

不同压力处理大米制得米饭冷藏期间风味变化的电子鼻分析

段小明¹, 张 蓓¹, 冯叙桥^{1*}, 董 福², 蔡茜彤¹, 范林林¹

(1.渤海大学食品科学研究院, 辽宁省食品安全重点实验室, 辽宁锦州 121013;

2.沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866)

摘要:采用电子鼻测定了不同压力处理大米制得米饭冷藏期间的挥发性成分,探讨电子鼻用于检测米饭风味成分、区分不同冷藏时间米饭的可行性及超高压处理对米饭冷藏期间风味变化情况的影响。大米在温度40℃、米水比(w/w)为1:2的条件下浸泡40min,并在15℃下分别经200、400、600MPa处理10min,以未经超高压处理的大米作为对照组,将其蒸煮15min制成米饭,保鲜膜密封后置于4℃下贮藏,冷藏期间每天采用PEN3电子鼻对米饭进行测定。采用主成分分析法(PCA)、传感器贡献率分析法(LA)、线性判别式分析法(LDA)分析了米饭冷藏期间的挥发性成分,并建立了特征雷达图。结果表明:压力对米饭冷藏期间甲烷、硫化物、乙醇、芳香类及有机硫化物的产生有较大影响,贮藏期间200MPa米饭甲烷、硫化物、乙醇的产生量最高,600MPa米饭硫化物、芳香类及有机硫化物的产生量最低;W5S、W1W是识别米饭挥发性成分的主要传感器;电子鼻对米饭的挥发性物质反应比较灵敏,可用于米饭挥发性物质的无损检测;PCA分析可区分不同贮藏天数的对照或600MPa米饭,LDA分析可区分不同贮藏天数的400MPa或600MPa米饭。

关键词:米饭,超高压,电子鼻,风味,冷藏

Electronic nose analysis on flavor changes of cooked rice made of rice treated with different pressures during cold storage

DUAN Xiao-ming¹, ZHANG Bei¹, FENG Xu-qiao^{1*}, DONG Fu², CAI Xi-tong¹, FAN Lin-lin¹

(1.Food Science Research Institute of Bohai University, Food Safety Key Lab of Liaoning Province, Jinzhou 121013, China;

2.College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: To explore the feasibility of using electronic nose to detect the flavor of cooked rice and to distinguish between cooked rice with different storage time, and further to study the effect of high pressure treatment on the flavor of cooked rice, electronic nose was used to detect the dynamic changes of volatile compounds in the cooked rice made of rice treated with different pressures during cold storage. Rice that had been soaked at 40℃ for 40min with ratio of rice and water(w/w) as 1:2 was treated under 200, 400 or 600MPa respectively for 10min at 15℃ before being steamed for 15min. The rice without high pressure processing was as controlled trial. The cooked rice was packaged with plastic wrap and then stored at 4℃ for evaluation. During storage, the volatile components in the cooked rice were measured daily by PEN3. Principal component analysis (PCA), loadings analysis (LA), and linear discriminant analysis (LDA) were used to analyze the data obtained by PEN3 in the cooked rice during cold storage and characteristic radar charts were further established. The results showed that pressure affected the production of methane, sulfide, ethanol, aromatic compounds and organic sulfide in the cooked rice during cold storage. The contents of methane, sulfide and ethanol in the 200MPa rice were the highest, while that of sulfide, aromatic compounds and organic sulfides in the 600MPa rice were the lowest during storage in the pressure treatments. W5S and W1W were more effective for identifying the flavor of the cooked rice. The results of this experiment indicated that electronic nose was sensitive to the changes of volatile compound in cooked rice and could be used to nondestructively test the flavor change of cooked rice. PCA identified the control sample or 600MPa rice with different storage time, and LDA distinguished the 400 or 600MPa rice with different storage time.

