

基于FT-NIR和电子鼻的苹果水心病无损检测

袁鸿飞¹, 胡馨木¹, 杨军林¹, 任亚梅^{1,*}, 马惠玲², 任小林³

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学生命学院, 陕西 杨凌 712100;
3.西北农林科技大学园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 探讨傅里叶变换近红外光谱技术和电子鼻技术应用于苹果水心病检测的可行性。以277个“秦冠”水心病苹果和健康苹果为试材, 分别采集每个样本在12 000~4 000 cm^{-1} 波数范围的近红外光谱和10个传感器的电子鼻信号, 用不同预处理的近红外光谱方法提取主成分建立Fisher判别模型; 同时电子鼻结合3种化学计量学的方法进行建模。结果表明, 经一阶导数(9点平滑)预处理的近红外光谱, 提取前20个主成分建立的Fisher判别模型效果最好, 对未知样本的正确判别率达100%; 电子鼻分别结合Fisher判别、多层感知器神经网络和径向基函数神经网络判别模型对未知样本的识别率为89.7%、89.5%和85.7%。故利用近红外光谱和电子鼻技术分别结合化学计量学的方法可快速、无损检测苹果的水心病。其中, 近红外光谱技术结合Fisher判别对苹果水心病的识别率最高, 是一种准确可靠的测定方法。

关键词: 苹果; 水心病; 近红外光谱; 电子鼻; 化学计量学

Nondestructive Detection of Apple Watercore Based on FT-NIR and Electronic Nose

YUAN Hongfei¹, HU Xinmu¹, YANG Junlin¹, REN Yamei^{1,*}, MA Huiling², REN Xiaolin³

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. College of Life Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: This study aimed to explore the feasibility of applying near infrared spectroscopy (NIR) and electronic nose (E-nose) for detecting apple watercore. A total of 277 samples of “Qinguan” apples with watercore and healthy apples were tested. NIR spectra of each sample in the range of 12 000 to 4 000 cm^{-1} and E-nose signals from 10 sensors were collected. The Fisher discriminant model was established with the principal components extracted by different preprocessing methods. Meanwhile, the E-nose data were used for modeling by 3 different chemometric methods. The results indicated that the Fisher discriminant model developed based on the first twenty principal components from the NIR spectra subjected to the first derivative (9-point smoothing) pretreatment worked best with discrimination accuracy rates of 100% for unknown samples. The correct discrimination rates of the discriminant models developed by Fisher discriminant, multilayer perceptron (MLP) neural network and radial basis function (RBF) neural network for unknown samples were 89.7%, 89.5% and 85.7%, respectively. Thus, the combined application of NIR spectroscopy and E-nose with chemometrics can rapidly and nondestructively test watercore apples. NIR spectroscopy combined with Fisher discriminant analysis is an accurate and reliable method for detecting watercore apples with the highest correct recognition rate.

Keywords: apple; watercore; NIR spectroscopy; electronic nose; chemometrics

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201816044

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 16-0306-05

引文格式:

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.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201816044. <http://www.spkx.net.cn>

YUAN Hongfei, HU Xinmu, YANG Junlin, et al. Nondestructive detection of apple watercore based on FT-NIR and electronic nose[J]. Food Science, 2018, 39(16): 306-310. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201816044. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2017-08-01

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(Z225020701); 陕西省农业科技创新与攻关项目(2015NY023)

第一作者简介: 袁鸿飞(1992—), 女, 硕士, 研究方向为果蔬加工与贮藏。E-mail: 1187555082@qq.com

*通信作者简介: 任亚梅(1970—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为果蔬加工与贮藏。E-mail: 715189648@qq.com

苹果水心病俗称“冰糖心”，是一种生理病害。一般发生在果心附近，呈水渍状，不易从外观分辨，较健康果中其山梨醇和蔗糖含量均显著升高^[1]。但严重的水心病导致果实贮藏寿命降低和内部褐变，影响苹果品质^[2]。因此，亟需一种快速、无损、可靠的检测方法对其进行鉴别，以期增加苹果的附加值，为在实际生产中的应用提供技术参考和支撑。

目前，苹果水心病的无损检测技术主要有人工智能分类器^[3]、自行研制的水心病检测仪器^[4]、近红外高光谱成像^[5]、核磁共振^[6-8]、热成像技术^[9]、可见-近红外能量光谱技术^[10]。但这些技术存在耗时长、检测费用昂贵、识别的正确率低、技术条件复杂等缺点。

