

# 生乳、巴氏乳与酸败乳的 电化学识别研究

石磊<sup>1</sup>,曾祥盛<sup>1,2</sup>,彭冬英<sup>3</sup>,黄赣辉<sup>2,\*</sup>

(1.江西出入境检验检疫局 江西南昌 330002;  
2.南昌大学食品科学与技术国家重点实验室 江西南昌 330047;  
3.江西阳光乳业股份有限公司 江西南昌 330043)

**摘要:**阐述了一种以三电极体系为基础,研究溶液体系特性的高性能传感器阵列的设计原理和方法。它涵括了循环伏安法扫描、差分脉冲伏安法扫描、常规脉冲伏安法扫描、多电位阶跃扫描等多种功能等,能够对溶液体系施加多种方式的激发信号,得到多种相应特性,从而实现对溶液的全面分析。对新鲜生乳、熟乳(巴氏乳)、酸败乳溶液进行循环伏安法、脉冲伏安法、多电位阶跃等扫描方法检测,并进行主成分分析表征。研究结果表明,传感器阵列对生乳、熟乳(巴氏乳)、酸败乳有明显的辨别能力,不同的工作电极通过不同的检测方法对乳样有不同的区分力。

**关键词:**三电极体系,传感器阵列,生乳,主成分分析

## Investigation on identification of raw milk, pasteurized and rancid milk with electrochemical method

SHI Lei<sup>1</sup>, ZENG Xiang-sheng<sup>1,2</sup>, PENG Dong-ying<sup>3</sup>, HUANG Gan-hui<sup>2,\*</sup>

(1.Jiangxi Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Nanchang 330002, China;  
2.State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China;  
3.Jiangxi Yangguang Dairy CO.LTD, Nanchang 330043, China)

**Abstract:** Stated the design principle and the method of a high accurate electronic sensors array which was based on a three-electrode structure for solution system characteristics research. This electronic detecting system had many functions such as cyclic voltammetry, differential pulse voltammetry, normal pulse voltammetry, multi-potential steps and so on. It could get solution's characteristics from several actuating signals on solution system by giving multiple applied potential. So that, the solution system could be analyzed roundly. It was used to test the following sample: raw milk, pasteurized milk and rancid milk with cyclic voltammetry, pulse voltammetry, multi-potential steps and sweep-step functions. The collected data was analyzed and expressed by means of principal component analysis(PCA). The result indicated that the electronic sensor array could clearly distinguish raw milk, pasteurized milk and rancid milk. Different working electrode had different discrimination on milk.

**Key words:** three-electrode structure; sensors array; raw milk; principal component analysis(PCA)

中图分类号:TS252.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2011)12-0468-06

随着我国人民生活水平的提高,市场对乳及乳制品的需求量越来越大。近年来,奶牛村、奶牛户不断增加,已基本上解决了我国奶源不足的问题。但是,有些奶农、乳品加工生产厂家出于“提高指标,增加收入”以及“掩盖质量缺陷”的目的<sup>[1]</sup>,进行掺假、掺伪。例如2010年元月,“三聚氰胺”再次引起全社会的关注,事后查明为不法分子故意使用未依法销

收稿日期:2011-08-24 \* 通讯联系人

作者简介:石磊(1963-),女,学士,高级工程师,研究方向:食品质量安全控制。

基金项目:国家质检总局科技计划项目(2010IK149);江西省科技厅2010年度科技攻关项目(2010BSA17300)。

毁的2008年三聚氰胺污染乳粉引起,所幸涉案问题奶粉大多没有进入消费市场;此外,在2010年底出现的动物水解蛋白(HAP)奶也成为消费者关心的一个重要事件。追本溯源,仍是生乳验收程序中掺杂的检测环节存有明显瑕疵。目前乳制品企业对生乳的验收步骤有相对比较固定的模式,主要有酒精实验,随后进行理化实验、发酵实验、细菌总数检测等。酒精实验是目前生乳验收的通用方法,酒精实验合格后,进入后续的常规理化检验,使用的主要仪器包括FOSS ELECTRIC公司的MilkoScan 4000<sup>[2]</sup>乳品分析仪、国内各企业生产的牛奶脂肪分析仪、HPLC<sup>[3]</sup>、PCR<sup>[4]</sup>、“SNAP<sup>®</sup>”抗生素残留检测试剂盒<sup>[5]</sup>等。但是目前常用的乳品检测方法均或多或少带有以下缺