Key words: cooked rice; ultra high pressure; electronic nose; flavor; cold storage

中图分类号: TS213.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2015)06-0325-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.06.063

收稿日期: 2014-05-21

作者简介: 段小明(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程。

* 通讯作者: 冯叙桥(1961-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程。

基金项目: 渤海大学人才引进基金项目(BHU20120301)。

米饭是我国人民最喜爱的主食,也是我国食用人数最多、消费量最大的食品之一^[1]。随着生活节奏的加快,人们对速食食品的需求也不断增加,米饭的制作工序相对繁琐,为满足人们工作、外出等的需求,各种方便米饭产品也随之出现。冷藏米饭是方便米饭的一种,也是家庭替代餐的主要品种之一,大米是其主要材料^[2],大米的品质对方便米饭的品质影响较大。风味是衡量食品品质优劣的重要指标之一,超高压技术(Ultra-high pressure processing, UHP)作为一种较为新型的食品加工技术,除用于食品杀菌外,对于食品风味的影响也是人们研究的热点之一,如超高压处理对草莓^[3]、大蒜^[4]、蕃石榴汁^[5]、橙汁^[6]风味的影响等,都已经有了研究报道。

电子鼻(electronic nose, EN)是一种近年来发展较为迅速的食品风味检测技术,具有测定步骤简单,分析迅速,测试样品无需前处理,安全、低成本等优点^[7-8]。利用电子鼻技术可预测稻米的虫害情况和贮藏时间^[9];区分不同长粒型大米的风味成分^[9];区分不同基因型、不同收获年份大米的气味物质^[10];区分香稻和非香稻品种的风味物质^[11];区分不同香稻品种^[12];区分不同口味的方便米饭^[13],电子鼻在大米品种、方便米饭口味鉴别中有潜在应用价值。目前,有关米饭贮藏期间风味变化及超高压处理对米饭风味影响的研究相对较少。本实验研究大米超高压处理对米饭冷藏期间风味变化情况的影响,探讨电子鼻对不同贮藏天数的米饭进行区分的可能性,为大米的超高压加工和方便米饭的生产及品质监测提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

盘锦大米 市售。

C21-RH2101多功能电磁炉 广东美的生活电器制造有限公司;HH-6数显恒温水浴锅 常州国华电器有限公司;JA5003电子天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司;HPP.L2-600/0.6超高压设备 天津市华泰森森超高压设备有限公司;DZ-500/2S型真空包装机 诸城市舜康包装机械有限公司;PEN3电子鼻 德国Airsense公司;MIR-254低温恒温培养箱 三洋电机株式会社。

1.2 实验方法

1.2.1 米饭制备工艺流程 大米→淘洗→浸泡→超高压处理→蒸煮[米水比(w/w)为1:1;常压;15min]→米饭→冷却→无菌分装→贮藏(4℃)。

1.2.2 大米前处理 称取50g大米并淘洗。将淘洗后的大米进行浸泡,浸泡条件为米水比(w/w)1:2、浸泡温度40℃、浸泡时间40min。浸泡结束后,沥干大米水分,将其装入经高温灭菌的蒸煮袋(15cm×10cm)中并抽真空密封。

1.2.3 大米超高压处理方法 将包装好的大米放入超高压设备的施压容器并保证其浸没于传压介质(水)中,对其分别施加200、400、600MPa的压力,保压时间10min,处理温度15℃。浸泡后未经超高压处理的大米为对照(0.1MPa)处理组。

1.2.4 电子鼻测定方法 PEN3型便携式电子鼻(Portable Electronic Nose 3)由气体采集流向控制系统、气敏传感器阵列(包含10个金属氧化物传感器)、信号处理子系统和模式识别子系统4部分组成;根据传感器接触到检测样品挥发成分后的电导率G与传感器经过标准活性炭过滤气体的电导率G₀的比值进行数据处理和模式识别,敏感性为1mL/m³^[14-15],各传感器性能见表1。电子鼻的工作过程是:样品密封一定时间后,其顶空气体(sample gas)经采样通道泵入电子鼻,电子鼻中的传感器吸附样品,电导率值发生变化,该信号被获取并存储于计算机中;采样完成后,经活性炭过滤后的洁净空气(zero gas)被泵入电子鼻,对传感器进行清洗并使其恢复到初始状态^[16]。

准确称取10g在室温下平衡1h的冷藏米饭于50mL烧杯中并用双层保鲜膜封口,室温下放置30min,待样品的风味成分挥发至平衡状态后,用电子鼻对其进行测定,每个样品平行测定3次。

电子鼻测定参数:样品测定间隔时间:1s;样品准备时间:3s;样品测试时间:100s;测量计数:1s;清洗时间:90s;自动调零时间:5s;自动稀释:0;内部流量:300mL/min;进样流量:300mL/min。

1.2.5 数据分析方法 利用与电子鼻系统配套的WinMuster软件,对第90~92s内的电子鼻挥发性成分测定数据进行主成分分析(principle component analysis, PCA)、线性判别分析(linear discriminant