近红外光谱和电子鼻技术是近年来发展起来的2种快速、无损操作方便的分析技术。国内外研究者运用近红外光谱技术对苹果内部病害研究^[11-21]，大多采用近红外透射技术，很少利用近红外漫反射技术。近红外漫反射光是光源发射出来，进入样品内部经过多次反射、折射、衍射及吸收后返回样品表面的光，其负载了样品的结构和组成信息。电子鼻技术主要对苹果成熟度^[22]、贮藏时间^[23]、品种^[24-25]、货架期^[26]等方面进行研究；其中，李琦等^[27]利用电子鼻对好、碰伤、坏（褐斑、腐烂）苹果的分类正确率达83.33%以上；邹小波等^[28]研制了一套适合苹果气味检测的电子鼻系统，对好、坏（外伤、烂疤）苹果的正确判别率可达96.4%。以上研究结果表明近红外光谱和电子鼻技术检测苹果内部病害具有可行性，但傅里叶变换近红外光谱技术（Fourier transform near infrared spectroscopy, FT-NIR）和电子鼻技术对苹果水心病的鉴别研究鲜见报道。

本实验以“秦冠”苹果为试材，分别利用FT-NIR和电子鼻技术对每个样本进行信息采集，探讨不同光谱预处理方法对Fisher判别模型性能的影响；电子鼻分别结合Fisher判别、多层感知器（multilayer perceptron, MLP）神经网络、径向基函数（radial basis function, RBF）神经网络3种方法建立判别模型，并对未知样本进行验证，为FT-NIR和电子鼻技术判别水心病苹果提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

“秦冠”苹果（277个）于2015年10月14日采自陕西省白水尧禾镇农家果园。选摘成熟度一致、大小均匀、无机械损伤的疑似水心病果（据有经验的果农对果实判断）和健康果，当天运回实验室，放入（0±1）℃、相对湿度85%~90%的冷库中。实验前，将苹果从冷库中取出，于室温（25±1）℃放置24 h，依次编号。

1.2 仪器与设备

MPA型FT-NIR仪 德国Bruker Optics公司；PEN3便携型电子鼻 德国Airsense公司。

1.3 方法

1.3.1 FT-NIR采集

于每个苹果的赤道处标记等距离的3个光谱采集点，取平均光谱为样本的近红外光谱^[29]。仪器测定参数设置：固体光纤探头，分辨率8 cm⁻¹，扫描次数64，扫描范围12 000~4 000 cm⁻¹。

1.3.2 电子鼻信号采集

将苹果置于1 L的玻璃烧杯中，用聚乙烯保鲜膜（厚度为0.03 mm）密封烧杯口3层，于（25±1）℃静置1 h^[30]，使其顶部空间的挥发物达到平衡状态，再将电子鼻的进样针透过保鲜膜插入烧杯中，顶空取样检测。电子鼻测定的参数设置：样品测定时间60 s，清洗时间300 s，内部空气流量300 mL/min，进样流量300 mL/min。测定时，电子鼻响应值逐渐增大，第50秒后趋于平缓，因此采用第59秒时的响应值进行数据分析。

PEN3电子鼻包含S1（W1C，芳香苯类）、S2（W5S，氢氧化物）、S3（W3C，氨类）、S4（W6S，氢气）、S5（W5C，烷烃）、S6（W1S，甲烷）、S7（W1W，硫化氢）、S8（W2S，乙醇）、S9（W2W，有机硫化物）和S10（W3S，芳香烷烃）10个金属氧化物传感器阵列。

FT-NIR和电子鼻信号采集完毕的苹果，全部沿果实赤道处横向切开，判断并记录该编号果实是健康果还是水心病果。

1.4 数据处理

将OPUS 5.5软件预处理的FT-NIR信号导入到Excel中，用SPSS 20.0软件进行主成分分析和Fisher判别；将Winmuster软件测得的电子鼻信号，在SPSS 20.0软件中进行Fisher判别、MLP及RBF分析。

2 结果与分析

2.1 FT-NIR对苹果水心病的判别结果分析

2.1.1 健康苹果和水心病苹果的FT-NIR图

由图1可见，在12 000~4 000 cm⁻¹波数范围内，健康果和水心病果的FT-NIR曲线形状非常相似，并出现部分交叉重叠，故很难从光谱图上直观区分健康果和水心病果。由于外部环境、样本背景、仪器设备等因素的干扰，FT-NIR会出现噪声、基线漂移和光散射等现象，为了尽可能消除干扰因素对判别模型性能的影响，分别采用矢量归一化、最小-最大归一化（min-max normalization, MMN）、9点平滑、多元散射校正（multiplicative scatter correction, MSC）和一阶导数（9点平滑）5种方法对原始光谱进行预处理。