点: 过于专一性、针对性太强、缺乏广谱性; 相对于日新月异的掺杂技术, 具有滞后性; 工作量大、信息归类繁杂、难以综合表达; 检测设备、费用昂贵, 小型企业承担起来比较困难; 而且, 这些费用最终都将转嫁给消费者。我国生乳采收半径大、奶站分布范围广、权属条块分割, 面对这种情况, 开发价格低廉、操作简便的仪器, 将有助于解决生乳掺杂问题, 从而为优质乳制品提供先行保障。根据“交互敏感”的仿生学原理<sup>[6, 18]</sup>, 通过研究生乳的电化学属性, 以标准生乳为参照系, 组建一个包括若干个选择性传感器和若干个非选择性交互感应的传感器组成的传感器阵列, 采用化学计量学方法, 构建一套具有广谱识别能力的生乳掺杂快速检测系统具有重要意义。类似的电子舌技术已在茶叶品质<sup>[7]</sup>、生物发酵<sup>[8]</sup>、酒饮料<sup>[9]</sup>等方面有了较多的应用研究, 并已取得了很大进展。本文根据不同传感器界面电位变化的特点, 使用模式识别的方法解析信息编码以达到对生乳、熟乳与酸败牛乳进行识别判定的传感器阵列的构建和电化学方法的探讨, 进而为生乳掺杂与否的判定系统构建奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

鲜奶 由江西阳光乳业股份有限公司提供; 氯化钾 化学纯, 海展云化工有限公司; 超纯水 ( $18.25\text{M}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ )。

CHI660B 电化学工作站与多通道选通仪 上海辰华仪器有限公司; CHI111Ag/AgCl 参比电极 上海辰华仪器有限公司; 金、铂、银、钨、钛、钯六种惰性贵金属电极作为工作电极以及铂电极作为辅助电极的非选择性传感器阵列。

### 1.2 传感器阵列的构建

1.2.1 电极的选择 大部分电化学研究都是基于三电极系统<sup>[10]</sup>: 包括工作电极(研究电极 WE)、辅助电极(对电极 CE)和测量电极电位的参比电极( RE)。

生乳中含有多达数百种乃至上千种的化学成分, 为此, 使用相同数量的选择性传感器对生乳进行检测是不可能也是不必要的。借鉴生乳验收的传统方法, 根据生乳的特点和传感器阵列本身的特性, 传感器阵列包括作用不同但是具有互补作用的若干非特异性数据采集传感器。

由于在生乳中添加不同的物质, 可能会有不同的电化学信号的变化, 有些变化可能是同向或相向, 互相之间影响彼此消长, 在某一特定传感器有且只有一个唯一的表达。这些隐含的本质属性需要借助传感器阵列和化学计量学方法加以提取, 即选取非选择性电极构建传感器阵列, 进行非特异性数据的检测和采集, 涵括了工作电极、辅助电极、参比电极的筛选: 工作电极可将化学性质稳定的金、铂、钨、钛、钯等贵金属和易于再生的银作为电极组成传感器阵列, 该阵列中的电极也可针对具体情况进行电化学修饰; 以铂电极为辅助电极、以 Ag/AgCl 电极为参比电极。

1.2.2 电极处理方法 电极在首次测量之前要先将

各惰性贵金属工作电极及白金辅助电极采用机械抛光<sup>[10, 16]</sup>: 用  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 抛光粉按照粒度由粗到细在绒垫上润湿打磨至平整光洁, 每次更换不同粒度的抛光粉前须用甲醇淋洗, 最后放入超纯水中超声清洗 10min, 然后放入甲醇中同样超声清洗 10min, 再用去离子水超声清洗, 氮气吹干保护待用。

在任意两次测量过程中间, 工作电极先置于蒸馏水中采用电化学清洗方法进行清洗 1min, 擦干。然后依次用同样的方法再用清洗剂和蒸馏水对工作电极进行电化学清洗。辅助电极和参比电极用蒸馏水清洗, 滤纸吸干。

电化学清洗方法如图 1 所示, 每个电极在 0V 电压下清洗 1s—1.2V 电压下清洗 1s—0V 电压下清洗 1s—-1.2V 电压下清洗 1s—0V 电压下清洗 1s, 循环一次。电极在高电位下, 清洗掉吸附在电极表面和具有氧化性的物质, 在低电位下, 清洗掉吸附在电极表面和具有还原性的物质, 通过电化学清洗方法将电极表面清洗干净。

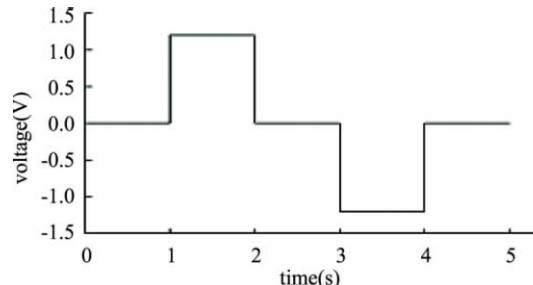


图 1 电化学清洗方法

1.2.3 传感器阵列组装 传感器阵列由工作电极组、辅助电极以及 CHI111 Ag/AgCl 参比电极构成三电极体系。工作电极包括金、铂、银、钨、钛、钯六种惰性贵金属电极, 该传感器阵列通过与电化学工作站及计算机相连接, 构成一个完整的生乳掺杂判定系统。

