



张欣,陈双宜,谷惠文,等. 基于电子鼻技术的荆州鱼糕贮藏过程新鲜度预测[J]. 轻工学报,2022,37(3): 17-25.
ZHANG X, CHEN S Y, GU H W, et al. Prediction of freshness of Jingzhou fish cake during storage based on electronic nose technology[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(3): 17-25. DOI: 10.12187/2022.03.003

基于电子鼻技术的 荆州鱼糕贮藏过程新鲜度预测

张欣¹, 陈双宜¹, 谷惠文², 尹小丽¹

- 1. 长江大学 生命科学学院, 湖北 荆州 434025;
- 2. 长江大学 化学与环境工程学院, 湖北 荆州 434023

摘要:以荆州鱼糕为研究对象,采用感官评定、挥发性盐基氮(TVB-N)检测和电子鼻技术分析不同贮藏条件下荆州鱼糕的新鲜度变化,并基于电子鼻检测数据,结合主成分分析(PCA)、层次聚类分析(HCA)、偏最小二乘判别分析(PLS-DA)和逐步多元线性回归分析(Stepwise-MLR)建立鱼糕新鲜度的判别和预测模型。结果表明:在4℃和室温条件下,电子鼻响应信号均能很好地区分鱼糕样品的新鲜度;鱼糕贮藏过程中产生的氮氧化物、硫化物、甲烷等是新鲜度下降的重要指标;基于电子鼻检测数据建立的多元线性回归预测模型的 R^2 均大于0.932 5,预测集样品的预测均方根误差均小于1.22,即电子鼻技术结合多元统计分析可作为一种无损、简便和快速检测鱼糕新鲜度的方法。

关键词:鱼糕;贮藏;新鲜度;电子鼻技术

中图分类号:TS254.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2022)03-0017-09

0 引言

荆州鱼糕属淡水鱼糜制品,富含蛋白质、不饱和脂肪酸等营养成分。在贮藏、运输和流通过程中,鱼糕极易受微生物、酶等作用而发生腐败变质,生成胺类、醛类、酮类、酯类等物质^[1-2],产生不良气味且新鲜度下降,严重影响其食用品质和安全性。目前,与水产品新鲜度检测相关的方法主要包括感官评定法、理化检验法和微生物检验法。其中,感官评定法快速有效,但存在感官疲劳、低阈值气味物质难以感知等问题;理化检验法和微生物检验法准确度较高,但存在破坏性检测、操作费时等问题^[3]。

电子鼻技术基于阵列传感器检测气味物质,具有无损、操作简便、快速等优点。利用电子鼻的特定传感器和模式识别系统,可以快速检测被测样品的整体气味信息。模式识别方法^[4](如主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)等)能完成对气味的检测分析,较好地地区分被测样品的品种、产地,预测被测样品在不同贮藏条件下的贮藏时间,评价被测样品的品质优劣^[5-6],已广泛应用于肉制品^[7]、酒类^[8]、水产品^[9]、蔬果类^[10]、粮食类^[11]等食品检测中。例如,S. Guney等^[12]采用具有8个金属氧化物传感阵列的电子鼻研究了竹荚鱼贮藏过程中的新鲜度变化,发现基于混合二叉决策树的电子鼻能很好

收稿日期:2021-09-14;修回日期:2022-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(31701693;32001790)

作者简介:张欣(1974—),男,湖北省荆州市人,长江大学讲师,主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail:1934112@qq.com

通信作者:尹小丽(1987—),女,湖北省监利市人,长江大学副教授,博士,主要研究方向为食品质量与安全真实性检测。E-mail:yinxiaoli@yangtzeu.edu.cn

地实现竹荚鱼的新鲜度预测。沈秋霞等^[13]采用低场核磁共振和电子鼻对鱼片在贮藏过程中的水分和挥发性成分进行检测,发现电子鼻检测结合 PCA 或 LDA 均可较好判断鱼片样品的品质变化,且检测结果与低场核磁、理化指标的实验结果一致。

新鲜度可以综合反映鱼糕的品质,目前尚未见基于电子鼻技术对鱼糕新鲜度预测的报道。基于此,本研究拟以 4 ℃ 和室温贮藏的荆州鱼糕为研究对象,采用感官评定、挥发性盐基氮(TVB-N)分析和电子鼻技术对鱼糕新鲜度进行评价,并基于电子鼻检测数据,结合 PCA、层次聚类分析(HCA)、偏最小二乘判别分析(PLS-DA)和逐步多元线性回归分析(Stepwise-MLR)建立鱼糕新鲜度的判别和预测模型,以期对荆州鱼糕新鲜度检测提供一种无损、简便和快速有效的方法。

