

# 电子鼻对不同品牌食醋的识别

宋小青, 李淑娴, 额日赫木

(山西师范大学食品科学学院, 山西临汾 041000)

**摘要:**以东湖陈醋、水塔米醋、海天白米醋、恒顺香醋、水塔陈醋、紫林陈醋六种食醋为实验材料, 利用电子鼻技术对其挥发性成分进行检测, 采用径向基函数神经网络和 Fisher 判别建立其预测模型。结果表明: 传感器 S7、S3 对六种样品的响应值差异显著 ( $p < 0.05$ ), 即六种食醋的硫化氢、氨类物质的含量差异显著 ( $p < 0.05$ )。同时线性判别分析比主成分分析能更好地区分不同品牌的食醋。Fisher 判别和径向基函数神经网络模型均能较好地预测不同品牌的食醋, 但 Fisher 判别的效果更好, 对六种食醋的正确判别率均为 100%。由此说明利用电子鼻技术能实现食醋种类的快速识别, 以维护食醋品牌的名誉和规范市场。

**关键词:**电子鼻, 食醋, 品牌

## Identification of different brands of vinegar by electronic nose

SONG Xiao-qing, LI Shu-xian, Erihemu

(College of Food Science, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China)

**Abstract:** The electronic nose was used to measure the volatile compounds of different vinegars, including Eastlake vinegar, Shuita rice vinegar, Haitian rice vinegar, Hengshun aromatic vinegar, Shuita mature vinegar and Zilin mature vinegar. The radial basis function (RBF) neural network and Fisher discriminant were applied to predict different brands of vinegar. The results showed that the response values of sensors S7 and S3 changed significantly ( $p < 0.05$ ) among different samples. That meant the contents of ammonia and hydrogen sulfide had significant differences among six kinds of vinegar. Moreover, linear discriminant analysis could better distinguish different brands of vinegar than principal component analysis. Both Fisher discriminant and RBF were able to predict different brands of vinegar. In contrast, Fisher discriminant had more accurate prediction. The correct discriminant rate of Fisher model was 100%. Therefore, the electronic nose could identify the brands of vinegar, maintain the brand reputation of vinegar and regulate the market.

**Key words:** electronic nose; vinegar; brand

中图分类号: TS264

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)09-0277-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.09.044

食醋酸味柔和, 是我国传统的调味品之一, 不仅含有丰富的营养成分, 而且具有美容护肤、抗疲劳、降血压等多种保健功效<sup>[1-3]</sup>。食醋在生产过程中, 原料中含有的营养物质在微生物菌株和酶的共同发酵下, 通过分解、氧化、转化等一系列生物化学反应生成了赋予食醋独特风味的物质<sup>[4-5]</sup>。食醋风味的差异主要取决于原料和生产工艺, 目前仍无法通过感官检验予以区分。一些不法商贩借此以假充真或以次充好, 欺瞒消费者<sup>[6]</sup>, 因此有必要研发一种快速辨别食醋种类的技术, 以规范市场的正常秩序。

近年来, 电子鼻无损检测技术在苹果<sup>[7]</sup>、香蕉<sup>[8]</sup>、酱油<sup>[9]</sup>等食品检测中得到了广泛应用。赵国群<sup>[10]</sup>等发现电子鼻能很好地区分鸭梨和雪梨果醋, 可用于监控梨醋的风味品质。Yin<sup>[11]</sup>等研究表明, 电子鼻和主成分分析结合能很好区分果醋、香醋和陈醋。何计龙<sup>[12]</sup>等人发现电子鼻能较好地分配制食醋、酿造食醋。Zhang<sup>[13]</sup>等利用电子鼻结合学习矢量量化

神经网络对食醋的种类进行了识别, 正确判别率仅为 72.1%。朱娜<sup>[14]</sup>等通过电子鼻和 Fisher 判别结合建立的回归函数对 3 种病原菌灰霉、扩展青霉和根霉及对对照组的判别正确率分别为 100%、93.3%、86.7% 和 100%。综上所述, 目前电子鼻对食醋种类的判别存在建模方法较为单一, 样本量较少等不足。

因此本实验利用电子鼻对六种常见食醋的香气成分检测, 采用主成分分析和线性判别分析进行分析, 同时利用 Fisher 判别分析和径向基函数神经网络建立其判别模型, 以实现食醋种类的快速无损检测。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与仪器

