

电子鼻结合统计学分析对牛肉中猪肉掺假的识别

张娟, 张申, 张力, 王婧, 丁武*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 利用电子鼻结合统计学分析对掺入猪肉的掺假牛肉进行定性和定量研究。采用平均值法和K均值聚类分析法提取特征值; 通过主成分分析、判别分析进行分析并使用多层感知神经网络进行模式识别; 通过偏最小二乘、多元线性回归和BP神经网络建立定量模型来预测掺假物含量。结果表明: K均值聚类分析法提取的特征值能更全面地反映电子鼻的响应信号, 同时判别分析能更好地对掺假牛肉进行定性检测。多层感知神经网络分析中训练集正确分类率达98.8%, 验证集正确分类率达97.4%, 说明分类结果较好。BP神经网络的决定系数 R^2 (0.999 3、0.993 0) 和均方根误差 (0.90%、2.50%) 明显优于其他两种方法, 故BP神经网络建模分析能更好地预测掺假牛肉中猪肉的含量。说明应用电子鼻技术检测掺入猪肉的掺假牛肉具有一定的可行性。

关键词: 牛肉; 猪肉掺假; 电子鼻; 统计学分析

Recognition of Beef Adulterated with Pork Using Electronic Nose Combined with Statistical Analysis

ZHANG Juan, ZHANG Shen, ZHANG Li, WANG Qian, DING Wu*

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

Abstract: Adulterated beef mixed with pork was qualitatively and quantitatively studied by using an electronic nose combined with statistical analysis. The feature values were extracted by cluster analysis and mean value method. Principal component analysis (PCA) and linear discriminant analysis (LDA) were used for qualitative analysis. Quantitative models were established by partial least squares (PLS), multivariate linear regression (MLR) and BP neural network (BPNN) to quantitatively predict pork adulteration in beef. The results showed that the characteristic value extracted by cluster analysis could reflect the response signal of the electronic nose more comprehensively, while LDA was more suited for qualitatively detecting adulterated beef. The correct classification rates for the training and verification sets were 98.8% and 97.4%, respectively in the multi-layer perceptron neural network analysis, indicating that the classification results are good. The coefficient of determination (0.999 3 and 0.993 0) and root mean square error (0.90% and 2.50%) of the BPNN model were significantly better than those of the other models. Thus, the BPNN model allowed better prediction of the content of pork in adulterated beef. These results conclusively show that an electronic nose is an feasible approach for the detection of adulterated beef mixed with pork.

Keywords: beef; pork adulteration; electronic nose; statistical analysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201804044

中图分类号: TS251.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 04-0296-05

引文格式:

张娟, 张申, 张力, 等. 电子鼻结合统计学分析对牛肉中猪肉掺假的识别[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 296-300.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201804044. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Juan, ZHANG Shen, ZHANG Li, et al. Recognition of beef adulterated with pork using electronic nose combined with statistical analysis[J]. Food Science, 2018, 39(4): 296-300. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201804044. <http://www.spkx.net.cn>

牛肉味道鲜美、营养价值丰富, 深受消费者的喜爱, 具有“肉中骄子”的美称^[1]。随着人们膳食结构的不断

科学化, 牛肉也受到越来越多的消费者和营养学家的青睐, 随之而来的食品安全问题也受到广泛关注^[2]。市场

收稿日期: 2017-01-16

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0401500)

第一作者简介: 张娟 (1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为畜产品深加工及安全控制。E-mail: zhangjimu@163.com

*通信作者简介: 丁武 (1971—), 男, 教授, 博士, 研究方向为畜产品深加工及安全控制。E-mail: dingwu10142000@163.com

上将便宜的肉类掺入牛肉中,经过一定的加工处理制成掺假牛肉的现象并不罕见。掺假牛肉的方式多种多样,现有报道中常见牛肉掺假的掺假源有猪肉、鸭肉、马肉以及动物内脏等。随着牛肉需求量的不断增加,我国牛肉市场出现供不应求的状况,而进口牛肉价格较高,并且通过增加进口来弥补供给不足的问题在较短时间内不能够满足中国的市场需要,因此牛肉掺假现象层出不穷。猪肉是人们广泛食用的肉类之一,其生鲜肉价格比牛肉低一两倍,市场供应也比较充足。且肉质品质与牛肉具有一定的相似性,经过加工后肉眼很难鉴别。所以猪肉成了牛肉掺假的主要掺假源。此举严重危害消费者的健康安全,阻碍牛肉食品市场的健康发展。因此,亟需一种快速准确的检测方法检测牛肉制品中不同的掺假来源。