### 1.3 实验手段的选择

作为激发信号模式的电化学方法可采用电位法、伏安法、阻抗谱法等各子类方法进行研究。电位法是依据于相边界模型离子交换机制, 检测味觉溶液与传感器界面上不同电荷数量变化所引起的电位变化, 在检测过程中电流很小或几乎没有电流通过, 不需要校对电极, 系统结构简单<sup>[11]</sup>。伏安法测量的是工作电极相对于参比电极的电位激发信号下与对电极之间的响应电流<sup>[12-13]</sup>。在传感器界面上, 电双层或极性物质分布在工作电极的表面, 当施加变化的电位信号时, 对应变化的响应电流被仪器记录。在伏安法中所测得的响应电流 I 由两部分组成, 即  $I = I_c + I_f$ ,  $I_c$  是充电电流,  $I_f$  是法拉第电流, 而这两种电流来源不同, 电位变化及变化方式将影响着  $I_c$  和  $I_f$ , 也影响着响应电流。这种贵金属伏安型传感器的感应性通常比较高, 也易于清洗和活化再生, 但其选择性往往很差, 因为在所施加的电位下, 溶液中的所有具有电化学活性的物质对仪器所测得的响应电流均有贡献, 因此必须通过计量学方法来解析。

### 1.4 实验方法

运用本研究的传感器阵列对新鲜生乳样品进行

电化学扫描和分析,并将所采集的数据进行集成处理。设置好实验方法的相关参数,依次使用循环伏安法、常规脉冲伏安法、差分脉冲伏安法、电位扫描-阶跃混合方法、多电位阶跃法对新鲜生乳、熟乳(巴氏乳)和酸败乳进行电化学扫描测试。其中每个样品设置4个样本,每个样本检测2次,最终数据取平均值。

1.4.1 新鲜生乳数据采集 新鲜生乳在常温状态通入高纯氮气祛除溶解氧后,通过上述方法进行生乳的非特异性数据采集,数据集成后使用SPSS18软件进行数据处理。

1.4.2 熟乳(巴氏乳)的数据采集 新鲜生乳经过70℃恒温水浴30 min即获得实验所需熟乳(巴氏乳)经由通氮去氧后采用同样的方法进行熟乳(巴氏乳)非特异性数据采集并集成。

1.4.3 酸败乳的数据采集 新鲜生乳放置于冰箱中冷藏至有明显的酸败气味后,恢复至室温后经由通氮去氧后采用同样的方法进行酸败乳非特异性数据采集,数据集成后利用SPSS18软件进行数据处理。

## 1.5 数据处理与分析

主成分分析(principal component analysis,PCA)是模式识别中最基本的多元统计分析方法。它是在保留原始变量主要信息的前提下将多元指标问题转换成少数几个综合指标问题,起到降维与简化问题的作用,使得在研究复杂问题时更容易抓住主要矛盾<sup>[14,17]</sup>。主成分分析使用SPSS18软件进行处理。分析结果导入到软件SigmaPlot 11中作图。

## 2 结果与讨论

分别运用本研究中的6个工作电极组成传感器阵列对生乳、熟乳(巴氏乳)和酸败乳的非特异性数据进行采集及数据分析。

### 2.1 循环伏安法(CV)

使用循环伏安法对新鲜生乳、熟乳(巴氏乳)和酸败乳进行非特异性数据采集。参数设置为起始电位为开路电位,扫描范围为-0.2~0.5V,扫描速率为0.1V/s,采样间隔为0.005V。对多采集的数据运用SPSS18进行主成分分析。从图2中可以看出,通过循环伏安法(CV)的检测中,前两个主成分分别保留了原始数据的99.76%、96.58%、99.36%、98.34%的信息量,说明前两个主成分几乎涵盖了所有的信息。图2(C、D、F)显示金、钛、银电极对三种乳样进行较好的区分识别,同一种乳样的主成分得分值能很好地落在各自的范围内而互不干扰;图2(E)显示钨电极在CV检测中能够明显地区分酸败乳,但是对熟乳(巴氏乳)和新鲜生乳的辨识欠佳。根据智能传感器阵列设计原理,将上述的金、钛、银3各工作电极的数据进行组合,利用传感器阵列的数据代替独立传感器对原有三种乳样进行分析得出传感器阵列在CV检测中的最佳组合,结果如图3所示。同样传感器阵列的主成分得分图中,前两个主成分保留97.80%的原始数据信息。从图3中可知,相比于单个传感器得分图,传感器阵列对三种乳样具更好的区分识别能力。