表1 PEN3型便携式电子鼻传感器性能

Table 1 Performance of 10 sensors for PEN3 portable electronic nose

阵列序号	传感器名称	性能描述	气体
1	W1C	芳香成分	甲苯(C ₇ H ₈), 10mL/m ³
2	W5S	灵敏度大,对氮氧化物很灵敏	二氧化氮(NO ₂), 1mL/m ³
3	W3C	氨水,对芳香成分敏感	苯(C ₆ H ₆), 10mL/m ³
4	W6S	主要对氢气有选择性	氢气(H ₂), 100mL/m ³
5	W5C	烷烃,芳香成分	丙烷(C ₃ H ₈), 1mL/m ³
6	W1S	对甲烷灵敏	甲烷(CH ₄), 100mL/m ³
7	W1W	对硫化物敏感	硫化氢(H ₂ S), 1mL/m ³
8	W2S	对乙醇敏感	一氧化碳(CO), 100mL/m ³
9	W2W	芳香成分,对有机硫化物灵敏	硫化氢(H ₂ S), 1mL/m ³
10	W3S	对烷烃灵敏	甲烷(CH ₄), 10mL/m ³

analysis, LDA) 和传感器贡献率分析 (loadings analysis, LA); 根据样品在91s时的传感器响应值建立特征雷达图。

2 结果与分析

2.1 主成分分析(PCA)

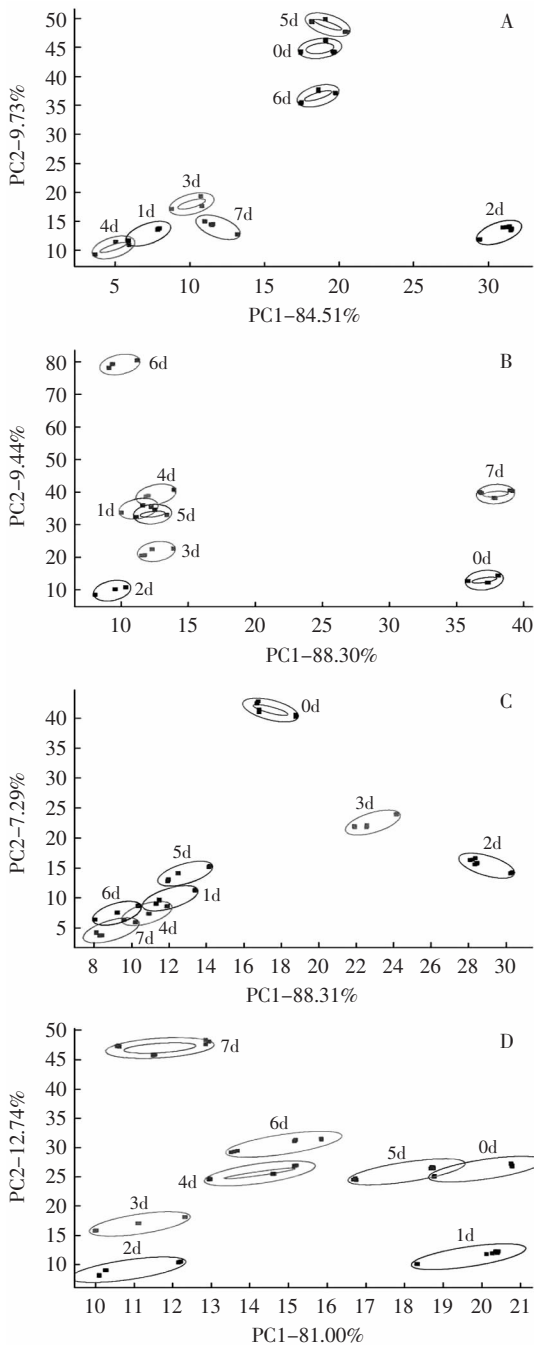


图1 不同压力处理大米制成米饭冷藏期间挥发性成分的PCA分析

Fig.1 PCA of volatile compounds in cooked rice during cold storage made of rice treated with different pressures
注: A: 0.1MPa; B: 200MPa; C: 400MPa; D: 600MPa; 图2~图4同。