目前肉制品安全检测的技术主要有光谱学技术^[3-5]、色谱和质谱技术^[6-8]、DNA分析技术^[9-11]、免疫学技术^[12-13]、感官评定法等。虽然方法众多,但是这些方法很多都存在一定的缺点:耗时长,样品预处理复杂,需要专业技术人员操作,无法实现快速检测等^[14-15]。电子鼻作为一种仿生检测系统,有着操作简单、快速、准确和无损的特点,不仅在环境监测方面得到越来越多的应用,也被应用到食品安全检测方面,如在肉制品新鲜度、食用油、乳制品及酒类掺假等方面^[16-30]。总体来说在牛肉加工生产中,电子鼻作为一种快速无损检测工具具有很大的发展前景^[31]。本研究将猪肉与牛肉按不同比例混合制成掺假牛肉。以电子鼻检测系统为无损快速检测手段,结合统计学分析方法,采用K均值聚类分析法和平均值法提取特征值;通过主成分分析(principal component analysis, PCA)和判别分析(linear discriminant analysis, LDA)进行定性分析;使用偏最小二乘(partial least square, PLS)、多元线性回归(multi-linear regression, MLR)和BP神经网络(BP neural network, BPNN)建模的方法建立定量预测模型预测掺假物的含量,以此找到电子鼻最佳数据处理方法。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牛后腿肉和猪里脊肉购自当地超市,放入4℃环境中保存;PEN3电子鼻(含10个金属氧化物传感器阵列、各传感器的名称及性能描述见表1)德国Airsense公司。

表1 PEN3电子鼻传感器名称及性能描述

Table 1 Sensors and their applications in electronic nose (PEN3)

序号	传感器	性能描述	参照物质
S1	W1C	芳香族化合物	甲苯, 10×10^{-6}
S2	W5S	检测物质范围广,灵敏度较高,氮氧化合物等	NO_2 , 1×10^{-6}
S3	W3C	芳香族化合物以及氨气	苯, 10×10^{-6}
S4	W6S	氢气	H_2 , 100×10^{-6}
S5	W5C	烷烃、芳香族化合物和弱极性的化合物	丙烷, 1×10^{-6}
S6	W1S	对甲烷较为敏感,响应物质较广	CH_4 , 100×10^{-6}
S7	W1W	含硫化合物、萜烯类以及吡嗪类化合物	H_2S , 1×10^{-6}
S8	W2S	乙醇以及部分芳香族化合物	CO , 100×10^{-6}
S9	W2W	芳香族化合物和含硫有机化合物	H_2S , 1×10^{-6}
S10	W3S	检测较高浓度物质($>100 \times 10^{-6}$), 主要对甲烷响应较强	CH_4 , 100×10^{-6}

1.2 方法

1.2.1 样品的制备

将牛后腿肉和猪里脊肉分别绞碎成肉泥,按0%、20%、40%、60%、80%、100%的比例将猪肉分别加入到牛肉中搅拌均匀,放入自封袋中制备成掺假牛肉。实验共进行3次,每次实验中不同掺假比例的样品做20个平行,以掺假20%猪肉样品的掺假牛肉为例,实验过程中取160 g牛肉糜和40 g猪肉糜,完全混合均匀,放入真空袋中,于4℃冰箱中放置24 h,测试时每个样品称取10 g放入集气瓶中,在常温25℃环境下进行电子鼻检测。