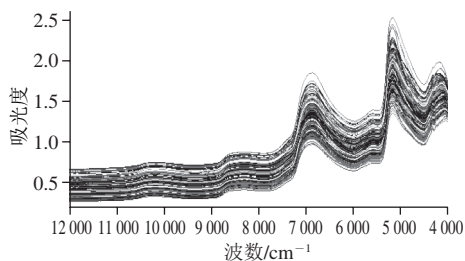


图1 健康苹果和水心病苹果的FT-NIR

Fig. 1 FT-NIR spectra of healthy and watercore apples

2.1.2 主成分提取结果

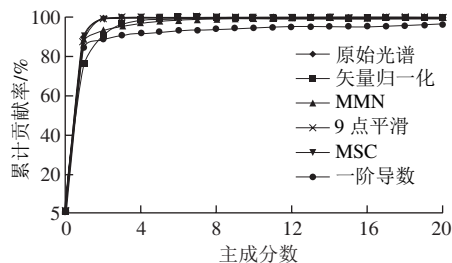


图2 不同光谱预处理方法提取的前20个主成分的累计贡献率

Fig. 2 Cumulative variance plot of the first 20 principal components extracted by different spectrum preprocessing methods

由图2可见,除一阶导数预处理的累计贡献率为96%,其他光谱预处理后提取的前20个主成分的累计贡献率均在99%以上。考虑到健康果和水心病果的光谱差别较小,若选取的主成分数过少,则可能会造成较大的判别误差。所以为了获得较高的正确判别率,选取前20个主成分作为建立Fisher判别函数的自变量。

2.1.3 基于主成分分析的Fisher判别函数结果

以数字0和1分别代表健康果和水心病果,分别从健康果和水心病果中随机选取39个和29个苹果作为验证集,其余209个苹果作为建模集。取经不同光谱预处理后提取的前20个主成分作为自变量,利用SPSS 20.0软件进行Fisher判别分析。不同光谱预处理方法结合主成分分析建立的Fisher函数判别结果见表1。

表1 不同光谱预处理方法结合主成分分析建立的Fisher函数判别结果
Table 1 Discrimination accuracy rates for training set samples of Fisher function established by combination of different spectral preprocessing methods with PCA

光谱预处理方法	健康苹果			水心病苹果			建模集正确判别率/%
	样本数	误判数	正判率/%	样本数	误判数	正判率/%	
原始光谱	120	8	93.3	89	3	96.6	94.7
矢量归一化	120	10	91.7	89	2	97.8	94.3
MMN	120	12	90.0	89	4	95.5	92.3
9点平滑	120	8	93.3	89	4	95.5	94.3
MSC	120	9	92.5	89	4	95.5	93.8
一阶导数	120	0	100.0	89	0	100.0	100.0

由表1可知,经一阶导数(9点平滑)预处理建立的Fisher判别函数的正确判别率最高,达到100%;经MMN

预处理所建判别函数的正确判别率最低,为92.3%;经矢量归一化、9点平滑和MSC预处理所建判别函数正确判别率均低于100%。

经一阶导数(9点平滑)预处理结合主成分分析所建Fisher判别方程:

$$\text{健康苹果: } Y_0 = -141.599 - 327.549X_1 + 8.979X_2 - 32.439X_3 - 21.553X_4 + 6.054X_5 + 5.725X_6 + 1.677X_7 - 1.225X_8 - 6.459X_9 + 4.088X_{10} + 3.515X_{11} + 1.796X_{12} - 2.825X_{13} - 3.719X_{14} + 2.435X_{15} - 2.749X_{16} - 1.458X_{17} - 0.695X_{18} - 1.597X_{19} + 1.522X_{20}$$

$$\text{水心病苹果: } Y_1 = -260.072 + 444.309X_1 - 11.514X_2 + 44.092X_3 + 29.267X_4 - 8.114X_5 - 8.003X_6 - 2.122X_7 + 1.897X_8 + 8.957X_9 - 5.287X_{10} - 4.587X_{11} - 2.289X_{12} + 4.003X_{13} + 5.081X_{14} - 3.372X_{15} + 3.707X_{16} + 1.821X_{17} + 0.901X_{18} + 2.076X_{19} - 2.223X_{20}$$