实验用的 6 种食醋均购自山西临汾的大型超市, 包括陈醋、米醋、香醋、白醋四类样品, 分别是水塔陈醋、水塔米醋、海天白米醋、紫林陈醋、东湖陈醋、恒顺香醋, 分别用 STA、STB、HT、ZL、DH、HS 表示。6 种食醋的基本信息见表 1。

收稿日期: 2016-10-28

作者简介: 宋小青 (1988-), 女, 硕士, 助教, 主要从事果蔬贮藏与加工的研究, E-mail: qing4066@126.com。

表1 食醋样品的基本信息  
Table 1 The details of vinegar samples

名称	原料与辅料	总酸 (g·100 <sup>-1</sup> mL)	发酵方式	产地
东湖老陈醋	水、高粱、大麦、豌豆、麸皮、谷糠、食用盐、苯甲酸钠	≥4.50	固态发酵	山西
水塔米醋	水、大米、食用盐、白砂糖、谷氨酸钠、焦糖色、苯甲酸钠	≥3.50	液态发酵	山西
海天白米醋	水、食用酒精、大米、食用盐	≥3.5	液态发酵	佛山
恒顺香醋	水、糯米、麦麸、白砂糖、食用盐	≥4.50	固态发酵	镇江
水塔陈醋	水、高粱、麸皮、大麦、豌豆、食用盐、焦糖色、苯甲酸钠	≥4.00	固态发酵	山西
紫林陈醋	水、高粱、麸皮、谷壳、稻壳、大麦、豌豆、食用盐、香辛料、食品添加剂	≥3.50	固态发酵	山西

采用德国 Aisense 公司 PEN3 型便携式电子鼻, 包含 S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S8、S9、S10 共 10 个金属氧化物传感器阵列, 分别代表芳香苯类、氮氧化物、氨类、氢气、烷烃、甲烷、硫化氢、乙醇、有机硫化物、芳香烷烃。

## 1.2 实验方法

样品的测定参考乔艳霞<sup>[15]</sup>等人的方法。吸取 5 mL 稀释 5 倍的食用醋样品, 置于 30 mL 样品瓶中, 密封平衡 30 min, 采用顶空抽样的方法进行检测。电子鼻测定的参数设置: 样品测定间隔 1 s, 检测时间为 80 s, 传感器清洗时间为 240 s, 流速为 300 mL/min。每种食醋样品采集 30 个样本, 共得到 180 个样本。

## 1.3 数据处理与统计分析

实验结果由 SPSS 19.0 软件对数据进行主成分分析 (PCA)、线性判别分析 (LDA)、Fisher 判别分析和径向基函数分析 (RBF)。PCA 是将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量的一种多元统计方法, 又称主分量分析。其基本方法就是将原来众多具有一定相关性的变量, 重新组合成一组新的互相无关的综合指标来代替原来的指标<sup>[16]</sup>。一般情况下, 主成分的累积贡献率达到 85% 以上才能代替原有的指标。LDA 也叫 Fisher 线性判别分析, 是一种常规的模式识别和样品分类方法。它的基本思想通过投影将原始数据映射到另一个更低维的方向, 使得投影后组与组之间尽可能地分开, 而同一组内的关系更加密切<sup>[17]</sup>。从 6 种食醋样品分别随机抽取 25 个共 150 个样品作为训练集用于建立 Fisher 判别模型, 剩余的 30 个样品作为检验集, 用于对所建模型进行测试。RBF 神经网络是一种单隐层前馈网络, 是由输入层、隐含层和输出层构成的多层神经网络。本实验预建立 3 层 RBF 神经网络, 分别为输入层、隐含层、输出层。输入层为 10 个传感器的响应值, 因此 RBF 神经网络的输入层单元数为 10, 输出层单元数为 6, 即 1、2、3、4、5、6 分别代表 STB、STA、DH、ZL、HT、HS。隐含层、输出层函数以及隐含层单元数由软件自动计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 电子鼻对食醋香气成分响应

电子鼻 10 个传感器的电阻比变化如图 1 所示。图 1 可见, 随着检测时间的延长, 香气成分不断地在传感器表面富集, 传感器 S7、S9、S2 的电阻比迅速增大, 达到最大值后, 逐渐下降, 在 50 s 趋于平缓, 达到