1.2.2 电子鼻检测

打开电子鼻系统,设定在预实验中优化所得的参数:电子鼻检测时间为1 min,冲洗时间为5 min,检测前对电子鼻系统清洗30 min。将样品放置至室温后,每个平行按照10 g样品分装到集气瓶中,每个平行在室温环境中顶空集气30 min,之后按照电子鼻操作及工作过程进行检测。

1.2.3 特征值的提取

平均值法提取电子鼻响应信号:检测样品后对每个样品中53~57 s的响应信号(响应信号稳定)提取平均值,作为该样品的电子鼻响应信号的特征值,取3次实验的平均值进行数据处理和分析。

K均值聚类分析法提取电子鼻响应信号:检测样品后对每个样品1~60 s的响应信号进行聚类分析,通过K均值聚类分析得到最终聚类中心作为此样品的特征值,取3次实验的平均值进行数据的处理与分析。

1.3 数据处理

数据处理软件分别是SPSS 20.0和Minitab 19.0以及JMP。

2 结果与分析

2.1 传感器信号曲线

以电子鼻传感器对牛肉中掺入猪肉的响应信号为研究对象,提取10个传感器第50秒的响应值,取平均值进行分析。如图1所示,S2和S7号传感器响应值最大;

随着掺假比例的增加, S2、S3和S7号传感器的响应值降低, S8号传感器的响应值增大, S4和S9号传感器的响应值几乎没变化; 因此, 能够鉴别掺假的传感器有S2、S3、S5、S7和S8。从图1可以看出, 响应值差异性最明显的是S2和S7两个传感器, 表明电子鼻定性检测掺假牛肉主要依据S2和S7两个传感器响应值的变化差异。根据表1中电子鼻10个不同传感器检测的挥发性气体的不同, S2传感器主要是对氮氧化合物的敏感, 而S7传感器主要是对无机硫化物、含硫有机物以及萜烯类、吡嗪类化合物敏感, 而牛肉中的挥发性成分中含氮、硫的有机物较多, 因此初步判定, 能够区别牛肉和掺假牛肉的挥发性成分主要包括氮氧化物还有萜烯类化合物, 吡嗪类化合物。

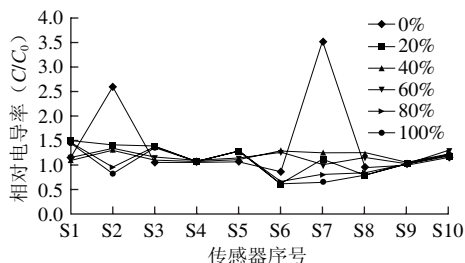


图1 传感器信号响应值折线图

Fig. 1 Radar plot of sensor response signals

2.2 PCA与LDA结果

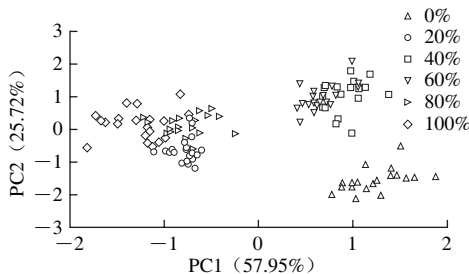


图2 平均值法提取的特征值PCA

Fig. 2 Principal component analysis of the feature data extracted by average value method

如图2所示, PC1方差贡献率为57.95%, PC2的方差贡献率为25.72%, 合计为83.67%。掺假比例为60%和80%的有较大重叠, 80%和100%的也有重叠, 且每个掺假比例组的落点分散。这是由于掺假比例接近的组分, 其挥发性成分氮、硫及萜烯类、吡嗪类化合物含量比较接近。由图平均值法提取特征值只能检测区分牛肉是否掺假, 并不能很好地区分出不同的掺假比例。

如图3所示, PC1的方差贡献率为50.96%, PC2的方差贡献率为28.42%, 合计为79.38%。可以看出除了40%和60%的掺假比例有少量的重叠外, 其他掺假比例都能很好地区分, 且每个掺假比例的落点相对集中。