1 材料与方法

1.1 实验材料与试剂

鱼糕样品,购自本地市场,均为当天制作。
主要试剂:硼酸、甘油、体积分数为 95%的乙醇溶液,国药集团化学试剂有限公司产;HCl,中国平煤神马集团开封东大化工有限公司产;K₂CO₃,天津市福晨化学试剂厂产;阿拉伯胶,天津市北辰方正试剂厂产;甲基红、亚甲基蓝,天津市致远化学试剂有限公司产。以上试剂均为分析纯。实验用水为超纯水,电阻率为 18.2 MΩ·cm。

1.2 主要仪器与设备

GL124I-1SCN 型分析天平(感量为 1 mg),赛多利斯科学仪器(北京)有限公司产;JB40-C 型电

动搅拌机,上海精密科学仪器有限公司产;H2P-250 型恒温培养箱(控温精度±0.1 ℃),上海精宏实验设备有限公司产;PEN3 型电子鼻,德国 Airsense 公司产。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备 剔除鱼糕样品表面的蛋黄液后进行分割(4.5 cm×2.8 cm×2 cm),每份(25±1) g,将分割好的鱼糕用保鲜膜密封后,分别进行 4 ℃ 和室温贮藏,备用。取样后立即对鱼糕样品进行感官评定,然后进行电子鼻和 TVB-N 检测,每个样品均重复测定 3 次,当感官评分≤3 或 TVB-N 含量>20 mg/100 g 时,结束实验^[16]。

1.3.2 感官评定 主要从弹性、颜色、气味 3 个方面对鱼糕样品进行评分,参考文献[14-15]制定的鱼糕感官评定标准见表 1。由 3 名感知能力灵敏的感官评定人员按表 1 分别对鱼糕的 3 项感官指标进行评分,取每项评分的平均值作为该项的综合感官评分。

1.3.3 TVB-N 含量测定 按照 GB 5009.228—2016 中的微量扩散法测定鱼糕样品的 TVB-N 含量^[16]。

1.3.4 电子鼻检测 取 5 g 鱼糕样品放入 100 mL 烧杯中,用保鲜膜封口后静置 5 min,用电子鼻检测烧杯中的挥发性成分。电子鼻检测的参数设置为清洗时间 150 s,检测时间 120 s。PEN3 型电子鼻的标准传感器信息见表 2。

1.4 数据分析

在 Simca-P 软件中完成电子鼻数据的 PCA、HCA 和 PLS-DA,在 SPSS 22.0 软件中建立 TVB-N 含量的逐步多元线性回归分析预测模型。

表 1 鱼糕感官评定标准
Table 1 Sensory evaluation criteria for fish cake samples

感官指标			感官评分/分
弹性	颜色	气味	
手指稍微下压,按压后表面无断裂且迅速恢复原状	表面颜色分布均匀,呈鱼肉本身白色	有明显的鱼肉香味,无腥味、胺味	7~9(新鲜度较好)
手指稍微下压,按压后表面无断裂但不能恢复原状,有凹陷	表面颜色分布稍微不均匀,有少部分呈浅黄色,或与新鲜鱼糕颜色有深浅差异	有轻微的肉香味或无味,但无腥味、胺味	4~6(新鲜度一般)
手指稍微下压,按压后表面出现断裂	表面颜色分布不均匀,大部分呈黄色或浅黄色,且表面变稀出现黏液	无鱼肉香味,有腥味、胺味	1~3(新鲜度较差)

2 结果与分析

2.1 鱼糕感官品质分析

鱼糕样品的感官评定结果见表 3。由表 3 可知,鱼糕样品的感官品质均随贮藏时间的延长逐

表 2 PEN3 型电子鼻的标准传感器信息

Table 2 Standard sensor information of PEN3 electronic nose		
序号	传感器名称	功能描述
1	W1C	对芳香成分灵敏
2	W5S	对氮氧化物灵敏
3	W3C	对氨水、芳香成分灵敏
4	W6S	对氢化物灵敏
5	W5C	对烷烃、芳香成分灵敏
6	W1S	对甲烷灵敏
7	W1W	对硫化物、有机硫化物灵敏
8	W2S	对乙醇灵敏
9	W2W	对芳香成分、有机硫化物灵敏
10	W3S	烷烃高浓度检测