一个稳定的状态, 因此选取 55 s 的数据用于分析。而其他传感器对食醋香气成分的响应值偏低, 变化曲线比较平缓。图 1 可见, 电子鼻对食醋挥发性成分有明显的响应, 且每一个传感器对食醋的响应存在很大的差异, 说明利用 PEN3 电子鼻检测食醋的香气成分的变化是可行的。

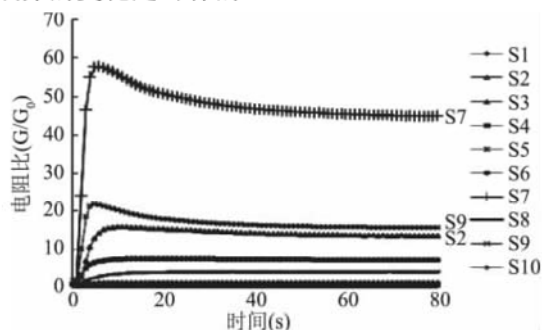


图1 电子鼻传感器对食醋香气成分的响应

Fig.1 Response of sensor arrays to vinegar

### 2.2 电子鼻对不同食醋香气成分的响应

表 2 可见, 电子鼻传感器对不同样品的响应值存在差异, 进一步说明电子鼻能区分不同的食醋样品。传感器 S7、S3 对六种样品的响应值差异显著 ( $p < 0.05$ ), 说明六种食醋的硫化物、氨类物质的含量差异明显。除传感器 S9 外, STA、DH、ZL 的传感器响应值均有显著性差异, 说明三者的挥发性成分含量差异显著。除 STB 和 DH 外, 传感器 S2 对四种食醋的响应值均差异显著 ( $p < 0.05$ ), 说明 STA、ZL、HT、HS 的氮氧化物含量有显著性差异。STA 和 STB 在传感器 S4 的响应没有显著性差异, 而其他四种食醋均有显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 说明 HT、ZL、DH、HS 的氢气含量有显著性差异。除传感器 S1、S5、S8, HS 在其他传感器的响应值与五种食醋样品均有显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 说明 HS 的香气成分与其他样品差异较大。STB、HT 的 10 个传感器均有显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 说明两者的挥发性成分含量差异明显。

### 2.3 不同食醋的 PCA 和 LDA 分析

PCA 和 LDA 对电子鼻响应值的分析结果如图 2 所示。图 2A 所示, 主成分 PC1 贡献率为 62.38%, 主成分 PC2 贡献率为 18.38%, 总贡献率为 80.76%, 不能代表样品的主要信息, 且六种食醋的分布比较集中, 除水塔米醋外, 其他五种食醋之间均有部分重叠, 说明 PCA 分析不能很好地区分同种类的食醋。