K均值聚类分析法提取的特征值通过PCA能更好地区分掺假牛肉。

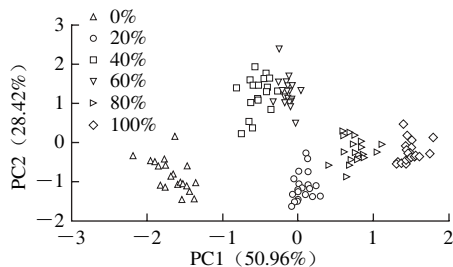


图3 K均值聚类分析法提取的特征值PCA

Fig. 3 Principal component analysis of the feature data extracted by K-mean cluster analysis

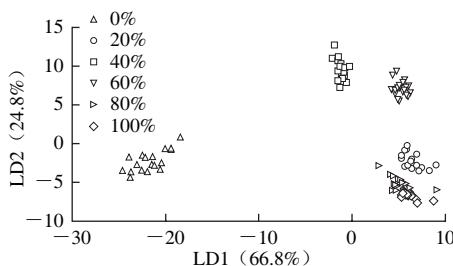


图4 均值法提取的特征值LDA

Fig. 4 Linear discriminant analysis of the feature data extracted by average value method

如图4所示, LD1的方差贡献率为66.8%, LD2的方差贡献率为24.8%, 合计为91.6%。除80%与100%掺假比例(猪肉样品)组仍有部分重叠外, 其他掺假比例组能很好地区分, 且每组的数据相对集中。说明平均值法提取的特征值通过LDA在0%~80%范围内能很好地区分不同比例的掺假牛肉。

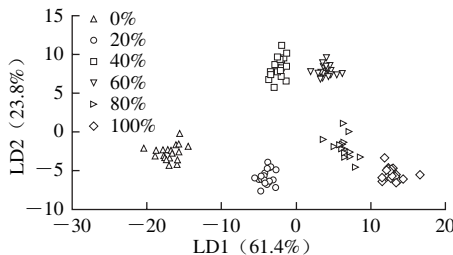


图5 K均值聚类分析法提取的特征值LDA

Fig. 5 Linear discriminant analysis for the data extracted by K-mean cluster analysis

如图5所示, LD1的方差贡献率为61.4%, LD2的方差贡献率为23.8%, 合计为85.2%。每个掺假比例都能很明显地区分开, 从LD1增加的方向, 掺假比例增大, 且每个掺假比例组的落点都比较集中。说明K均值聚类分析法提取的特征值通过LDA不仅能有效地鉴别出掺入猪肉

的掺假牛肉,而且能很好地区分不同比例中挥发性成分氮、硫及萜烯类、吡嗪类化合物的含量进而区别出不同的掺假比例。通过对比PCA与LDA得出,LDA结合电子鼻检测掺假牛肉能更好地定性分析。

2.3 多层感知神经网络

表2 平均值法提取特征值多层感知神经网络分类结果
Table 2 Results of classification by MLPN with average value method

样品	掺假比例/%	分类结果						正确分类率/%
		0%	20%	40%	60%	80%	100%	
训练集	0	16	0	0	0	0	0	90.1
	20	0	15	0	0	0	1	
	40	0	0	9	1	0	0	
	60	0	0	0	14	0	0	
	80	0	0	0	0	9	5	
	100	0	1	0	0	0	10	
测试集	0	4	0	0	0	0	0	87.2
	20	0	4	0	0	0	0	
	40	1	0	9	0	0	0	
	60	0	0	0	6	0	0	
	80	0	0	0	0	4	2	
	100	0	0	0	0	2	7	

如表2所示,训练集中有7个样品被误判到其他掺假组中,正确分类率为90.1%;测试集中有5个样品被误判到其他掺假组中,正确分类率为87.2%。造成多层感知神经网络对K均值聚类分析法提取特征值的分类结果如表3所示,训练集中有一个样品被误判到其他组,其正确分类率达到98.8%;测试集中有一个样品被误判到其他掺假比例组,其正确分类率达到97.4%。

表3 K均值聚类分析法提取特征值多层感知神经网络分类结果
Table 3 Results of classification by MLPN with K-mean cluster analysis

