0.543 X_2 + 0.180 X_3 - 0.734 X_4 - 0.574 X_5 - 0.266 X_6 + 0.304 X_7 - 0.262 X_8 + 1.067 X_9 + 0.272 X_{10} + 0.001 X_{11} - 0.549 X_{12} - 0.808 X_{13} - 0.814 X_{14} + 0.191 X_{15}$

式中： X_i 表示第*i*个主成分， $i = 1, 2, \dots, 15$

比较 Y_0 和 Y_1 的数值大小，如果 $Y_0 > Y_1$ ，则被判为组 0（健康苹果），如果 $Y_0 < Y_1$ ，则被判为组 1（霉心病苹果）。

由于经近红外光扫描后，得到的正常苹果和霉心病果光谱曲线形状相近，难以直接区分，如果选取的主成分数太少，可能会造成大的识别误差；如果选取的主成分数太多，会加大检测难度。表 1 可知，随着主成分数的增加，不同主成分数建立的苹果霉心病判别模型的正确判别率亦随之增加，当主成分数选取达到 15 个时，建模集预测准确率与选取前 20 个主成分相等，均为 90.3%，且原始光谱提取的前 15 个主成分建立的 Fisher 判别函数验证集的预测准确率为 72%，高于提取的前 20 个主成分的准确率，因此主成分数选取前 15 个最为合适。此外，霉心病苹果的验证集的判别率达到 80%，而健康果验证集的判别率仅 70%。说明模型准确率可能与试验的霉心病苹果发病程度有关，若待测苹果霉心病发病率低则不利于模型的验证。

表1 Fisher判别模型对不同主成分数训练集和验证集的判别结果
Tab.1 The results of Fisher discriminant model for training sets and validation sets with different principal component Numbers

组别	主成分	健康苹果			霉心病苹果			预测准确率/%
		样本数	误判数	正判率/%	样本数	误判数	正判率/%	
建模集	PC1~PC5	123	9	92.7	32	22	31.2	80.0
	PC1~PC10	123	6	95.1	32	19	40.6	83.9
	PC1~PC15	123	6	95.1	32	9	71.9	90.3
	PC1~PC20	123	5	95.9	32	10	68.8	90.3
验证集	PC1~PC15	40	12	70.0	10	2	80.0	72.0
	PC1~PC20	40	15	62.5	10	0	100.0	70.0

2.1.4 基于主成分分析的多层感知器神经网络

对训练集和测试集的预测准确率见表 2。可知，训练集和测试集的总体判别准确率分别为 90.5% 和 87.7%。在测试集中，健康苹果和霉心病苹果的判别准确率分别达到 89.4%和 80.0%。

表2 MLP神经网络模型对待测苹果训练集和测试集的判别结果
Tab.2 The results of MLP neural network model for training sets and test sets

组别	类别	各类样品总数	正确判别总数		预测准确率/%
			健康苹果	霉心病苹果	
训练集	健康苹果	116	109	7	94.0
	霉心病苹果	32	7	25	78.1
	合计	148	116	32	90.5
测试集	健康苹果	47	42	5	89.4
	霉心病苹果	10	2	8	80.0
	合计	57	44	13	87.7

2.2 电子鼻对苹果霉心病的判别结果分析

2.2.1 Fisher 判别

Fisher 判别方程为：

健康苹果： $W_0 = -9340.922 + 13555.112S_1 - 38.575S_2 - 4136.112S_3 + 7427.488S_4 - 3245.635S_5$
 $+ 1535.012S_6 + 79.111S_7 - 1414.401S_8 + 2286.279S_9 + 2585.537S_{10}$

霉心病苹果： $W_1 = -9300.939 + 13715.232S_1 - 39.183S_2 - 4386.051S_3 + 7361.378S_4 - 3135.557S_5$
 $+ 1541.941S_6 + 79.825S_7 - 1425.087S_8 + 2230.113S_9 + 2650.592S_{10}$

式中： S_i 表示电子鼻第*i*个传感器， $i = 1, 2, \dots, 10$

比较 W_0 和 W_1 的计算结果，若 $W_0 > W_1$ ，则被判为组 0（健康果），若 $W_0 < W_1$ ，则被判为组 1（霉心病果）。表 3 为模型对待测苹果的预测准确率结果，可知 Fisher 判别模型对建模集的总体预测准确率为 92.3%，对验证集的总体预测准确率为 74%，准确率相差较大；在验证集中，对病果的判别准确率只有 70%，远低于其他结果的准确率。说明霉心病果的 Fisher 判别函数模型不稳健，可能与苹果自身的发病程度低有关。

表3 Fisher判别函数对待测苹果的判别结果
Tab.3 The result of Fisher discriminant function on apple test