表2 电子鼻传感器对不同食醋香气成分响应  
Table 2 Response of sensor arrays to different vinegars

传感器响应值	食醋种类					
	STB	STA	DH	ZL	HT	HS
S1	0.667 ± 0.020 <sup>a</sup>	0.717 ± 0.009 <sup>b</sup>	0.729 ± 0.014 <sup>c</sup>	0.697 ± 0.011 <sup>d</sup>	0.726 ± 0.019 <sup>e</sup>	0.704 ± 0.011 <sup>d</sup>
S2	7.907 ± 0.739 <sup>a</sup>	10.442 ± 1.026 <sup>b</sup>	8.178 ± 0.706 <sup>a</sup>	14.055 ± 1.352 <sup>c</sup>	6.888 ± 0.538 <sup>d</sup>	15.129 ± 0.991 <sup>e</sup>
S3	0.762 ± 0.016 <sup>a</sup>	0.801 ± 0.006 <sup>b</sup>	0.825 ± 0.009 <sup>c</sup>	0.792 ± 0.008 <sup>d</sup>	0.807 ± 0.016 <sup>e</sup>	0.786 ± 0.008 <sup>f</sup>
S4	1.040 ± 0.017 <sup>a</sup>	1.030 ± 0.070 <sup>a</sup>	1.080 ± 0.027 <sup>b</sup>	1.063 ± 0.007 <sup>c</sup>	0.983 ± 0.012 <sup>d</sup>	1.099 ± 0.021 <sup>e</sup>
S5	0.909 ± 0.008 <sup>a</sup>	0.926 ± 0.003 <sup>b</sup>	0.935 ± 0.004 <sup>c</sup>	0.922 ± 0.004 <sup>d</sup>	0.929 ± 0.007 <sup>e</sup>	0.920 ± 0.004 <sup>d</sup>
S6	8.831 ± 0.750 <sup>a</sup>	6.653 ± 1.117 <sup>b</sup>	6.370 ± 0.554 <sup>bc</sup>	7.267 ± 0.377 <sup>d</sup>	6.145 ± 0.634 <sup>c</sup>	8.325 ± 0.469 <sup>e</sup>
S7	37.405 ± 3.760 <sup>a</sup>	40.443 ± 5.145 <sup>b</sup>	30.574 ± 3.657 <sup>c</sup>	46.092 ± 4.188 <sup>d</sup>	33.589 ± 2.953 <sup>e</sup>	54.463 ± 3.522 <sup>f</sup>
S8	4.891 ± 0.333 <sup>a</sup>	3.884 ± 0.797 <sup>b</sup>	3.561 ± 0.280 <sup>c</sup>	4.220 ± 0.249 <sup>d</sup>	3.768 ± 0.237 <sup>bc</sup>	4.890 ± 0.228 <sup>a</sup>
S9	16.487 ± 1.781 <sup>a</sup>	15.356 ± 2.278 <sup>b</sup>	12.314 ± 1.667 <sup>c</sup>	16.170 ± 1.934 <sup>ab</sup>	14.079 ± 1.351 <sup>d</sup>	20.077 ± 1.802 <sup>e</sup>
S10	1.416 ± 0.018 <sup>a</sup>	1.335 ± 0.019 <sup>b</sup>	1.399 ± 0.015 <sup>c</sup>	1.412 ± 0.009 <sup>a</sup>	1.325 ± 0.015 <sup>d</sup>	1.367 ± 0.008 <sup>c</sup>

注:表中数值为平均数 ± 标准差 (n = 30), 同一行中不同字母表示有显著性差异 (p < 0.05)。

图 2B 所示, 判别式 LD1 的贡献率为 70.10%, 判别式 LD2 的贡献率为 23.80%, 总贡献率达 93.90%, 说明这两个判别式能代表样品的主要信息。通过 LDA 分析, 六种食醋分布在不同区域, 能很好地被区分开。图 2B 所示, HT 和 STB 距离较近, 可能是由于两者的生产原料、发酵方式相似, 挥发性成分相近所致, 但其含量差异显著(表 2)。STA、DH、ZL 分布的离散, 说明三者的香气成分有很大差异, 这与表 2 的结论相一致。HS 的香气成分与其他样品差异较大, 离其他样品均较远, 这也与表 2 的结论一致。

### 2.4 Fisher 对不同食醋的判别分析

利用 SPSS 对不同食醋进行 Fisher 判别分析。Fisher 判别分析的基本思想是将 k 组 p 维数据投影到某个方向, 使数据的投影组与组之间尽可能分开。本实验以电子鼻的 10 个传感器响应值为自变量, 因变量为 1、2、3、4、5、6 (1、2、3、4、5、6 分别代表 STB、STA、DH、ZL、HT、HS)。表 3 为不同食醋的 Fisher 判别函数。根据表 3 的 5 个判别式函数可以计算出各个样本的具体空间位置, 然后计算样品离不同食醋类别中心的距离, 距离哪个类别最近就判定该样品属于哪种样品。用 Fisher 判别分析对训练集和验证集的判别结果见表 4。

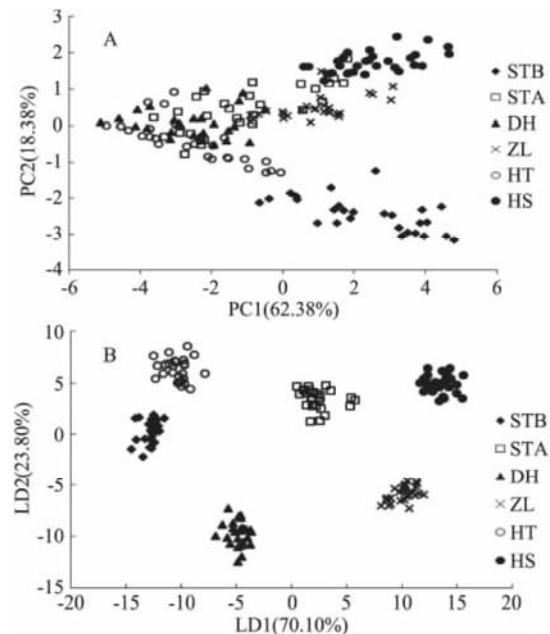


图 2 PCA (A) 和 LDA (B) 分析对不同食醋的区分  
Fig.2 Discrimination of different vinegars by PCA (A) and LDA (B)