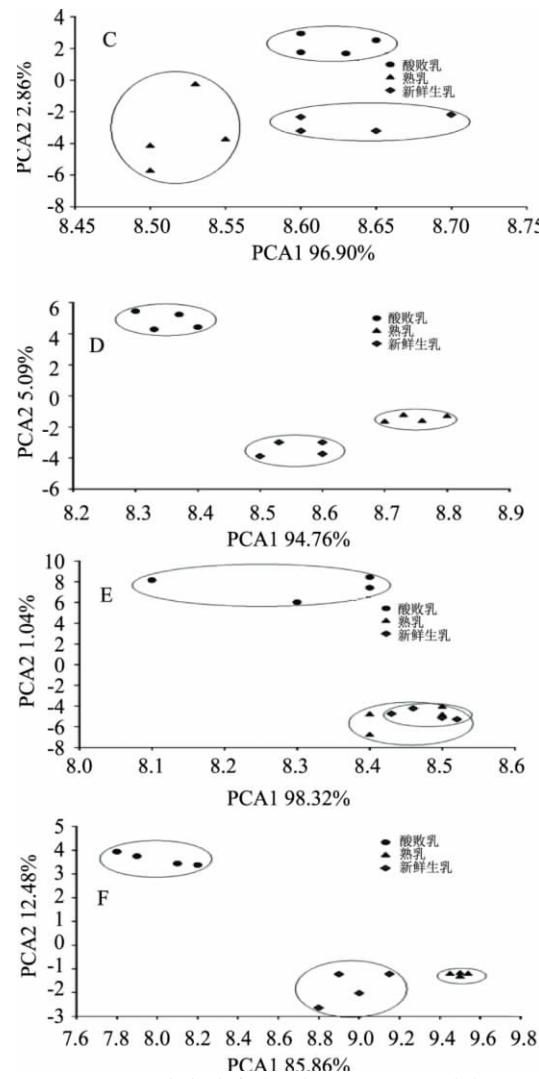


图2 循环伏安法中金、钛、钨和银工作电极的主成分1和主成分2得分图

注: C: 金电极 D: 钛电极; E: 钨电极; F: 银电极。

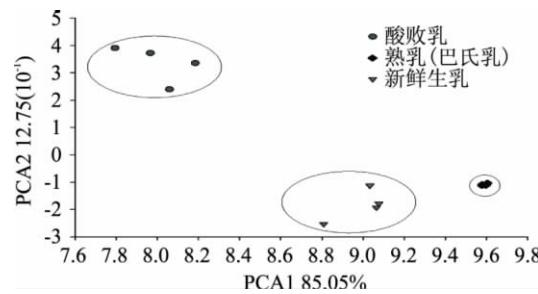


图3 循环伏安法中传感器阵列对乳样的区分结果

### 2.2 差分脉冲伏安法(DPV)

将差分脉冲伏安检测方法的参数设置为初始电位0.5V,扫描范围为0~0.5V,电位增量为0.01V,振幅为0.05V,脉冲宽度0.05s,采样间隔为0.01s,脉冲周期为0.5s之后,对新鲜生乳、熟乳(巴氏乳)和酸败乳进行非特异性数据采集并分析。从图4(A、B、F)中可以看出通过差分脉冲伏安法(DPV)对生乳、熟乳(巴氏乳)与酸败乳的检测中,钯、铂、银电极对三种乳样进行较好的区分识别。为了得到更好的区分效果,将单独传感器的数据进行组合,本实验中将钯、铂、银工作电极的数据进行叠加,作为传感器阵列采