组别	类别	各类样品总数	正确判别总数		预测准确率/%
			健康苹果	霉心病苹果	
建模集	健康苹果	123	120	3	97.6
	霉心病苹果	32	9	23	71.9
	合计	155	129	26	92.3
验证集	健康苹果	40	30	10	75.0
	霉心病苹果	10	3	7	70.0
	合计	50	33	17	74.0

2.2.2 多层感知器（MLP）神经网络

表 4 可知，MLP 神经网络模型训练集总体判别准确率为 87.9%，测试集的总体判别准确率为 86.2%。但霉心病苹果测试集和训练集的判别结果均较低，分别为 64.7%和 68%。

表4 MLP神经网络模型对待测苹果的判别结果
Tab.4 The result of MLP neural network model on apple test

组别	类别	各类样品总数	正确判别总数		预测准确率/%
			健康苹果	霉心病苹果	
训练集	健康苹果	115	106	9	92.2
	霉心病苹果	25	8	17	68.0
	合计	140	114	26	87.9
测试集	健康苹果	48	45	3	93.8
	霉心病苹果	17	6	11	64.7
	合计	65	51	14	86.2

2.2.3 径向基函数 (RBF) 神经网络

表 5 可知，通过 RBF 神经网络模型预测，训练集的总体识别准确率为 86.3%，测试集的总体识别准确率为 82.4%，但测试集中霉心病苹果识别准确率仅为 50%，远低于总体识别准确率。

表5 RBF神经网络模型对待测苹果的判别结果
Tab.5 The result of RBF neural network model on apple test

组别	类别	各类样品总数	正确判别总数		预测准确率/%
			健康苹果	霉心病苹果	
训练集	健康苹果	103	98	5	95.1
	霉心病苹果	28	13	15	53.6
	合计	131	111	20	86.3
测试集	健康苹果	60	54	6	90.0
	霉心病苹果	14	7	7	50.0
	合计	74	61	13	82.4

综上所述，电子鼻结合 Fisher 判别函数的建模集的判别结果最好，但验证集的预测准确率均低于 RBF 神经网络和 MLP 神经网络。根据建模集和验证集的预测准确率综合考虑，电子鼻结合 MLP 神经网络模型可以很好地对苹果霉心病进行判别。

3 结论

本文使用 FT-NIR 和电子鼻技术对苹果霉心病无损检测，实现了 FT-NIR 和电子鼻技术对“红富士”苹果霉心病的快速、无损检测，具体结论包括：

(1) 使用近红外原始光谱提取的前 15 个主成分建立的 Fisher 判别函数模型的正确判别率达到最高，为 72%；建立的 MLP 神经网络对苹果霉心病的正确判别率为 87.7%；且 MLP 神经网络测试集中霉心病果的检测准确率更加稳定，因此从验证的准确度和稳定性两方面均可知近红外光谱技术结合 MLP 神经网络模型可以较好地判别苹果是否得霉心病。但在实际中，由于样品地域、环境、年份等具有局限性，不同品种苹果霉心病发病率可能存在较大差异，若样品的发病率普遍偏低，可能会对模型产生一定的影响，导致准确率下降，因此还需深入研究。

(2) 电子鼻可以较好地判别苹果霉心病。从建模集和验证集的预测准确率方面综合比较电子鼻结合 3 种方法对苹果霉心病的判别结果，结合 MLP 神经网络模型对苹果霉心病的判别效果最好，其中训练集预测准确率可达到 87.9%，测试集的预测准确率为 86.2%。说明电子鼻结合化学计量学的方法对识别苹果霉心病是可行的，为更好地利用电子鼻应用于苹果霉心病的无损检测提供了重要的依据和技术思路。以后的研究还需针对不同苹果品种作进一步探讨，并结合电子鼻中传感器的优化作进一步研究。

(3) 近红外原始光谱与电子鼻均可对苹果霉心病进行很好的识别，考虑到仪器对苹果霉心病的识

别准确度以及使用中的效率问题和检测成本因素,傅里叶近红外光谱技术比电子鼻检测苹果霉心病的效果更好。

(4) 目前苹果无损检测技术有了巨大的发展和应用,如光谱检测技术、成像检测技术、仿生智能感官检测技术等,本试验中只对近红外光谱检测技术与电子鼻检测技术进行了建模比较。目前的无损检测技术只能从一个方面区分霉心病苹果果实,不能完整的反映霉心病苹果果实与健康苹果果实理化品质的区别,随着多传感器信息融合技术在食品检测中的应用,可在区分霉心病苹果果实的同时很好的反映果实的理化性质,日后苹果无损检测技术无疑会更加多样化。