PCA是一种多元统计分析方法,是将提取的传感器多指标信息进行数据转换和降维,并对降维后的特征向量进行线性分类,最后在PCA图上显示主

要的两维图;PCA图中的横、纵坐标分别表示PCA转换中得到的第一主成分、第二主成分的贡献率;贡献率大,说明主要成分可以较好地反映原多指标的信息^[14]。一般情况下,总贡献率超过70%~85%,此方法即可使用^[17]。PCA图中,两个样品在横坐标上的距离越大,说明其差异越大;而两个样品在纵坐标上的距离即使很大,由于第二主成分的贡献率相对较小,其实际差异也不会很大^[14]。

图1中每个椭圆代表米饭在不同贮藏天数挥发性成分的数据采集点。由图1可知,0.1、200、400、600MPa米饭第一主成分(PC1)的贡献率分别为84.51%、88.30%、88.31%、81.00%;第二主成分(PC2)的贡献率分别为9.73%、9.44%、7.29%、12.74%;总贡献率分别为94.24%、97.74%、95.60%、93.74%。不同米饭PC1、PC2的累积贡献率均大于90%,两个主成分已经基本代表了样品的主要信息特征。不同贮藏天数0.1、600MPa米饭的挥发性物质成分区域几乎无重叠,表明PCA方法可对其进行区分。贮藏1、4、5d的200MPa米饭的挥发性物质区域有部分重叠,气味较为接近。贮藏1、4~7d的400MPa米饭的挥发性物质区域相对集中,气味较为接近。随贮藏天数的增加,600MPa米饭PC2大体呈先降低后升高的变化趋势;与新鲜米饭相比,600MPa米饭的PC1均左移,400MPa米饭的PC2均下移。不同米饭随着贮藏时间的推移,挥发性成分均发生了变化且变化规律不同。随着处理压力的增大,米饭PC1的贡献率先增大后降低,PC2的贡献率先降低后升高。

2.2 传感器贡献率分析(LA)

LA通常用来检查PCA空间中传感器对模型数据分布的影响,可以识别传感器响应在识别模式中的重要性;位点坐标表示分别所在主成分上的比重大小,相关系数(绝对值)越大,主成分对该变量的代表性也越大;如果某个传感器在模式识别中负载参数近乎为零[图中坐标在(0,0)附近],说明传感器对检测样品的风味反应不敏感,该传感器的识别能力可以忽略不计;如果响应值较高[图中坐标距离坐标(0,0)较远],说明传感器对检测样品的风味反应较敏感,该传感器是识别传感器;一些作用不大的传感器可能对模型有负面影响,分析时可以关闭^[16-19]。

结合LA分析可以说明每个传感器对PCA贡献率的大小^[20]。由图2可知,200MPa米饭冷藏期间挥发性成分的主要识别传感器为2(W5S)、6(W1S)、7(W1W)号,其中7号传感器对PC1的贡献率较大,2、6号传感器对PC2的贡献率较大。0.1、400、600MPa米饭冷藏期间风味的主要识别传感器为2和7号,其中7号传感器对PC1的贡献率较大,2号传感器对PC2的贡献率较大;其他传感器的作用相对较小。6号传感器对200MPa米饭PC2的贡献率明显高于其他3种米饭。LA分析有助于进一步研究传感器对于米饭气味的响应值及优化传感器阵列。

2.3 线性判别式分析(LDA)