集数据,再进行主成分分析,从而得到混合电极对三种样品的主成分得分图。如图4显示,传感器阵列的区分效果明显优于单独传感器。

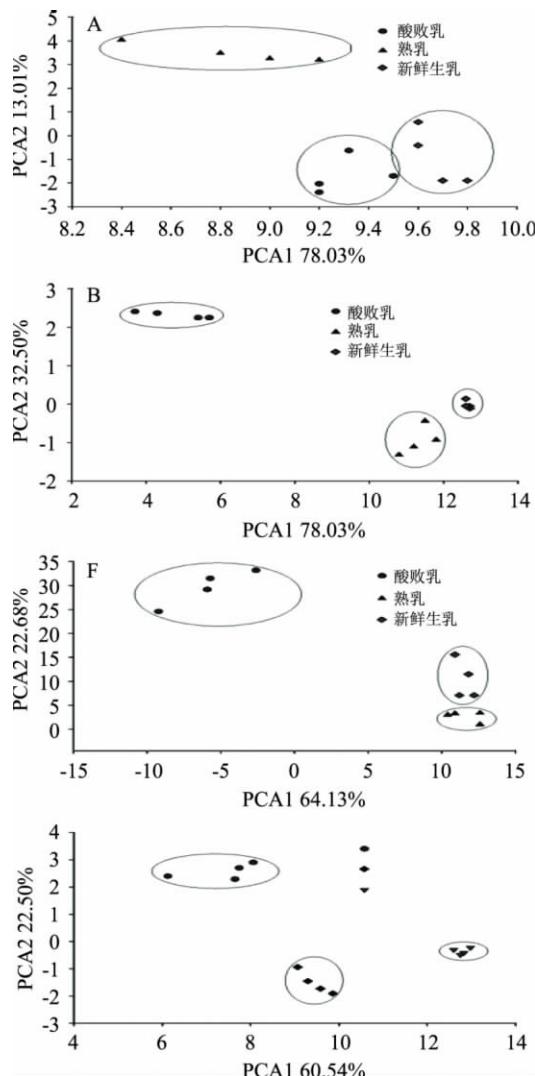


图4 差分脉冲伏安法中钯、铂、银工作电极和传感器阵列的主成分1和主成分2得分图

注: A: 钯电极; B: 铂电极; F: 银电极。

### 2.3 常规脉冲伏安法

将常规脉冲伏安检测方法的参数设置为初始电位0.5V,扫描范围为-0.2~0.5V,电位增量为0.01V,脉冲宽度0.05s,采样间隔为0.01s,脉冲周期为0.2s之后,对新鲜生乳、熟乳(巴氏乳)和酸败乳进行非特异性数据采集并分析。从图5中可看出各单独传感器通过常规脉冲伏安法(NPV)对生乳、熟乳(巴氏乳)与酸败乳的检测,从图5(B、C、E)中可知铂、金、钨传感器对生乳都有较强的辨别能力,对熟乳(巴氏乳)和酸败乳也有一定的区分能力,但熟乳(巴氏乳)和酸败乳在主成分1轴上会相重叠。为了得到更好的区分效果,将单独传感器的数据进行组合,本实验中将铂、金、钨工作电极的数据进行叠加,作为传感器阵列采集数据,在进行主成分分析,从而得到混合电极对三种样品的主成分得分图,如图5所示,铂、金、钨传感器阵列在NPV检测中对三种乳样的区分效果显著增强。