参 考 文 献

- [1] REUVENI M, PRUSKY D. Improved Control of Moldy-core Decay (*Alternaria Alternata*) in Red Delicious Apple Fruit by Mixtures of DMI Fungicides and Captan[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2007, 118(4): 349-357.
- [2] REUVENI M. Inhibition of Germination and Growth of *Alternaria Alternata* and Mouldy-core Development in Red Delicious Apple Fruit by Bromuconazole and Syngnum[J]. *Crop Protection*, 2006, 25(3): 253-258.
- [3] NIEM J, MIYARA I, ETTEDEGUI Y, et al. Core Rot Development in Red Delicious Apples is Affected by Susceptibility of the Seed Locule to *Alternaria Alternata* Colonization[J]. *Phytopathology*, 2007, 97(11): 1415-1421.
- [4] 党继玲, 马志超, 张荣, 等. 不同药剂对苹果霉心病和心腐病菌室内抑菌效果评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(1): 147-151.
DANG Ji-ling, MA Zhi-chao, ZHANG Rong, et al. Evaluation of Three Fungicides Against Apple Moldy Core and Core Rot Disease[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2015, 43(1): 147-151, 168.
- [5] 白小东, 牛黎莉, 毕阳, 等. 18 种盐对苹果霉心病的控制及部分机理[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(10): 335-338.
BAI Xiao-dong, NIU Li-li, BI Yang, et al. 18 Kinds of Salt on Apple of Core Rot Control and Part of the Mechanism[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(10): 335-338.
- [6] CHAYAPRASERT W, STROSHINE R. Rapid Sensing of Internal Browning in Whole Apples Using a Low-cost, Low-field Proton Magnetic Resonance Sensor[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 36(3): 291-301.
- [7] 李芳, 蔡骋, 马惠玲, 等. 基于生物阻抗特性分析的苹果霉心病无损检测[J]. *食品科学*, 2013, 34(18): 197-202.
LI Fang, CAI Chi, MA Hui-ling, et al. Nondestructive Detection of Apple Mouldy Core Based on Bioimpedance Properties[J]. *Food Science*, 2013, 34(18): 197-202.
- [8] 王富春, 李军, 张润浩, 等. 基于计算机视觉的苹果霉心病病变程度测量方法[J]. *农机化研究*, 2015, 37(06): 189—193.
WANG Fu-chun, LI Jun, ZHANG Run-hao, et al. Measurement of the Degree of Apple Mould Core Disease Based on Computer Vision[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(06): 189-193.
- [9] 刘思伽, 田有文, 张芳, 等. 采用二次连续投影法和 BP 人工神经网络的寒富苹果病害高光谱图像无损检测[J]. *食品科学*, 2017, 38(8): 277-282.
LIU Si-jia, TIAN You-wen, ZHANG Fang, et al. Hyperspectral Imaging for Nondestructive Detection of Hanfu Apple Diseases Using Successive Projections Algorithm and BP Neural Network[J]. *Food Science*, 2017, 38(8): 277-282.
- [10] CLARK C J, MCGLONE V A, JORDAN R B. Detection of Brownheart in 'Braeburn' Apple by Transmission NIR Spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 28(1): 87-96.
- [11] MCGLONE V A, MARTINSEN P J, CLARK C J, et al. On-line Detection of Brownheart in Braeburn Apples Using Near Infrared Transmission Measurements[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2005, 37(2): 142-151.
- [12] 韩东海, 刘新鑫, 鲁超, 等. 苹果内部褐变的光学无损检测研究[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(6): 86-88.
HAN Dong-hai, LIU Xin-xin, LU Chao, et al. Study on Optical-nondestructive Detection of Breakdown Apples[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(6): 86-88.
- [13] SHENDERREY C, SHMULEVICH I, ALCHANATIS V, et al. NIRS Detection of Moldy Core in Apples[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2010, 3(1): 79-86.
- [14] VANOLI M, RIZZOLO A, GRASSI M, et al. Studies on Classification Models to Discriminate 'Braeburn' Apples Affected by Internal Browning Using the Optical Properties Measured by Time-resolved Reflectance Spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 91: 112-121.
- [15] 苏东, 张海辉, 陈克涛, 等. 基于透射光谱的苹果霉心病多因子无损检测[J]. *食品科学*, 2016, 37(8): 207-211.
SU Dong, ZHANG Hai-hui, CHEN Ke-tao, et al. Multiple-Factor Nondestructive Detection of Moldy Core in Apples Based on Transmission Spectra[J]. *Food Science*, 2016, 37(8): 207-211.
- [16] 雷雨, 何东健, 周兆永, 等. 苹果霉心病可见/近红外透射能量光谱识别方法[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 193—200.
LEI Yu, HE Dong-jian, ZHOU Zhao-yong, et al. Detection of Moldy Core of Apples Based on Visible/Near Infrared Transmission Energy Spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 193-200.
- [17] 李顺峰, 张丽华, 刘兴华, 等. 基于主成分分析的苹果霉心病近红外漫反射光谱判别[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10): 158-161.
LI Shun-feng, ZHANG Li-hua, LIU Xing-hua, et al. Discriminant Analysis of Apple Moldy Core Using Near Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy Based on Principal Component Analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(10): 158-161.
- [18] INFANTE R, RUBIO P, MENESES C, et al. Ripe Nectarines Segregated Through Sensory Quality Evaluation and Electronic Nose Assessment[J]. *Fruits*, 2011, 66(2): 109-119.
- [19] 宋小青, 任亚梅, 张艳宜, 等. 电子鼻对低温贮藏猕猴桃品质的预测[J]. *食品科学*, 2014, 35(20): 230—235.
SONG Xiao-qing, REN Ya-mei, ZHANG Yan-yi, et al. Prediction of Kiwifruit Quality during Cold Storage by Electronic Nose[J]. *Food Science*, 2014, 35(20): 230-235.