式中: X_i 表示第*i*个主成分($i=1, 2, \dots, 20$)。

为检验所建判别函数对未知样本的判别效果,将68个未参与建模的样本,即验证集,代入上述Fisher判别方程,计算 Y_0 和 Y_1 的结果,并比较二者的数值大小,如果 Y_0 大于 Y_1 ,则被判为组0(健康果),如果 Y_0 小于 Y_1 ,则被判为组1(水心病果)。一阶导数预处理结合主成分建立Fisher判别函数对验证集的判别结果见表2。由表2可知,一阶导数(9点平滑)结合主成分分析所建Fisher判别函数对验证集的正确判别率为100%,说明了主成分分析结合Fisher判别应用于健康苹果和水心病苹果判别是可行的。这是由于原始光谱数据经一阶导数预处理后,提高了光谱数据的信噪比,同时Fisher判别使水心病果和健康果数据集之间的方差尽可能大,更好地区分二者,增强了校正模型的稳健性和预测能力。

表2 一阶导数结合主成分分析所建Fisher判别函数对验证集的判别结果
Table 2 Discrimination accuracy rates for test set samples of Fisher function established by PCA after first derivative preprocessing

项目	类型	合计	判别结果	
			健康苹果	水心病苹果
计数/个	健康苹果	39	39	0
	水心病苹果	29	0	29
百分比/%	健康苹果	100	100	0
	水心病苹果	100	0	100
正确判别率/%	100			

2.2 电子鼻对苹果水心病的判别结果分析

2.2.1 Fisher判别函数的建立与验证结果

以数字0和1分别代表健康果和水心病果,从样本中随机选取120个健康果和89个水心病果作为建模集,剩余的68个样本作为验证集。将第59秒时电子鼻10个传感器的响应值作为Fisher判别模型的因变量输入。经SPSS 20.0软件计算,建立Fisher判别函数进行分析,建模集和验证集的判别结果见表3。

Fisher判别方程:

健康苹果: $W_0 = -4\ 127.534 - 1\ 639.708S_1 - 6.749S_2 + 3\ 133.317S_3 + 2\ 494.203S_4 + 196.139S_5 + 61.178S_6 + 14.225S_7 - 94.252S_8 + 3\ 436.390S_9 + 578.447S_{10}$

水心病苹果: $W_1 = -4\ 181.615 - 1\ 755.557S_1 - 6.748S_2 + 3\ 182.942S_3 + 2\ 554.934S_4 + 275.291S_5 + 57.181S_6 + 14.418S_7 - 92.522S_8 + 3\ 445.649S_9 + 543.819S_{10}$

式中: S_i 表示第*i*个金属氧化物传感器 ($i=1, 2, \dots, 10$)。

为检验所建判别函数对未知样本的判别效果, 将68个样本的验证集, 代入上述Fisher判别方程, 计算 W_0 和 W_1 的结果, 并比较二者的数值大小, 如果 W_0 大于 W_1 , 则被判为组0(健康果), 如果 W_0 小于 W_1 , 则被判为组1(水心病果)。由表3可知, 电子鼻结合Fisher判别函数对建模集和验证集的总体正确判别率分别为90%、89.7%, 说明了电子鼻技术结合Fisher判别应用苹果水心病判别的可行性。

表3 Fisher判别函数对健康苹果和水心病苹果的判别结果
Table 3 Discrimination accuracy rates of Fisher discriminant function for healthy and watercore apples in training and test sets

组别	类型	各类样本总数	实际预测的样本总数		正确判别率/%
			健康苹果	水心病苹果	
训练集	健康苹果	120	108	12	90.0
	水心病苹果	89	9	80	89.9
	合计	209	117	92	90.0
验证集	健康苹果	39	36	3	92.3
	水心病苹果	29	4	25	86.2
	合计	68	40	28	89.7

2.2.2 MLP神经网络判别结果

表4 MLP神经网络模型对健康苹果和水心病苹果的判别结果
Table 4 Discrimination accuracy rates of MLP neural network model for healthy and watercore apples

组别	类型	各类样本总数	实际预测的样本总数		正确判别率/%
			健康苹果	水心病苹果	
训练集	健康苹果	115	104	11	90.4
	水心病苹果	76	8	68	89.5
	合计	191	112	79	90.1
验证集	健康苹果	44	38	6	86.4
	水心病苹果	42	3	39	92.9
	合计	86	41	45	89.5