表 3 不同食醋的 Fisher 判别函数  
Table 3 The Fisher discriminant function of different vinegars

传感器	函数				
	1	2	3	4	5
1	134.775	355.622	84.223	208.167	48.288
2	2.229	-1.738	-0.135	0.840	-0.706
3	-14.728	-402.308	90.413	-197.451	28.427
4	-0.823	-22.650	22.214	16.649	-14.517
5	-57.826	-29.577	-130.216	74.638	-25.294
6	6.146	-0.674	3.425	1.033	-2.940
7	0.921	0.868	-0.180	-0.971	0.185
8	-8.633	2.334	-5.814	-1.257	3.871
9	-2.567	-0.487	0.860	2.329	0.689
10	-27.493	-39.901	-30.154	33.112	56.209
常量	-19.793	160.472	1.700	-130.343	-101.327

表4可见,训练集150个样品,没有样品被误判,每个类别的正确判别率均为100%,总的正确判别率为100%。检验集30个样品,同样也没有样品被误判,总的正确判别率为100%,其预测结果优于Zhang<sup>[14]</sup>等人和乔艳霞<sup>[15]</sup>等人的电子鼻预测结果,同时也优于Dong<sup>[18]</sup>等人的近红外结果。由此可看出,电子鼻结合Fisher判别能很好地预测不同品牌的食醋。

表4 Fisher判别模型对不同食醋的判别结果  
Table 4 Results of different vinegars predicted by Fisher discriminant model

样品	类型	各类别样品总数	错误个数	判别率(%)
训练集	1	25	0	100
	2	25	0	100
	3	25	0	100
	4	25	0	100
	5	25	0	100
	6	25	0	100
	合计	150	0	100
检验集	1	5	0	100
	2	5	0	100
	3	5	0	100
	4	5	0	100
	5	5	0	100
	6	5	0	100
	合计	30	0	100

### 2.5 RBF对不同食醋的判别分析

经软件运算,得到的最佳参数为:输出层和隐含层函数分别为恒等函数和Softmax,隐含层单位数为8。RBF神经网络模型对训练集和检验集判别结果见表5。表5可见,训练集样品为150,第二类别的正确判别率高达100%;第一和第三类别的正确判别率分别为95.8%、92.3%;第五和第六类别的正确判别率均为88.0%;第四类别的正确判别率最低,为84%;总的正确判别率为91.3%。检验集的样品数为30,总的正确判别率为90.0%,其中第二、第三、第五和第六类别的正确判别率均为100%;第一类别的正确判别率为83.3%;第四类别的正确判别率为60%。由此可见电子鼻结合RBF判别也能很好地预测不同品牌的食醋。

### 3 结论

传感器S7、S3对六种食醋样品的响应值差异显著( $p < 0.05$ ),说明六种食醋的硫化物、氨类物质的含量差异明显。STB、HT由于发酵方式和原料相似,在LDA图中分布比较集中,说明两者的挥发性成分相近,但其含量差异显著。除传感器S9外,STA、DH、ZL的传感器响应值均有显著性差异,说明三种陈醋的挥发性成分含量差异显著。这些结果表明,利用电子鼻能很好地区分不同品牌的食醋。

Fisher判别分析对训练集和验证集样品的正确判别率均为100%;RBF神经网络对训练集样品的正

表5 RBF神经网络对不同食醋的判别结果

Table 5 Results of different vinegars predicted by RBF neural network model

样品	类型	各类别样品总数	错误个数	判别率(%)
训练集	1	24	1	95.8
	2	25	0	100.0
	3	26	2	92.3
	4	25	4	84.0
	5	25	3	88.0
	6	25	3	88.0
	合计	150	13	91.3
检验集	1	6	1	83.3
	2	5	0	100.0
	3	4	0	100.0
	4	5	2	60.0
	5	5	0	100.0
	6	5	0	100.0
	合计	30	3	90.0