LDA是研究样品所属类型的一种统计方法,其利用了所有传感器的信号,以提高分类的准确性,更

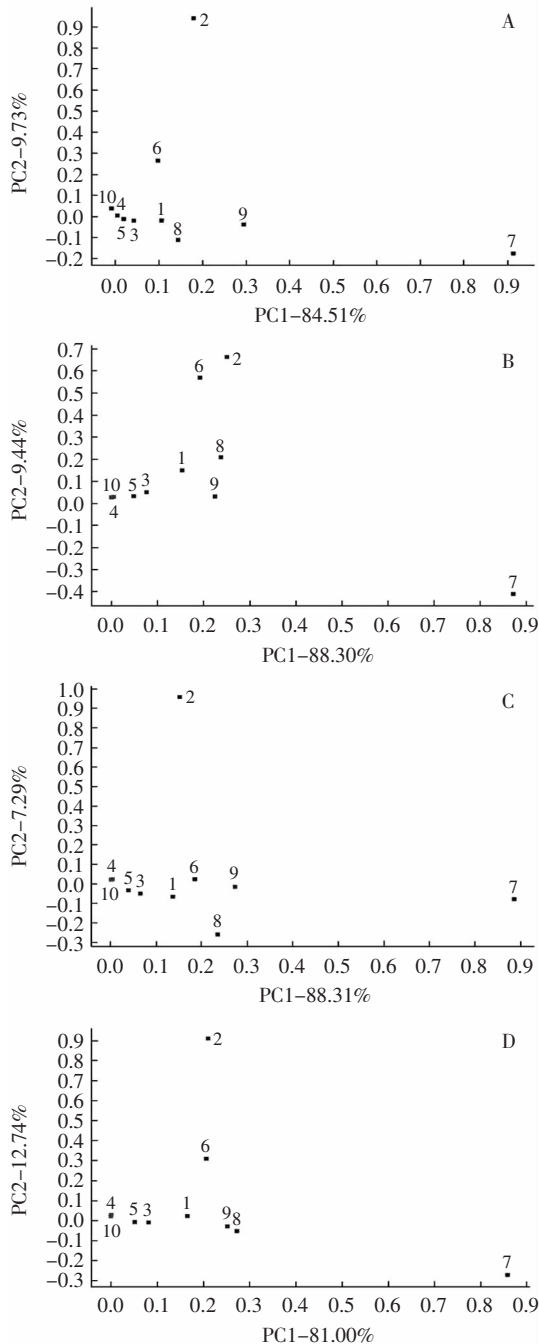


图2 不同压力处理大米制得米饭冷藏期间挥发性成分的传感器贡献率分析

Fig.2 Loadings analysis of volatile compounds in cooked rice during cold storage made of rice treated with different pressures

加注重样品在空间中的分布状态及彼此之间的距离分析^[14]。LDA的基本思想是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^[19]。与PCA相比,LDA方法主要不同之处在于它利用先前的分类信息进行计算^[20]。

LDA分析方法注重气味速率(图中各类中心点之间的距离)的变化分析,从图中数据采集点的离散程度可以看出米饭气味的变化速率^[22]。由图3(A)可知,第一判别函数(LD1)、第二判别函数(LD2)的贡

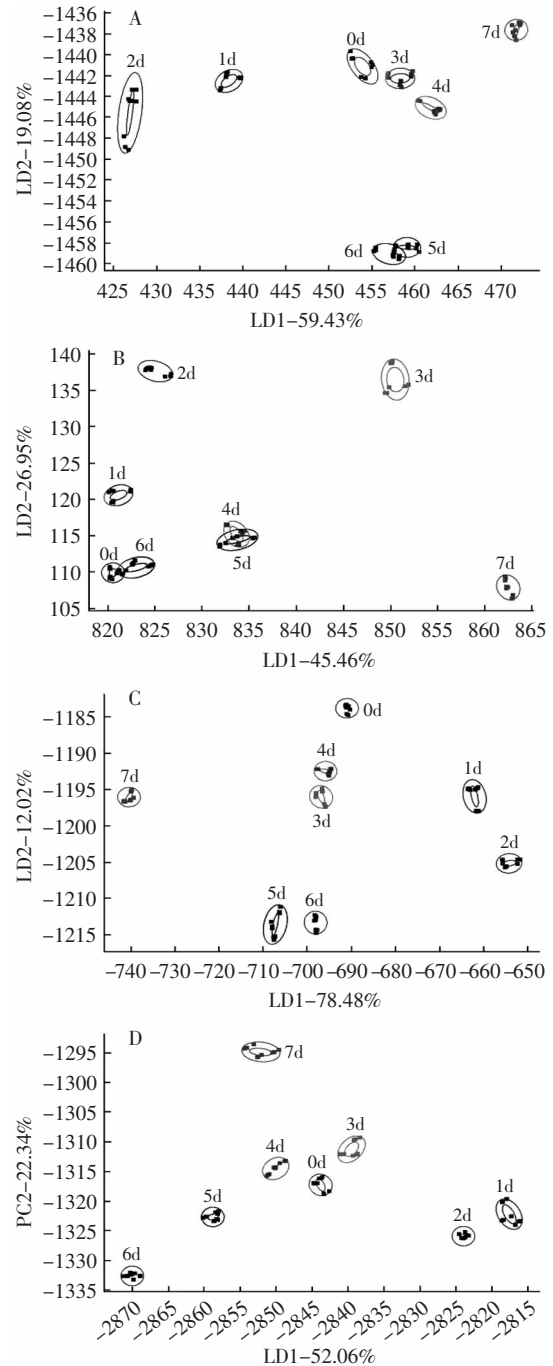


图3 不同压力处理大米制得米饭冷藏期间挥发性成分的LDA分析

Fig.3 LDA of volatile compounds in cooked rice during cold storage made of rice treated with different pressures