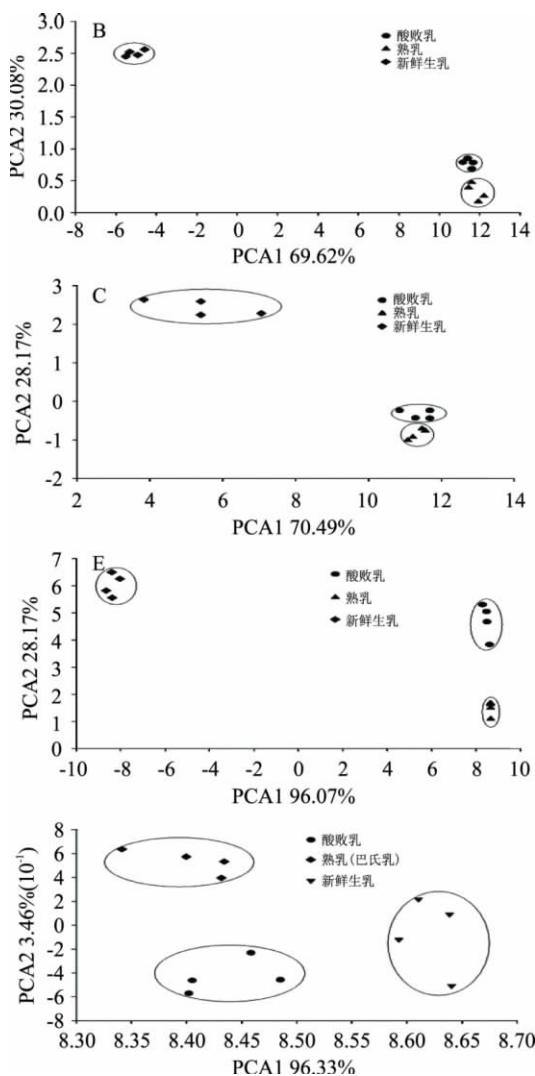


图5 常规脉冲伏安法中铂、金、钨工作电极和传感器阵列的主成分1和主成分2得分图

注: B: 铂电极; C: 金电极; E: 钨电极。

### 2.4 扫描-阶跃功能

扫描-阶跃法是分别由6个扫描阶段与6个节约阶段组成的检测方法,电化学工作站以图6所示的信号模式作为激发信号,通过铂、金、钯等非特异性惰性金属电极组成的传感器阵列将检测样品的物理化学属性转变成为电流信号,结合特定的算法评价乳样的品质特征。将所采集的新鲜生乳、熟乳(巴氏乳)和酸败乳的非特异性数据进行分析处理。从图7中可看出单独传感器通过扫描-阶跃功能(SSF)对生乳、熟乳(巴氏乳)与酸败乳的检测中金、钛工作电极对三种乳样进行一定的区分识别;将上述的金、钛工作电极的数据进行组合,利用传感器阵列的数据代替独立传感器对原有三种乳样进行分析得出传感器阵列在SSF检测中的最佳组合,结果如图8所示。同样传感器阵列的主成分得分图中,前两个主成分保留98.11%的原始数据信息。从图8中可见,相比于单个传感器得分图,传感器阵列对三种乳样具更好的区分识别能力,同一种乳样的主成分得分值能很好地落在各自的范围内而互不干扰;并且各个区域内点的离散度比较小,说明传感器阵列的组

合能很好的区分辨识不同种类的乳品。

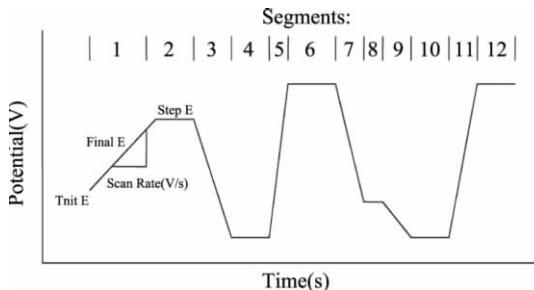


图 6 扫描-阶跃功能激发信号

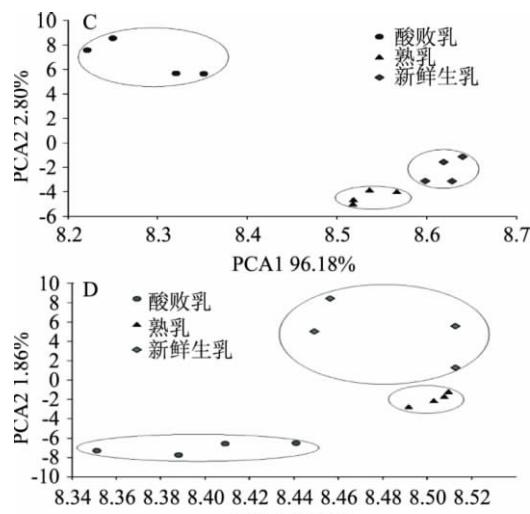


图 7 扫描-阶跃功能中金、钛工作电极的主成分 1 和主成分 2 得分图

注: C: 金电极; D: 钛电极。

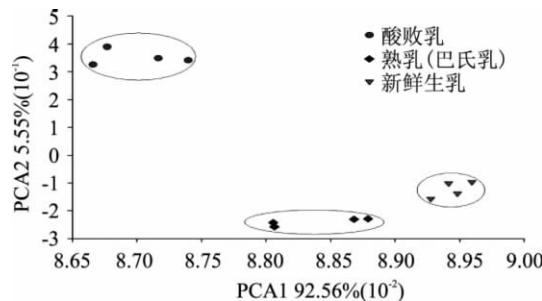


图 8 扫描-阶跃功能中传感器阵列对乳样的区分结果

## 2.5 多电位阶跃法

扫描-阶跃法是由 6 个电位阶跃阶段构成,其激发信号模式如图 9 所示。

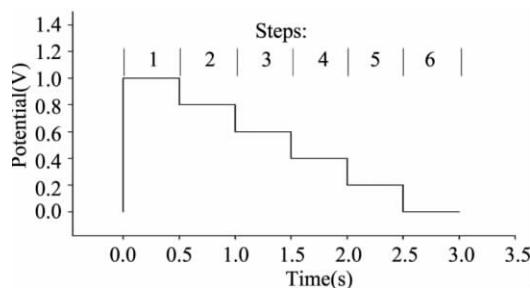


图 9 多电位阶跃法激发信号

从图 10(B、C、F)中可以看出铂、金、银工作电极在多电位阶跃法(STEP)对生乳、熟乳(巴氏乳)与酸败乳的检测中进行一定的区分辨识,但从图 10 中可

知不同乳样的得分值区域存在部分干扰,为了得到更好的区分效果,将单独传感器的数据进行组合,本实验中将铂、金、银工作电极的数据进行叠加,作为传感器阵列采集数据,在进行主成分分析,从而得到混合电极对三种样品的主成分得分图。如图 10 所示,传感器阵列的区分效果明显优于单独传感器。