表 3 鱼糕样品的感官评定结果

Table 3 Results of sensory evaluation for fish cake samples

4 ℃ 贮藏				室温贮藏			
贮藏时间/d	颜色/分	气味/分	弹性/分	贮藏时间/h	颜色/分	气味/分	弹性/分
0	9.67	10.00	10.00	0	9.67	10.00	10.00
1	9.67	8.33	9.67	12	9.00	8.33	9.00
2	9.00	8.00	8.00	24	8.33	7.67	8.00
3	8.33	6.76	7.67	36	8.33	7.33	8.00
4	7.00	6.00	7.67	48	7.00	6.00	7.33
5	6.67	5.33	5.33	60	5.67	4.33	6.00
6	6.33	5.33	4.67	72	5.00	3.33	5.33
7	5.33	5.00	4.00	84	3.00	2.67	4.67
10	3.33	3.33	2.33	96	2.33	2.33	3.00
12	3.00	3.00	2.00	108	1.00	1.00	1.67

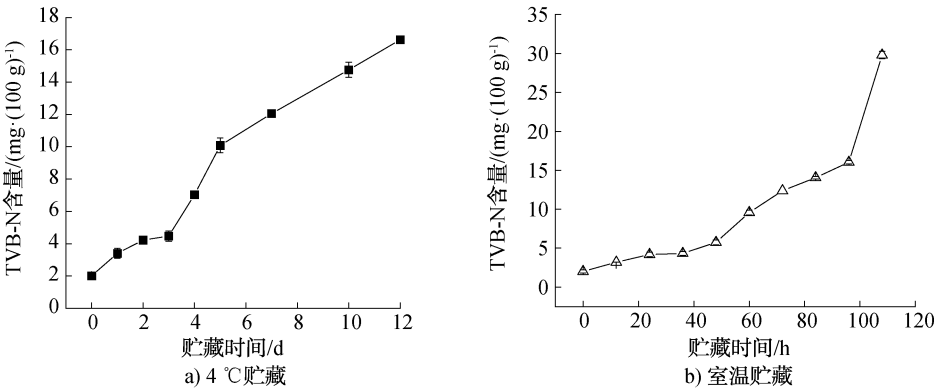


图 1 鱼糕样品在贮藏过程中的 TVB-N 含量变化

Fig. 1 Content change of TVB-N of fish cake samples during storage

渐下降,其中室温贮藏鱼糕样品的感官品质下降更快。在 4 ℃贮藏条件下,鱼糕样品在第 4~5 d 时的鱼肉香味、颜色明显变淡,按压后恢复原状的速度明显变慢,多次按压后不能恢复原状;在第 7~10 d 时,鱼糕样品表面开始变稀,有少部分呈浅黄色,按压后出现断裂;气味变化则相对较慢,在第 10~12 d 时,鱼糕样品的鱼肉香味消失,腥味不太明显。在室温贮藏条件下,鱼糕样品的气味较颜色和弹性变化更快,表明温度对挥发性成分影响较大,在第 60 h 左右,鱼糕样品的鱼肉香味明显消失,整体新鲜度下降明显。

2.2 鱼糕 TVB-N 含量变化分析

TVB-N 是评价鱼类制品新鲜度的重要理化指标,参照 GB 5009. 228—2016^[16]对鲜、冻动物性水产产品的规定,淡水鱼虾制品中 TVB-N 含量不得超过 20 mg/100 g。鱼糕样品在贮藏过程中的 TVB-N 含量变化如图 1 所示。由图 1 可以看出,4 ℃贮藏鱼

糕样品前 4 d 的 TVB-N 含量上升较缓慢,第 4 d 开始加速上升,第 12 d 增至 16.62 mg/100 g,虽未超过国标规定的安全限值,但从感官品质看已不符合食用要求。室温贮藏鱼糕样品的 TVB-N 含量在第 48 h 后增加较快,并在第 96 h 后骤增,迅速超过了国标规定的安全限值。