献率分别为59.43%和19.08%,总贡献率为78.51%。0.1MPa米饭0~5d的气味变化速率较大,5~6d的中心点间距较小,风味变化较小;挥发性成分在0~7d LD1先降低后升高,在0~6d LD2大体呈下降趋势。由图3(B)可知,判别式LD1、LD2的贡献率分别为45.46%和26.95%,总贡献率为72.41%。200MPa米饭0~4d的风味变化速率较大;4~5d中心点距离较小,风味变化不大;贮藏0和6d的米饭风味数据采集点部分重叠,说明贮藏6d的米饭与新鲜米饭的风味接近。0~6d中,米

饭风味数据采集点大体呈顺时针变化,在0~7d LD1先升高后降低再升高,LD2先升高后降低。由图3(C)可知,判别式LD1、LD2的贡献率分别为78.48%和12.02%,总贡献率为90.50%。400MPa米饭0~3d的气味变化速率较大,3~4d气味变化速率较小。米饭挥发性成分在0~7d LD1大体呈先升高后降低的变化趋势,LD2也呈一定变化趋势,但规律性不明显。由图3(D)可知,判别式LD1、LD2的贡献率分别为52.06%和22.34%,总贡献率为74.40%。600MPa米饭0~7d的气味变化速率均较大。米饭挥发性成分在1~6d LD1、3~6d LD2均逐渐降低。

4种米饭LDA总贡献率均高于70%,无重要信息遗漏,可认定分析结果的有效性。不同贮藏天数400MPa或600MPa米饭风味的响应信号无重叠区域,米饭贮藏期间的挥发性风味物质呈现出良好的单向性,LDA可区分不同贮藏天数400MPa或600MPa米饭的风味成分。随贮藏时间的延长,测试样品数据采集点与新鲜米饭均有一定距离,即米饭风味发生了变化。400MPa米饭LDA的总贡献率明显高于其他3种米饭。

2.4 样品特征雷达图分析

雷达图是利用电子鼻的不同传感器所检测到的不同类型挥发性物质的特征图^[15]。为了更好地观察和分析电子鼻10个传感器对不同贮藏天数米饭风味响应的变化情况,进行了样品电子鼻传感器信号数据的指纹图分析,即将10个传感器间隔36°均匀排列在圆周上,形成雷达图^[14]。

由图4可知,电子鼻的10个传感器对不同贮藏天数米饭的挥发性物质均有响应,且不同传感器的响应各不相同,这表明利用PEN3电子鼻系统区分不同贮藏天数的米饭具有一定可行性^[14]。随着贮藏时间的延长,雷达图的外形轮廓和面积也在逐渐发生变化,说明不同米饭挥发性物质的组成发生了变化^[15]。2、6、7、8、9号传感器的相对电阻率(G/G₀)值较其他传感器更高,表明氮氧化物、甲烷、硫化物、乙醇、芳香类及有机硫化物等米饭挥发性成分对传感器较灵敏^[16]。传感器1、3、4、5响应值变化不大,且响应值均在1左右,说明米饭贮藏过程中不产生或很少产生氢气、芳香成分、氨气及除甲烷外的烷烃类气体^[20]。

4种米饭的雷达图谱具有相似的变化趋势和形状,说明4种米饭挥发性物质的组成及其随贮藏时间的变化情况相似,主体风味成分相近;但也存在一定差异,主要体现在6(甲烷)、7(硫化物)、8(乙醇)、9(芳香类及有机硫化物)号传感器上。贮藏结束时(7d),0.1MPa和200MPa米饭6号传感器的响应值分别最低(4.07)和最高(4.82)。与新鲜米饭相比,贮藏1~7d米饭7号传感器的响应值有不同幅度的增加,7d时最高,此时200MPa和600MPa米饭7号传感器的响应值分别最高(10.32)和最低(7.30)。0.1MPa和400MPa米饭贮藏前6d,8号传感器的响应值几乎无变化,第7d时大幅增加,200MPa和600MPa米饭贮藏期间8号传感器响应值呈波动变化,贮藏结束时,0.1MPa和