- [20] ALEIXANDRE M, SANTOS J P, SAYAGO I, et al. A Wireless and Portable Electronic Nose to Differentiate Musts of Different Ripeness Degree and Grape Varieties[J]. *Sensors*, 2015, 15(4): 8429-8443.
- [21] 傅均, 黄灿钦, 章铁飞. 便携式智能电子鼻系统及其葡萄货架期评价研究[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(5): 782-788.
FU Jun, HUANG Can-qin, ZHANG Tie-fei. A Portable Intelligent Electronic Nose System and Its Application in Grape Shelf Life Evaluation[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(5): 782-788.
- [22] 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.
- [23] SANAEIFAR A, MOHTASEBI S S, GHASEMI-VARNAMKHAFTI M, et al. Application of MOS Based Electronic Nose for the Prediction of Banana Quality Properties[J]. *Measurement*, 2016, 82: 105-114.
- [24] 江琳琳, 潘磊庆, 杨虹贤, 等. 电子鼻在果蔬品质检测中的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(23): 12918-12920.
JIANG Lin-lin, PAN Lei-qing, YANG Hong-xian, et al. Progress on the Fruits and Vegetables Quality Detection by Electronic Nose[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(23): 12918-12920.
- [25] ADAR M F, YUMUSAK N. Classification of E-Nose Aroma Data of Four Fruit Types by ABC-based Neural Network[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 1-13.
- [26] PAN L, ZHANG W, ZHU N, et al. Early Detection and Classification of Pathogenic Fungal Disease in Post-harvest Strawberry Fruit by Electronic Nose and Gas Chromatography-mass Spectrometry[J]. *Food Research International*, 2014, 62(8): 162-168.
- [27] 惠国华, 厉鹏, 吴玉玲, 等. 基于电子鼻系统的水果腐败过程表征方法[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 264-268.
HUI Guo-hua, LI Peng, WU Yu-ling, et al. Characterization Method of Fruit Decay Procedure Using Electronic Nose System[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 264-268.
- [28] 李琦, 杨艳菊. 基于人工神经网络的苹果气体识别方法研究[J]. *传感器与微系统*, 2007, 26(9): 61-63, 66.
LI Qi, YANG Yan-ju. Research on Method of Apple Gases Recognition Based on ANN[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 26(9): 61-63, 66.
- [29] 张鹏, 刘振通, 李江阔, 等. 不同气调元件对软枣猕猴桃冷藏期保鲜品质及电子鼻判别的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(12): 130-136.
ZHANG Peng, LIU Zhen-tong, LI Jiang-kuo, et al. Effects of Different Air Combination on the Preservation Quality and Electronic Nose Identification of Kiwi *Actinidia Arguta* During Cold Storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(12): 130-136.
- [30] 何金鑫, 郇海燕, 穆宏磊, 等. 山核桃氧化过程中品质指标变化的电子鼻快速检测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 284-291.
HE Jin-xin, GAO Hai-yan, MU Hong-lei et al. Rapid Detection of Quality Parameters Change in Hickory Oxidation Process by Electronic Nose[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(14): 284-291.
- [31] 李光辉, 任亚梅, 任小林, 等. 苹果品种及损伤苹果的 FT-NIR 鉴别研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(16): 251-256.
LI Guang-hui, REN Ya-mei, REN Xiao-lin et al. Discrimination and Identification of Bruised Apples and Apple Varieties by FT-NIR[J]. *Food Science*, 2012, 33(16): 251-256.
- [32] SAEVELS S, LAMMERTYN J, BERNA A Z, et al. Electronic Nose as a Non-destructive Tool to Evaluate the Optimal Harvest Date of Apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 30(1): 3-14.
- [33] 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.