2.3 电子鼻检测结果分析

2.3.1 电子鼻对鱼糕挥发性气味的响应分析 电子鼻对鱼糕样品的响应曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出,随着测量时间的推移,传感器电导率响应值先增大后趋于平缓。这是因为随着挥发性成分在传感器表面富集,传感器的相对电阻率不断增大,最后趋于平缓达到稳定状态。因此,选取 118 s 处的数据进行挥发性气味分析。相较于未贮藏的新鲜鱼糕样品,室温贮藏 48 h 的鱼糕样品的各传感器电导率比值 $G/G_0(G_0/G)$ 均有增大现象,其中对硫化物、有机硫化物灵敏的传感器通道 W1W 的响应值最高, $G/G_0(G_0/G)$ 明显增大;另外,对甲烷灵敏的传感器通道 W1S、对氮氧化物灵敏的传感器通道 W5S 的 $G/G_0(G_0/G)$ 也出现了明显增大的现象。这可能是因为室温贮藏鱼糕样品腐败变质,致使蛋白质分解产生了硫化物、甲烷和氮氧化物。

2.3.2 PCA 和 HCA 分析 为了更清晰地了解鱼糕样品在贮藏过程中电子鼻传感器指示的新鲜度变化,采用 PCA 对电子鼻响应数据进行分析,结果如图 3 所示。由图 3a) 可以看出,4 ℃ 贮藏鱼糕样品的前两个主成分的贡献率分别为 62.3% 和 17.7%,累积贡献率达 80.0%,表明前两个主成分所含信息能

较好地代表总体数据信息。新鲜鱼糕样品(d01, d02, d03)位于第一主成分正轴方向最右端,随着贮藏时间的延长,鱼糕样品在得分图上的位置逐渐向负轴方向移动。贮藏至第 4 d 的鱼糕样品(d41, d42, d43),第一主成分得分变为负值,表明此时鱼糕样品的新鲜度已有明显变化,这与感官评定结果一致,此时气味得分均值为 6 分,鱼糕样品的新鲜度明显下降。贮藏 12 d 的鱼糕样品(d121, d122, d123)在得分图上的位置明显偏离其他样品,此时其感官上的新鲜度已变差。由图 3b) 可以看出,室温贮藏鱼糕样品的前两个主成分的贡献率分别为 59.9% 和 27.4%,累积贡献率达 87.3%。新鲜鱼糕样品与不新鲜鱼糕样品在得分图上有较明显区分,前 24 h 的鱼糕样品与新鲜鱼糕样品的距离较近,说明新鲜度保持较好,与感官评定结果一致。贮藏 36~96 h 的鱼糕样品在得分图上距离较近,可认为贮藏 36 h 后,鱼糕样品的新鲜度开始明显下降。贮藏 108 h 的鱼糕样品在得分图上远离其他样品,独自聚为一类,即与其他样品相比,此时鱼糕样品的新鲜度已发生明显变化,这与感官评定和 TVB-N 含量的分析结果一致。PCA 结果显示,基于电子鼻数据进行鱼糕新鲜度评价的效果较好。

由图 3c) 可以看出,传感器 W1C、W3C、W5C 和 W1S 在第一主成分上的载荷参数较大,可作为区分新鲜与不新鲜鱼糕样品的主要传感器。其中 W1C、W3C、W5C 是对芳香族化合物、香气分子敏感的传感器,这些传感器的响应与新鲜度呈正相关。W1S