样品	掺假比例/%	分类结果						正确分类率/%
		0%	20%	40%	60%	80%	100%	
训练集	0	16	0	0	0	0	0	98.8
	20	0	16	0	0	0	0	
	40	0	0	9	0	0	0	
	60	0	0	0	15	0	0	
	80	0	0	0	0	12	1	
	100	0	0	0	0	0	12	
测试集	0	4	0	0	0	0	0	97.4
	20	0	4	0	0	0	0	
	40	0	0	10	0	0	0	
	60	0	0	0	5	0	0	
	80	0	0	0	0	7	0	
	100	0	0	0	0	1	7	

表4 平均值法与K均值聚类分析分类结果对比
Table 4 Comparative results of classification with average value method and K-mean cluster analysis

提取特征值方法	验证集正确率/%	训练集正确率/%
K均值聚类分析法	98.8	97.4
平均值法	90.1	87.2

从表4可看出,K均值聚类分析提取特征值的训练集和测试集的正确分类率均高于平均值法,且能很好地对不同的组分进行分类,说明K均值聚类分析法能更好地提取不同掺假比例的响应信号。结合LDA与PCA得到的效果,K均值聚类分析法能更好地鉴别区分掺入不同比例猪肉的掺假牛肉。因此为了更好地定量分析预测掺假牛肉中掺假物的含量,使用K均值聚类分析法提取的特征值进行建模分析。

2.4 牛肉中猪肉含量的快速预测模型的建立

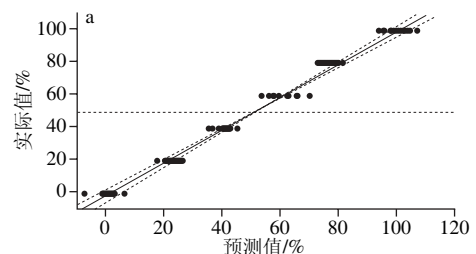
使用BPNN、PLS和MLR建立电子鼻相应信号与牛肉中掺入猪肉比例的关系,使用3种数据统计方法对经过K均值聚类分析得到的特征值进行回归分析。随机选取90(15×6)个数据作为预测集,30(5×6)个数据作为验证集。所拟合的模型以均方根误差(root mean square error, RMSE)和决定系数 R^2 为判断标准进行判别。RMSE越小, R^2 越大,则模型效果较好。

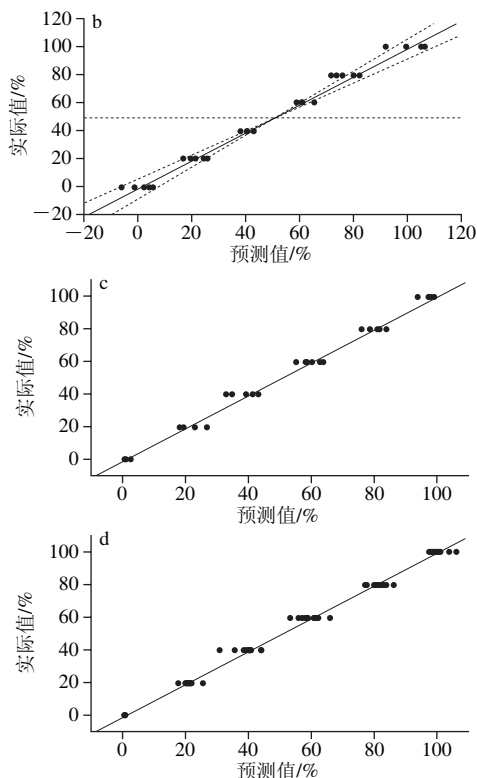
表5 3种预测模型对掺假牛肉中猪肉含量预测模型对比

方法	建模集		验证集	
	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%
BPNN	0.999 3	0.90	0.993 0	2.50
MLR	0.983 7	4.55	0.978 1	5.21
PLS	0.982 3	4.56	0.978 4	5.20