确判别率是91.5%,对检验集样品的正确判别率是90.3%。由此可得出,电子鼻结合Fisher判别更适合应用于对食醋品牌的快速鉴别。

下一步的研究应加大建立模型的样品数量,使建立的模型更具有代表性和适用性。

### 参考文献

- [1] Fenaille F, Visani P, Fumeaux R, et al. Comparison of mass spectrometry - based electronic nose and solid phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry technique to assess infant formula oxidation [J]. J Agric Food Chem, 2003, 51: 2790-2796.
- [2] Cevaantunes P M, Bizzo H R, Alves S M, et al. Analysis of volatile compounds of Tapereba (*Spondias mombin* L.) and Caja (*Spondias mombin* L.) by simultaneous distillation and extraction and solid phase microextraction [J]. J Agric Food Chem, 2003, 51 (5): 1387-1392.
- [3] 陈树俊,冯斌,刘诚,等.山西老陈醋多酚提取物抗氧化活性研究 [J]. 食品科学, 2012, 33 (1): 31-34.
- [4] 武斌.山西老陈醋醋酸菌选育与酿醋生产工艺研究 [D]. 太原:山西大学, 2007.
- [5] 周钰欣.五种食醋质量及香味物质特征分析研究 [D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2014.
- [6] Zou X, Li Y, Shi J, et al. Traditional vinegars identification by colorimetric sensor [J]. Procedia Chemistry, 2012, 6: 20-26.
- [7] Hui G, Wu Y, Ye D, et al. Fuji Apple Storage Time Predictive Method Using Electronic Nose [J]. Food Analytical Methods, 2013, 6 (1): 82-88.
- [8] 惠国华,吴玉玲,陈裕泉.基于电子鼻的香蕉储存时间鉴别方法研究 [J]. 传感技术学报, 2012, 25 (5): 566-569.
- [9] 安莹,孙桃.基于电子鼻不同识别模式对不同品牌酱油的区分与识别 [J]. 中国调味品, 2016, (2): 60-64.
- [10] 赵国群,姚瑶,关军锋.鸭梨、雪梨果醋香气成分的电子

(下转第284页)

## 参考文献

[1] Yu H, Tao Y, Chen D, et al. Development of a high performance liquid chromatography method and a liquid chromatography – tandem mass spectrometry method with the pressurized liquid extraction for the quantification and confirmation of sulfonamides in the foods of animal origin [J]. *Journal of Chromatography B*, 2011, 879 (25) :2653–2662.

[2] 张元, 李伟青, 周伟娥, 等. 食品中磺胺类药物前处理及检测方法研究进展 [J]. *食品科学*, 2015, 36 (23) :340–346.

[3] CAC (Codex Alimentarius Commission), 32th session. 2010. MRLs for veterinary drugs in food. Updated at the 32th session of the Codex Alimentarius Commission.

[4] Council Regulation (EEC) No.37/2010 of 22 December 2009 on pharmacologically active substances and their classification regarding maximum residue limits in foodstuffs of animal origin. *Off. J. Eur. Commun. L* 15 (1), 20.1.2010 1 – 72 ( consolidated version up to 12.12.2010, last accessed July 2010).

[5] Veronika V T, Vladimir V A, Aleksei A F, et al. Facile synthesis of magnetic hypercrosslinked polystyrene and its application in the magnetic solid–phase extraction of sulfonamides from water and milk samples before their HPLC determination [J]. *Talanta*, 2016, 152 (15) :203–210.

[6] Jose F H P, Natalia A M, Lucie H, et al. Method optimization and validation for the determination of eight sulfonamides in chicken muscle and eggs by modified QuEChERS and liquid chromatography with fluorescence detection [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2016, 124 (30) :261–266.

[7] 李晓雯, 迟秋池, 夏苏捷, 等. 高效液相色谱–四极杆–飞行时间质谱法检测猪肉中 22 种磺胺类兽药残留 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6 (5) :1736–1742.

[8] 贡松松, 顾欣, 曹慧, 等. 超高效液相色谱–四极杆飞行时间质谱法快速筛查生鲜牛乳中的 14 种磺胺类药物 [J]. *分析测试学报*, 2014, 33 (12) :1342–1348.