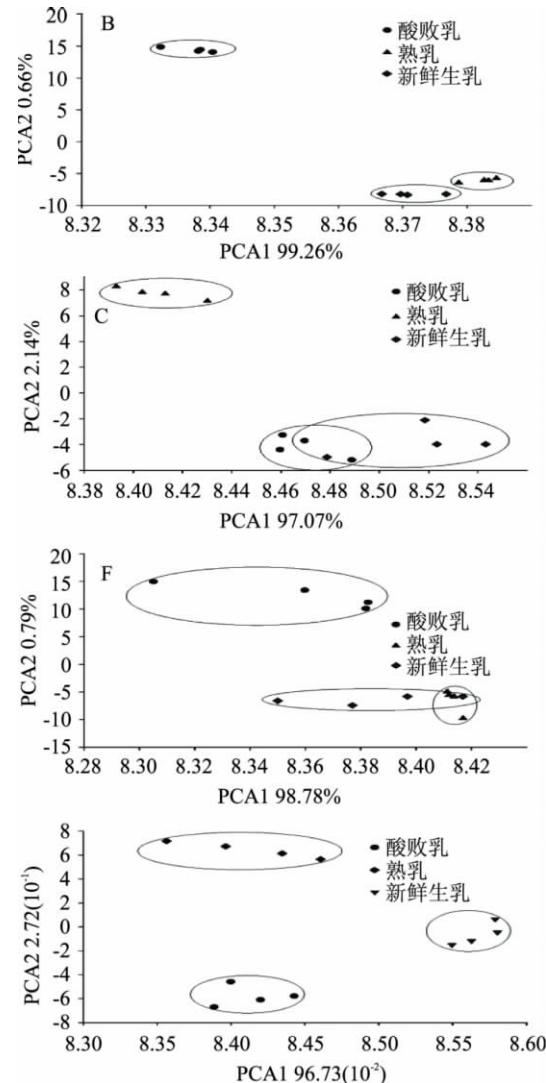


图 10 多电位阶跃法中铂、金、银工作电极和传感器阵列的主成分 1 和主成分 2 得分图

注: B: 铂电极; C: 金电极; F: 银电极。

## 3 结论

本文介绍了一种基于电化学三电极体系的传感器阵列对生、熟乳与酸败牛乳的电化学识别方法,以及对数据采取的处理方法。

该方法中的传感器阵列采用非修饰性惰性贵金属电极,集成性好,能够很好地应用于混合溶液的检测与识别。采用多种分析方法,能从不同角度对溶液进行全面分析,从而能获取更多的溶液特性的信息。运用特征值提取和主成分分析法能使实验结果简单明了,同时又能保留绝大部分的信息。实验证明,单独传感器对不同的乳样所采集的电化学信息不同,单电极组合成传感器阵列对不同样品所采集的电化学信息也不同,从而使得传感器阵列能够对

(下转第 475 页)

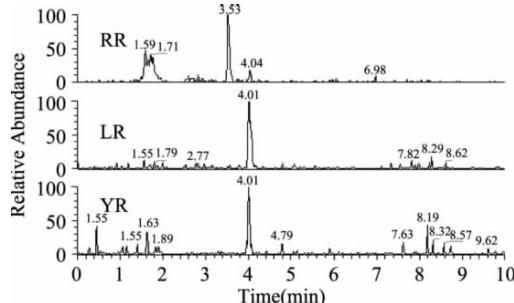


图2 3种MC加标鱼样的HPLC/MS/MS谱图

表2 回收率及精密度( n = 10)

添加水平 ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	MC-RR	MC-YR	MC-LR		
10.0	50.0	10.0	50.0	10.0	50.0
回收率(%)	92.4	87.1	96.1	92.6	97.2
RSD(%)	4.0	7.5	6.7	4.1	5.5

### 3 结论

本方法采用高效液相色谱串联质谱分析洪泽湖鲢鱼中的微囊藻毒素,使用甲醇提取,固相萃取技术进行样品的前处理预分离,探索了合适的液相条件和质谱条件,对三种微囊藻毒素能够进行准确的定性和定量分析。本方法具有准确、快速以及灵敏度高的特点,适合于大量样品的分析检测,因此,本研究结果对于食品安全风险评价和监测环境污染具有实际应用价值。

### 参考文献

[1] Enefick S L, Hrudey S E, Peterson H G, et al. Toxin Release (上接第472页)

不同的乳样各进行区分识别。本文研究的传感器阵列虽然无法确定哪个种类的样品质量更加优秀,但是可以显示不同乳样具有不同的品质特征。该方法可应用于生乳收购的第一道把关,另外还可在食品安全检测、水质污染检测及其他领域发挥积极作用。