多元线性回归分析建立的电子鼻响应值与掺假牛肉中猪肉的含量关系预测模型为:掺假牛肉中猪肉含量 $Y = -1.90 + 0.831S_1 - 0.166S_2 - 0.321S_3 + 0.031S_4 + 1.49S_5 + 0.0514S_6 + 0.0541S_7 - 0.223S_8 + 0.103S_9 + 0.099S_{10}$ (Y 为预测掺假比例, $S_1 \sim S_{10}$ 为10根传感器的响应值)如表5所示,3种建模方法得到的RMSE均低于4.56%, R^2 均高于0.978,表明预测效果均较好,其中,MLR和PLS的建模集RMSE分别为4.55%和4.56%, R^2 分别为0.983 7和0.982 3,基本相近表明PLS和MLR都具有较好的预测能力。BPNN建模集的RMSE为0.90%, R^2 为0.999 3,2个判断指标明显优于其他2种方法,具有更好的建模预测效果。

从图6可知,BPNN预测值落点比PLS的预测值更加集中,更接近于实际值。说明BPNN建立的预测模型对掺假牛肉中掺入猪肉含量预测更加准确。





a. PLS建模集; b. PLS预测集; c. BPNN建模集; d. BPNN预测集。

图6 不同处理的建模集和预测集

Fig. 6 Comparison between actual values and predicted values from PLS and BPNN for calibration and prediction sets

3 结论

PCA、LDA及多层感知神经网络分析说明, K 均值聚类分析法能更全面地提取电子鼻的响应信号来鉴别区分不同比例的掺假牛肉, 同时使用LDA能更好地对掺假牛肉进行定性检测。通过建模分析可得, BPNN建模分析方法能够更好的预测掺假牛肉中猪肉的含量。本实验建立模型时所用的样品量小, 在实际生产中, 样品量要远大于实验中的样品量, 因此, 模型应用于实际时还需要进一步的探索。

参考文献:

- [1] 麻海峰, 常征, 杨光辉, 等. 牛肉的营养价值及排酸、速冻工艺研究[J]. 农业科技与装备, 2010(7): 34-36. DOI:10.3969/j.issn.1674-1161.2010.07.011.
- [2] 白跃宇, 张震, 谭旭信, 等. 我国牛肉质量追溯体系研究现状和存在问题[J]. 中国草食动物科学, 2012, 32(5): 75-78. DOI:10.3969/j.issn.2095-3887.2012.05.024.
- [3] 孙淑敏, 郭波莉, 魏益民, 等. 近红外光谱指纹分析在羊肉产地溯源中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 937-941. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2011)04-0937-05.
- [4] MORSY N, SUN D W. Robust linear and non-linear models of NIR spectroscopy for detection and quantification of adulterants in fresh and frozen-thawed minced beef[J]. Meat Science, 2013, 93(2): 292-302. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.09.005.
- [5] KAMRUZZAMAN M, SUN D W, ELMASRY G, et al. Fast detection and visualization of minced lamb meat adulteration using NIR hyperspectral imaging and multivariate image analysis[J]. Talanta, 2013, 103(2): 130-136.
- [6] 何玮玲, 黄明, 张驰. 食品中肉类成分鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(3): 304-307.
- [7] 谢功均, 卢晶晶, 吴翼飞. 液相色谱-质谱联用技术在低温肉制品检测中的应用[J]. 肉类工业, 2010(7): 41-44. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2010.07.014.
- [8] GIARETTA N, DI G A, LIPPERT M, et al. Myoglobin as marker in meat adulteration: a UPLC method for determining the presence of pork meat in raw beef burger[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 1814-1820. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.04.124.
- [9] 张驰, 邱皓璞, 张筠. 荧光定量PCR检测肉制品中鸭源性成分[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 154-157. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201318031.
- [10] 杨丽霞, 宋涛平, 谢晓红, 等. SYBR Green I 实时PCR技术鉴定鸭源性成分的研究[J]. 中国农学通报, 2013(11): 16-19. DOI:10.3969/j.issn.1000-6850.2013.11.004.
- [11] SOARES S, AMARAL J S, MBPP O, et al. A SYBR green real-time PCR assay to detect and quantify pork meat in processed poultry meat products[J]. Meat Science, 2013, 94(1): 115-120. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.12.012.
- [12] 马永征, 马冬, 白婉斯, 等. 免疫学检测肉类制品掺假研究进展[J]. 肉类研究, 2012, 26(9): 26-29.
- [13] 张占军, 王富花. 酶联免疫吸附技术及其在食品安全检测中的应用[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(1): 157-160. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2011.01.045.
- [14] 高敬, 魏迪, 张葵荣, 等. 常见肉类鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 356-360. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201411068.
- [15] 冯永巍, 王琴. 肉类掺假检验技术研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(4): 237-240. DOI:10.3969/j.issn.1003-5788.2013.04.058.
- [16] 关键, 张小丽. 电子鼻技术[J]. 中国科技术语, 2014(增刊1): 137-138; 142. DOI:10.3969/j.issn.1673-8578.2014.z1.053.
- [17] 田晓静, 王俊, 崔绍庆. 电子鼻快速检测区分羊肉中的掺杂鸡肉[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 2997-3001.
- [18] 任静, 孙方达, 程龙, 等. 电子鼻技术研究不同包装调理预制烤猪肉冷却贮藏过程中品质的变化[J]. 肉类研究, 2016, 30(5): 30-35. DOI:10.15922/j.cnki.rlyj.2016.05.007.
- [19] 王亚雷, 贾文坤, 潘立刚, 等. 电子鼻技术在肉类品质应用中快速分析初探[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 419-424.
- [20] 潘磊庆, 唐琳, 詹歌, 等. 电子鼻对芝麻油掺假的检测[J]. 食品科学, 2010, 31(20): 318-321.
- [21] 贾茹, 刘占东, 马利杰, 等. 电子鼻对山羊奶中致瘤游离脂肪酸的识别研究[J]. 中国乳品工业, 2015, 43(3): 18-21. DOI:10.3969/j.issn.1001-2230.2015.03.005.
- [22] 马利杰, 贾茹, 杨春杰, 等. 基于电子鼻技术对羊奶粉中掺假牛奶粉的快速检测[J]. 中国乳品工业, 2014, 42(11): 47-50. DOI:10.3969/j.issn.1001-2230.2014.11.012.
- [23] 于慧春, 王俊. 电子鼻技术在茶叶品质检测中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(5): 748-752. DOI:10.3969/j.issn.1004-1699.2008.05.009.
- [24] NURJULIANA M, CHE M Y, MAT H D, et al. Rapid identification of pork for halal authentication using the electronic nose and gas chromatography mass spectrometer with headspace analyzer[J]. Meat Science, 2011, 88(4): 638-644. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.02.022.
- [25] OMATU S, YANO M. E-Nose system by using neural networks[J]. Neurocomputing, 2016, 172: 394-398. DOI:10.1016/j.neucom.2015.03.101.
- [26] NORMAN A, STAM F, MORRISSEY A, et al. Packaging effects of a novel explosion-proof gas sensor[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2003, 95(1/2/3): 287-290. DOI:10.1016/s0925-4005(03)00541-0.
- [27] YOUNG R C, BUTTNER W J, LINNELL B R, et al. Electronic nose for space program applications[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2003, 93(1/2/3): 7-16. DOI:10.5220/0005628204070414.
- [28] VESTERGAARD J S, MARTENS M, TURKKI P. Analysis of sensory quality changes during storage of a modified atmosphere packaged meat product (pizza topping) by an electronic nose system[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(6): 1083-1094. DOI:10.1016/j.lwt.2006.06.009.
- [29] 谢安国, 王金水, 渠琛玲, 等. 电子鼻在食品风味分析中的应用研究进展[J]. 农产品加工: 学刊, 2011(1): 71-73. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646(X).2011.01.021.
- [30] 孟鑫, 姚晓蕾, 尚宏丽, 等. 应用电子鼻检测内源性脂肪酶作用猪肉风味的变化[J]. 食品工业科技, 2016, 37(5): 292-297. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.05.050.
- [31] 张晓敏. 电子鼻在食品工业中的应用进展[J]. 中国食品添加剂, 2008(2): 52-56. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2008.02.013.