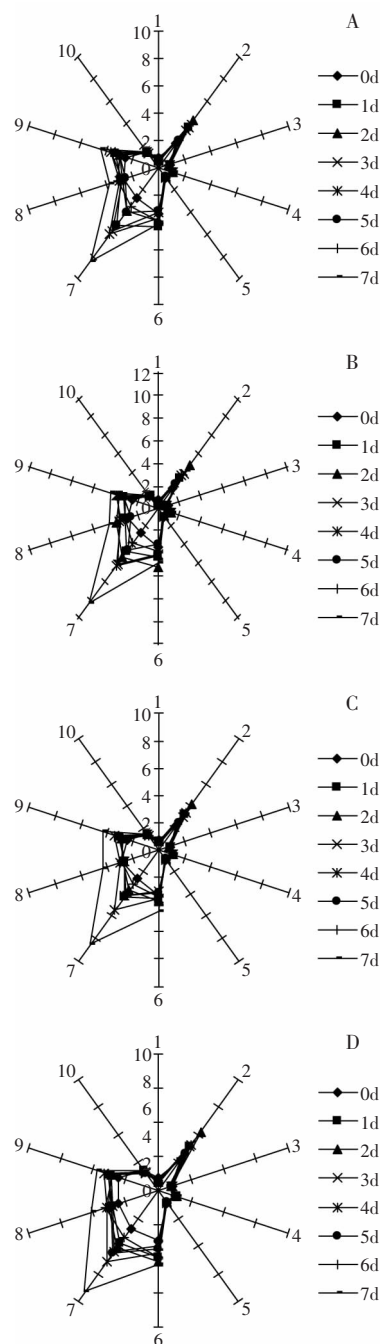


图4 不同压力处理大米制得米饭冷藏期间挥发性成分的雷达图
Fig.4 Radar charts of volatile compounds in cooked rice during cold storage made of rice treated with different pressures

200MPa米饭8号传感器的响应值分别最低(3.77)和最高(4.60)。600MPa米饭9号传感器的响应值在贮藏结束时明显低于其他3种米饭。上述实验结果说明不同米饭贮藏期间甲烷、硫化物、乙醇、芳香类及有机硫化物的变化情况存在较大差别,可以利用电子鼻进行检测。

3 结论

3.1 电子鼻的PCA可区分不同贮藏天数的0MPa或600MPa米饭;LDA可区分不同贮藏天数的400MPa或600MPa米饭;随着处理压力的增大,PC1的贡献率先升高后降低,PC2的贡献率先降低后升高。400MPa米

饭LDA的总贡献率最高。

3.2 雷达图分析结果表明,电子鼻对米饭的挥发性物质反应灵敏,可无损检测米饭的挥发性物质;随着贮藏时间的延长,4种米饭的甲烷、硫化物、乙醇、芳香类及有机硫化物的变化情况存在较大差别,200MPa米饭贮藏期间硫化物、甲烷、乙醇的产生量较多,600MPa米饭硫化物、芳香类及有机硫化物的产生量较低。

3.3 LA分析结果表明,电子鼻系统中的2号(W5S)和7号(W1W)传感器对米饭风味的识别起主导作用。与0.1MPa米饭相比,200MPa米饭6号(W1S)传感器的载荷有较大幅度的增大。

参考文献

- [1] 毛海华,程裕东,周颖越,等. 定温流通条件下温度波动对冷藏米饭安全性的影响研究[J]. 食品科学,2006,27(12):142-145.
- [2] 毛海华. 定温流通条件下温度波动对HMR食品品质和安全性的影响的研究——对家庭替代餐主食米饭的考察[D]. 上海:上海水产大学,2007.
- [3] Lambert Y, Demazeau G, Largeteau A, et al. Changes in aromatic volatile composition of strawberry after high pressure treatment[J]. Food Chemistry, 1999, 67(1):7-16.
- [4] Sohn K H, Lim J K, Kong U Y. High pressure inactivation of alliinase and its effects on flavor of garlic[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 1996, 28(3):593-599.
- [5] Yen G C, Lin H T. Changes in volatile flavor components of guava juice with high-pressure treatment and heat processing and during storage[J]. Journal of Agriculture Food Chemistry, 1999, 47(5):2082-2087.
- [6] Baxter I A, Easton K, Schneebeli K. High pressure processing of Australian navel orange juices: sensory analysis and volatile flavor profiling[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2005, 6(4):372-387.
- [7] Concina I, Falasconi M, Gobbi E, et al. Early detection of microbial contamination in processed tomatoes by electronic nose[J]. Food Control, 2009, 20(10):873-880.