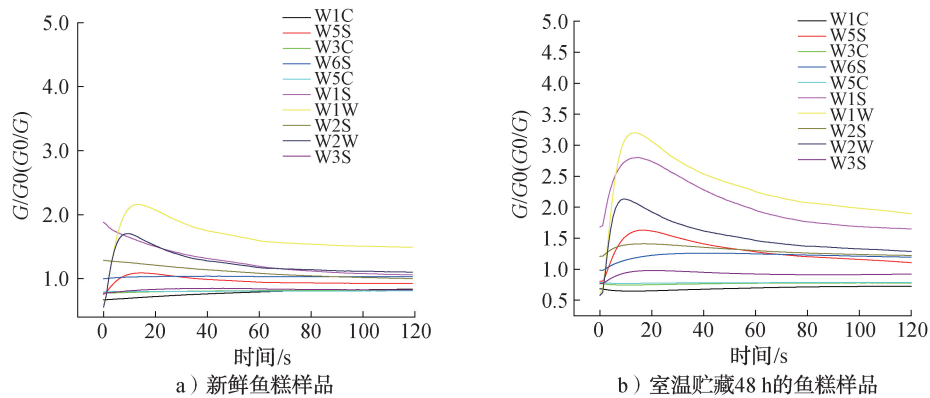


图 2 电子鼻对鱼糕样品的响应曲线
Fig. 2 Response curves of electronic nose to fish cake samples

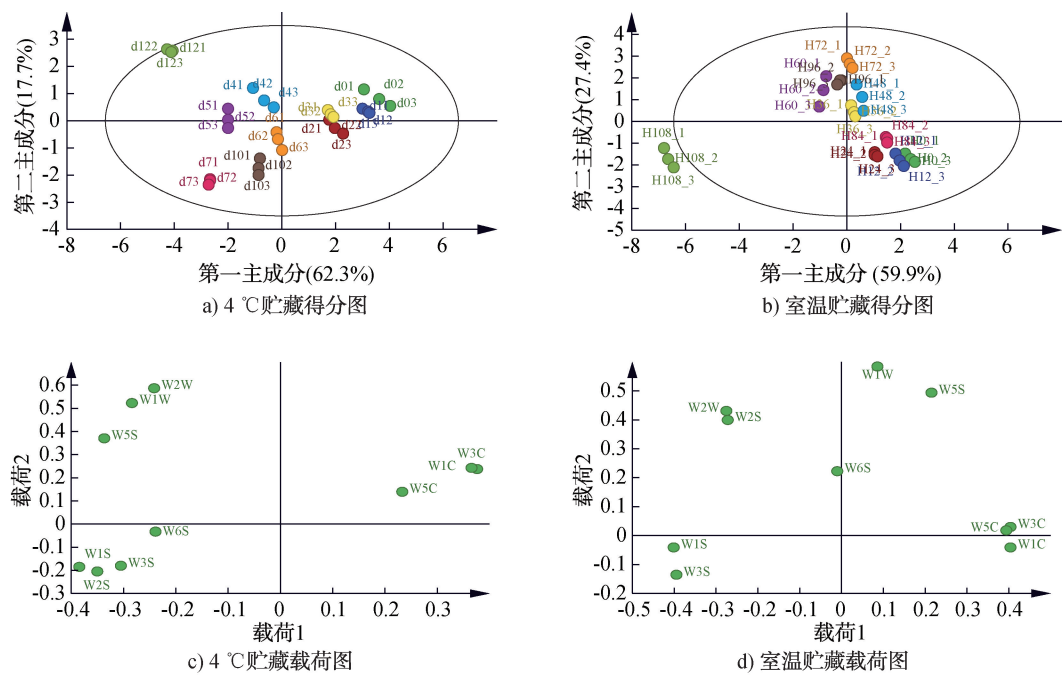


图 3 鱼糕样品的 PCA 结果

Fig. 3 PCA results of fish cake samples

是对甲烷等烷类物质灵敏的传感器,与鱼糕样品的新鲜度呈负相关。这是因为随着贮藏时间的延长,鱼糕样品中的蛋白质等分解产生了甲烷等物质^[17]。而 W2W、W1W 和 W5S 在第二主成分上的载荷参数较大,是鱼糕样品新鲜度发生显著变化的关键差异传感器。W2W 和 W1W 为对硫化物和有机硫化物灵敏的传感器,W5S 为对氮氧化物灵敏的传感器,这些物质的产生与脂肪、蛋白质腐败变质过程中的分解密切相关,这些物质的增加也意味着新鲜度的下降。相对而言,W6S 在第一和第二主成分上的载荷参数均较小,表明其对新鲜度变化不灵敏。由图 3d)可以看出,W6S 对应的传感器对鱼糕样品新鲜度的变化相对不灵敏,W1C、W3C 和 W5C 这 3 个传感器的响应与新鲜度呈正相关,其他 6 个传感器的响应与新鲜度呈负相关。

对前 5 个主成分数据进行的 HCA 结果如图 4 所示。由图 4a)可以看出,以距离 40 为基准可将 4 °C 贮藏鱼糕样品分为 3 类:贮藏前 3 d 鱼糕样品与新鲜鱼糕样品聚为一类,可分类为新鲜鱼糕样品;贮藏 4~10 d 的鱼糕样品聚为一类,可判定为次新鲜鱼糕样品;贮藏 12 d 的鱼糕样品单独聚为一类,此时样品新鲜度很差,感官上已不能食用,为不新鲜鱼