### 参考文献

- [1] 刘迎春.原料奶掺假原因剖析与对策[J].中国动物保健,2006(7):9-10.
- [2] 赵旭博,董文宾,王顺民等.国外牛奶中尿素含量检测新进展[J].食品研究与开发,2004,25(6):109-114.
- [3] 李秀琴,张庆合,全灿,等.液相色谱-质谱/质谱法对多种食品基体中三聚氰胺的检测[J].分析测试学报,2009,28(11):1260-1265.
- [4] I López-Calleja, I González, V Fajardo, et al. Quantitative detection of goats' milk in sheep's milk by real-time PCR [J]. Food Control, 2007(18):1466-1473.
- [5] 萨丽塔娜提,李雪红.SNAP<sup>TM</sup>与国标TTC法检测牛乳中抗生素残留的比较[J].草食家畜,2004(4):12-13.
- [6] 黄赣辉,邓少平,顾振宇.PVC薄膜味觉传感器阵列的实验构建[J].中国食品学报,2006,6(6):58-63.
- [7] Chen Quansheng, Zhao Jiewen, Vittayapadung S. Identification of the green tea grade level using electronic tongue and pattern recognition [J]. Food Research International, 2008, 41(5): 500-504.
- [8] Legin A, Kirsanov D, Rudnitskaya A, et al. Multicomponent analysis of fermentation growth media using electronic tongue

from *Microcystis Aeruginosa* after Chemical Treatment [J]. Wat Sci & Tech, 1993, 27(3-4): 433-440.

[2] Nishiaki R, Ohta T, Sueoka E, et al. Two significant aspects of microcystin-LR: specific binding and liver specificity [J]. Cancer Lett, 1994, 83: 283-289.

[3] Gehringer Michelle M, Kewada Vijayne, Coates Nadya, et al. The use of *Lepidium sativum* in a plant bioassay system for the detection of microcystin-LR [J]. Toxicol, 2003, 41(7): 871-876.

[4] 何小维,郭秋华,彭运平,等.酶联免疫吸附实验在微囊藻毒素检测中的应用进展[J].卫生研究,2007,36(3):388-390.

[5] 徐立红,陈加平,许建明,等.用蛋白磷酸酶抑制法测定水体中的微囊藻毒素类物质[J].环境科学学报,1999,19(5):536-539.

[6] Li P C H, Hu S, Lam P K S. Development of a capillary zone electrophoretic method for the rapid separation and detection of hepatotoxic microcystins [J]. Mar Pollut Bull, 1999, 39: 250-254.

[7] 郑雪琴,苑宝玲,邢核,等.高效液相色谱法测定蓝绿藻中微囊藻毒素[J].理化检验-化学分册,2005,41(2):104-106.

[8] 王蕾,李小艳,张惠,等.高效液相色谱-质谱法测定蓝藻中的微囊藻毒素[J].食品工业科技,2007,28(3):197-236.

[9] 虞锐鹏,陶冠军,秦方,等.液相色谱-电喷雾电离质谱法测定水中的微囊藻毒素[J].分析化学,2003,31(12):1462-1464.

(ET) [J]. Talanta, 2004, 64: 766-772.

[9] Rudnitskaya A, Delgadillo I, Legin A, et al. Prediction of the Port wine age using an electronic tongue [J]. Chemo Metrics and Intelligent Laboratory Systems, 2007, 88: 125-131.

[10] 贾静,戴长松,陈玲.电化学测量方法[M].北京:化学工业出版社,2010.

[11] Krantz-Rücker C, Stenberg M, Winquist F, et al. Electronic tongues for environmental monitoring based on sensor arrays and pattern recognition: a review [J]. Analytica Chimica Acta, 2001, 426: 217-226.

[12] Ivarsson P, Holmin S, Höjer N E, et al. Discrimination of tea by means of a voltammetric electronic tongue and different applied waveforms [J]. Sensors and Actuators B, 2001, 76: 449-454.

[13] Holmin S, Spånges P, Krantz-Rücker C, et al. Compression of electronic tongue data based on voltammetry - a comparative study [J]. Sensors and Actuators B, 2001, 76: 455-464.

[14] 何晓群.多元统计分析[M].北京:中国人民大学出版社,2004:135-165.

[15] 林伟欣,田作华,王晓萍.一种基于三电极体系的人工电子舌的实现方法[J].测控技术,2007,26(6):9-11.

[16] 藤崎昭.电化学测定方法[M].陈震,姚建年,译.北京:北京大学出版社,1995.

[17] 杜一平,潘铁英,张玉兰.化学计量学应用[M].北京:化学工业出版社,2008.

[18] 黄赣辉,邓少平,顾振宇.PVC薄膜味觉传感器阵列对调味品和软饮料的识别[J].食品科学,2006(10):84-88.