[9] 杜玉玲. 磺胺类药物多残留 ELISA 快速检测试剂盒与胶体金免疫层析试纸条的初探 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013:6.

[10] Groff K, Brown J, Clippinger A J. Modern affinity reagents: Recombinant antibodies and aptamers [J]. *Biotechnology Advances*, 2015, 33:1787–1798.

(上接第 280 页)

鼻分析 [J]. *食品工业科技*, 2013, 22:62–65.

[11] Yin Y, Yu H, Chu B, et al. A sensor array optimization method of electronic nose based on elimination transform of Wilks statistic for discrimination of three kinds of vinegars [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 127 (4) :43–48.

[12] 何计龙, 卢亭. 电子鼻对酿造食醋与配制食醋的分辨识别 [J]. *中国调味品*, 2016, 07:132–133 + 137.

[13] Zhang Q, Zhang S, Xie C, et al. Characterization of Chinese vinegars by electronic nose [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2006, 119 (2) :538–546.

[14] 朱娜, 毛淑波, 潘磊庆, 等. 电子鼻对草莓采后贮藏早期

[11] Breaker R R. Natural and engineered nucleic acids as tools to explore biology [J]. *Nature*, 2004, 432:838–845.

[12] Toh S Y, Citartan M, Gopinath S C, et al. Aptamers as a replacement for antibodies in enzyme – linked immunosorbent assay [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 64:392–403.

[13] Chen A, Yang S. Replacing antibodies with aptamers in lateral flow immunoassay [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 71:230–242.

[14] Reinemann C, Freiin Von Fritsch U, Rubolph B S. Generation and characterization of quinolone – specific DNA aptamers suitable for water monitoring [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 77:1039–1047.

[15] Xu J, Li Y, Wang L, et al. A facile aptamer–based sensing strategy for dopamine through the fluorescence resonance energy transfer between rhodamine B and gold nanoparticles [J]. *Dyes Pigments*, 2015, 123:55–63.

[16] 陈丹丹, 辛嘉英, 张兰轩, 等. 纳米金在食品安全检测中的应用 [J]. *食品科学*, 2014, 35 (7) :247–251.

[17] 于黎娟, 糕林海, 唐波. 纳米金光学探针的生物分析应用新进展 [J]. *分析科学学报*, 2010, 26 (6) :719–723.

[18] 戚红卷, 陈雯雯, 岳丽君, 等. 纳米金比色法快速检测水中重金属的研究进展 [J]. *环境化学*, 2013, 32 (1) :21–28.

[19] 刘金钊, 吕珍珍, 陈爱亮. 适配体纳米金比色分析技术研究进展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34 (8) :2040–2046.

[20] Song K M, Jeong E, et al. A coordination polymer nanobelt (CPNB) – based aptasensor for sulfadimethoxine [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 33:113–119.

[21] 曲黎, 魏燕丽, 范淑敏. 纳米金比色法测定多西环素和土霉素 [J]. *化学研究*, 2016, 27 (2) :189–194.

[22] Li H X, Rothberg L J. Label–Free Colorimetric Detection of Specific Sequences in Genomic DNA Amplified by the Polymerase Chain Reaction [J]. *Journal of American Chemical Society*, 2004, 126 (35) :10958–10961.

[23] Maye M M, Han L, et al. Gold and alloy nanoparticles in solution and thin film assembly: spectrophotometric determination of molar absorptivity [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, 496:17–27.

[24] 农业部 958 号公告–12–2007 水产品中磺胺类药物残留量的测定 液相色谱法 [S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2007.

霉菌感染的检测 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (5) :266–273.

[15] 乔艳霞, 李志西, Niamat Ullah, 等. 食醋陈化期电子鼻的监测研究 [J]. *现代食品科技*, 2014, 07:298–305.

[16] 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, 10:158–161.

[17] 江琳琳, 潘磊庆, 屠康, 等. 基于电子鼻对水蜜桃货架期评价的研究 [J]. *食品科学*, 2010, 31 (12) :229–232.

[18] Dong D, Zheng W, Jiao L, et al. Chinese vinegar classification via volatiles using long–optical–path infrared spectroscopy and chemometrics [J]. *Food Chemistry*, 2016, 194:95–100.