[8] Zhou B, Wang J. Detection of insect infestations in paddy field using an electronic nose[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2011, 13(5):707-712.

[9] Zheng X, Lan Y, Zhu J, et al. Rapid Identification of rice samples using an electronic nose[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(3):290-297.

[10] 胡志全,王海洋,刘友明. 电子鼻识别大米挥发性物质的应用性研究[J]. 中国粮油学报,2013,28(7):93-98.

[11] Jana A, Bhattacharyya N, Bandyopadhyay R, et al. Classification of aromatic and non-aromatic rice using electronic nose and artificial neural network[C]. Trivandrum:Recent Advances in Intelligent Computational Systems(RAICS), 2011:291-294.

[12] Abdullah A H, Adom A H, Shakaff A Y M, et al. An electronic nose system for aromatic rice classification[J]. Sensor Letters, 2011, 9(2):850-855.

[13] 梁爱华,贾洪锋,秦文,等. 电子鼻在方便米饭气味识别中的应用[J]. 中国粮油学报,2010,25(11):110-113,123.

[14] 朱丽云,张拥军,何杰民,等. 不同工艺热反应风味香料的电子鼻检测[J]. 中国食品学报,2012,12(2):207-212.

[15] 纪淑娟,张丽萍,卜庆状,等. 基于电子鼻技术对冷藏后南果梨货架期间气味的变化分析[J]. 食品科学,2012,33(7):123-126.

[16] 张拥军,蒋家新,何杰民,等. 电子鼻检测改性聚砜膜用于啤酒澄清处理的研究[J]. 中国食品学报,2010,10(6):199-203.

[17] 韩姣姣,裘迪红,宋绍华. 电子鼻检测植物乳杆菌发酵草鱼中的风味物质[J]. 食品科学,2012,33(10):208-211.

[18] 周亦斌. 基于电子鼻的西红柿与黄酒的检测与评价研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

[19] 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.

[20] 李靖,王成涛,刘国荣,等. 电子鼻快速检测煎炸油品质[J]. 食品科学,2013,34(8):236-239.

[21] 宋伟,刘璐,支永海,等. 电子鼻判别不同储藏条件下糙米品质的研究[J]. 食品科学,2010,31(24):360-365.

[22] 薛璐,王昌禄,胡志和,等. 基于电子鼻对酥油贮藏期间质量变化规律的研究[J]. 食品科学,2012,33(16):221-224.

(上接第324页)

2005, 70(1):7-11.

[5] 尤超,方波,张伟. 非水载体中维生素C稳定性研究[J]. 生物医学工程学杂志,2012,29(5):929-932.

[6] Jurkovic P, Sentjunc M, Gasperlin M, et al. Skin protection against ultraviolet induced free radicals with ascorbyl palmitate in microemulsions[J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2003, 56(1):59-66.

[7] 耿志明. L-抗坏血酸-6-棕榈酸酯特性及应用[J]. 江苏食品与发酵,1997(1):31-36.

[8] 何松,林富强,陈永恒. L-抗坏血酸棕榈酸酯在煎炸油中应用研究[J]. 现代食品科技,2010,26(9):972-974.

[9] 林富强,陈永恒,何松. L-抗坏血酸棕榈酸酯在配方乳品中

的应用[J]. 现代食品科技,2010,26(10):1114-1116.

[10] 李卓,晏日安,曾永青. 超声波强化酶法合成L-抗坏血酸癸酸酯及其抗氧化性研究[J]. 食品工业科技,2013,34(2):204-209.

[11] 中国国家标准化管理委员会. GB16314-1996,食品添加剂L-抗坏血酸棕榈酸酯[S]. 1996.

[12] 叶红德,郑大贵,肖竹平. 异抗坏血酸和抗坏血酸水溶液稳定性的比较研究[J]. 食品研究与开发,2006,27(9):136-139.

[13] 刘奕博,任国谱. 抗坏血酸及抗坏血酸棕榈酸酯的稳定性研究[J]. 食品工业科技,2012,33(23):303-305.

[14] 刘立红,刘立英. 金属元素与抗坏血酸关系的紫外吸收光谱研究[J]. 固原师专学报:自然科学版,2003,24(3):19-21.