建立3层MLP神经网络模型, 隐藏层层数为1, 训练集与测试集的相对数量为7:3。模型的输入层为电子鼻第59秒时的10个传感器响应值, 即模型的输入层单位数为10。输出层的节点数为2, 代表健康果和水心病果。经SPSS 20.0软件计算, 优化算法选择调整的共轭梯度, 模型的其他参数设置为: 隐藏层单位数为7, 隐藏层的激活函数为双曲正切函数, 输出层的激活函数分为Softmax。

根据上述MLP神经网络模型参数的设定, 对训练集和

测试集的判别结果见表4。所建立的MLP神经网络模型对健康果和水心病果的正确判别率较高, 其中训练集和测试集的总体判别准确率分别为90.1%和89.5%, 说明电子鼻结合MLP神经网络模型能够较好地识别水心病苹果。

2.2.3 RBF神经网络判别结果

建立3层RBF神经网络模型。训练集与测试集的相对数量为7:3。以电子鼻第59秒时的10个传感器响应值作为输入层, 因此, 模型的输入层单位数为10。输出层的节点数为2, 代表健康果和水心病果。经SPSS 20.0软件计算, 模型的其他参数设置为: 隐藏层的单位数为9, 隐藏层的激活函数为Softmax, 输出层的激活函数为恒等函数。

表5 RBF神经网络模型对健康苹果和水心病苹果的判别结果
Table 5 Discrimination accuracy rates of RBF neural network model for healthy and watercore apples

组别	类型	各类样本总数	实际预测的样本总数		正确判别率/%
			健康苹果	水心病苹果	
训练集	健康苹果	113	102	11	90.3
	水心病苹果	87	16	71	81.6
	合计	200	118	82	86.5
验证集	健康苹果	46	39	7	84.8
	水心病苹果	31	4	27	87.1
	合计	77	43	34	85.7

由表5可知, 电子鼻结合RBF神经网络模型对训练集和测试集的总体正确判别率分别为86.5%、85.7%, 低于Fisher判别函数和MLP神经网络的正确判别率, 并且训练集中水心病苹果的正确判别率仅为81.6%, 说明电子鼻结合RBF神经网络对苹果水心病的检测有待进一步研究。

3 结论

FT-NIR原始光谱经一阶导数(9点平滑)预处理后结合主成分所建立的Fisher判别函数, 对未知样本的正确判别率达100%。由此可知, 模型有着较好的预测准确率, 验证了FT-NIR技术应用于苹果水心病检测的可行性。但考虑到地域、品种、年份等局限因素, 为进一步提高模型在实际应用中的推广能力, 建议对不同产地、品种和年份的水心病果进行判别研究。

比较了电子鼻分别结合3种化学计量学的方法对未知样本的正确判别率, 其中, Fisher判别和MLP神经网络的判别结果较好, 均在89%以上, 验证了电子鼻技术结合化学计量学应用于苹果水心病检测的可行性。

考虑到FT-NIR和电子鼻2种仪器在实际应用中的检测效率和经济条件因素, 以及对苹果水心病的识别效果, 认为FT-NIR技术可以更好地对苹果水心病进行无损检测。

参考文献:

- [1] 杜艳民, 王文辉, 杭博, 等. 碳水化合物、矿质元素及活性氧代谢与富士苹果水心病发生的关系[J]. 园艺学报, 2015, 42(10): 2023-2030. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2015-0181.
- [2] 刘小勇, 张辉元, 董铁, 等. 苹果水心病无损检测与防治研究进展[J]. 果树学报, 2008, 25(5): 721-726. DOI:10.13925/j.cnki.gsb.2008.05.021.
- [3] SHAHIN M A, TOLLNER E W, MCCLENDON R W. Artificial intelligence classifiers for sorting apples based on watercore[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 79(3): 265-274. DOI:10.1006/jaer.2001.0705.
- [4] 韩东海, 刘新鑫, 赵丽丽, 等. 苹果水心病的光学无损检测[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 143-146. DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2004.05.036.
- [5] 王思玲, 蔡聘, 马惠玲, 等. 基于高光谱成像的苹果水心病无损检测[J]. 北方园艺, 2015, 39(8): 124-130. DOI:10.11937/bfy.201508033.
- [6] CHO B K, CHAYAPRASERT W, STROSHINE R L. Effects of internal browning and watercore on low field (5.4 MHz) proton magnetic resonance measurements of T_2 values of whole apples[J]. Postharvest Biology & Technology, 2008, 47(1): 81-89. DOI:10.1016/j.postharvbio.2007.05.018.
- [7] HERREMANS E, MELADO-HERREROS A, DEFRAEYE T, et al. Comparison of X-ray CT and MRI of watercore disorder of different apple cultivars[J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 87: 42-50. DOI:10.1016/j.postharvbio.2013.08.008.
- [8] MELADO-HERREROS A, FERNANDEZ-VALLE M E, BARREIRO P. Non-destructive global and localized 2D T_1/T_2 NMR relaxometry to resolve microstructure in apples affected by watercore[J]. Food & Bioprocess Technology, 2015, 8(1): 88-99. DOI:10.1007/s11947-014-1389-4.
- [9] BARANOWSKI P, LIPECKI J, MAZUREK W, et al. Detection of watercore in 'Gloster' apples using thermography[J]. Postharvest Biology & Technology, 2008, 47(3): 358-366. DOI:10.1016/j.postharvbio.2007.07.014.
- [10] 王加华, 孙旭东, 潘璐, 等. 基于可见/近红外能量光谱的苹果褐腐病和水心鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(9): 2098-2102. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2008)09-2098-05.
- [11] UPCHURCH B L, THROOP J A, ANESHANSLEY D J. Detecting internal breakdown in apples using interactance measurements[J]. Postharvest Biology & Technology, 1997, 10(1): 15-19. DOI:10.1016/S0925-5214(96)00057-9.
- [12] CLARK C J, MCGLONE V A, JORDAN R B. Detection of brownheart in 'Braeburn' apple by transmission NIR spectroscopy[J]. Postharvest Biology & Technology, 2003, 28(1): 87-96. DOI:10.1016/S0925-5214(02)00122-9.
- [13] 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. DOI:10.1016/j.postharvbio.2005.04.011.
- [14] BENNEDSEN B S, PETERSON D L. An optical method for detecting watercore and mealiness in apples[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(5): 1819-1826.
- [15] 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. DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2006.06.022.
- [16] SHENDEREY C, SHMULEVICH I, ALCHANATIS V, et al. NIR detection of moldy core in apples[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(1): 79-86. DOI:10.1007/s11947-009-0256-1.
- [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. DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2011.10.031.
- [18] 宫元娟, 匡立学, 冯叙桥. 苹果近红外光谱无损检测技术的研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(6): 570-574. DOI:10.3969/j.issn.1673-1689.2012.06.002.
- [19] VANOLI M, RIZZOLO A, GRASSIA 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 & Technology, 2014, 91: 112-121. DOI:10.1016/j.postharvbio.2014.01.002.
- [20] 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. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.026.
- [21] 周兆永, 何东健, 张海辉, 等. 基于深度信念网络的苹果霉心病病害程度无损检测[J]. 食品科学, 2017, 38(14): 297-303. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201714046.
- [22] PATHANGE L P, MALLIKARJUNAN P, MARINI R P, et al. Non-destructive evaluation of apple maturity using an electronic nose system[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4): 1018-1023. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.08.034.
- [23] HUI G H, WU Y L, YE D D, et al. Fuji apple storage time predictive method using electronic nose[J]. Food Analytical Methods, 2013, 6(1): 82-88. DOI:10.1007/s12161-012-9414-6.
- [24] 李莹, 任亚梅, 张爽, 等. 基于电子鼻的苹果低温贮藏时间及品质预测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 183-191. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.05.11.
- [25] 邹小波, 赵杰文. 支持向量机在电子鼻区分不同品种苹果中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 146-149. DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.2007.01.027.
- [26] 张鹏, 李江阔, 陈绍慧. 基于电子鼻判别富士苹果货架期的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(5): 272-276. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.05.049.
- [27] 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. DOI:10.3969/j.issn.1000-9787.2007.09.020.
- [28] 邹小波, 赵杰文, 潘胤飞, 等. 基于遗传RBF网络的电子鼻对苹果质量的评定[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 61-64. DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2005.01.017.
- [29] 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.
- [30] SAEVELS S, LAMMERTYN J, BERNARD A Z, et al. Electronic nose as a non-destructive tool to evaluate the optimal harvest date of apples[J]. Postharvest Biology & Technology, 2003, 30(1): 3-14. DOI:10.1016/S0925-5214(03)00059-0.