糕样品。由图 4b)可以看出,以距离 20 为基准也可将室温贮藏鱼糕样品分为 3 类:前 24 h 的鱼糕样品与新鲜鱼糕样品聚为一类;贮藏 36~96 h 的鱼糕样品聚为一类,其中贮藏 84 h 的鱼糕样品也被归为了新鲜鱼糕样品类别,可能该点是异常点;贮藏 108 h 的鱼糕样品单独聚为一类,此时在感官和理化标准上均已不可食用。HCA 结果与 PCA 结果一致。

2.3.3 PLS-DA 分析 PCA 和 HCA 为无监督的模式识别方法,为探索电子鼻实验数据结合监督模式识别方法进行鱼糕贮藏过程新鲜度判别的可能性,进一步采用有监督的模式识别方法 PLS-DA 对不同贮藏时间的鱼糕样品进行分析,结果如图 5 所示。根据 PCA 和 HCA 分析结果标记类别标签,将 4 °C 和室温贮藏的鱼糕样品均分为 3 类。由图 5a)可以看出,4 °C 条件下,新鲜鱼糕样品(绿色)主要位于坐标系的第一象限,次新鲜鱼糕样品(蓝色)位于第三和第四象限,不新鲜鱼糕样品(红色)位于第四象限且与新鲜和次新鲜鱼糕样品的距离均较远。PLS-DA 模型对自变量的累积方差解释率(R^2X)为 0.991,对因变量的累积方差解释率(R^2Y)为 0.961,模型预测率(Q^2)为 0.931,表明该模型可有效区分 4 °C 贮藏鱼糕样品的新鲜度。由图 5b)可以看出,

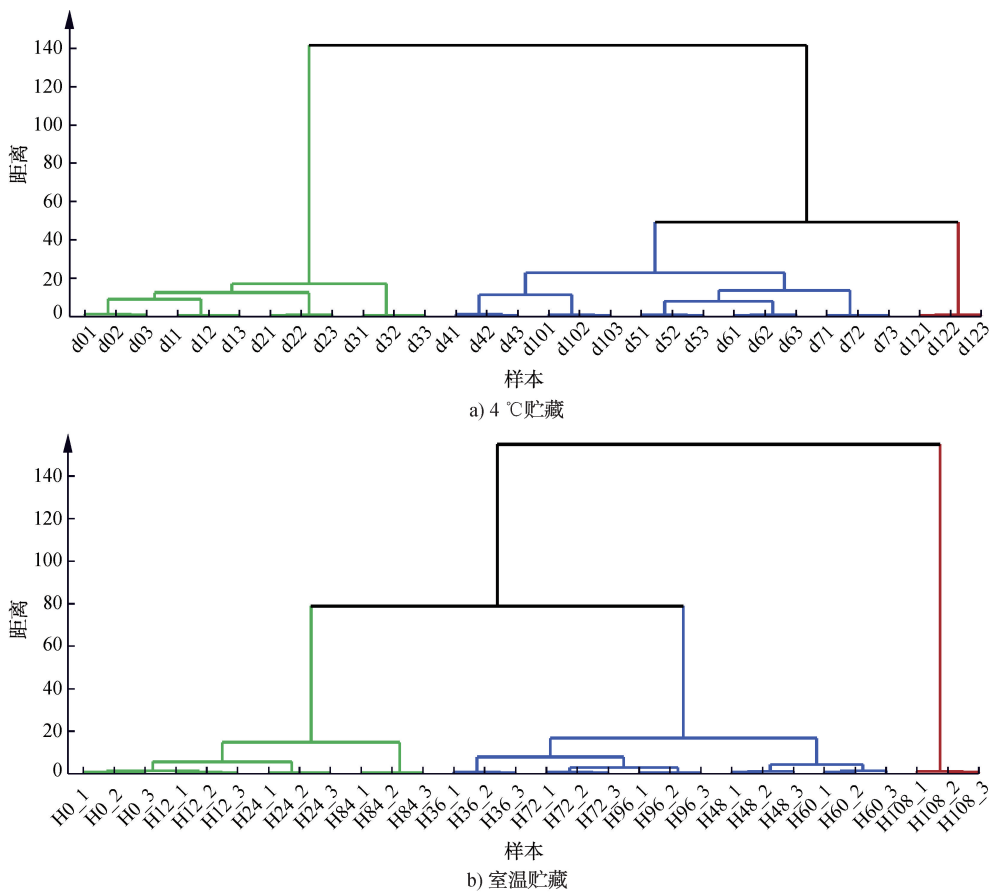


图 4 鱼糕样品的 HCA 结果
Fig. 4 HCA results of fish cake samples

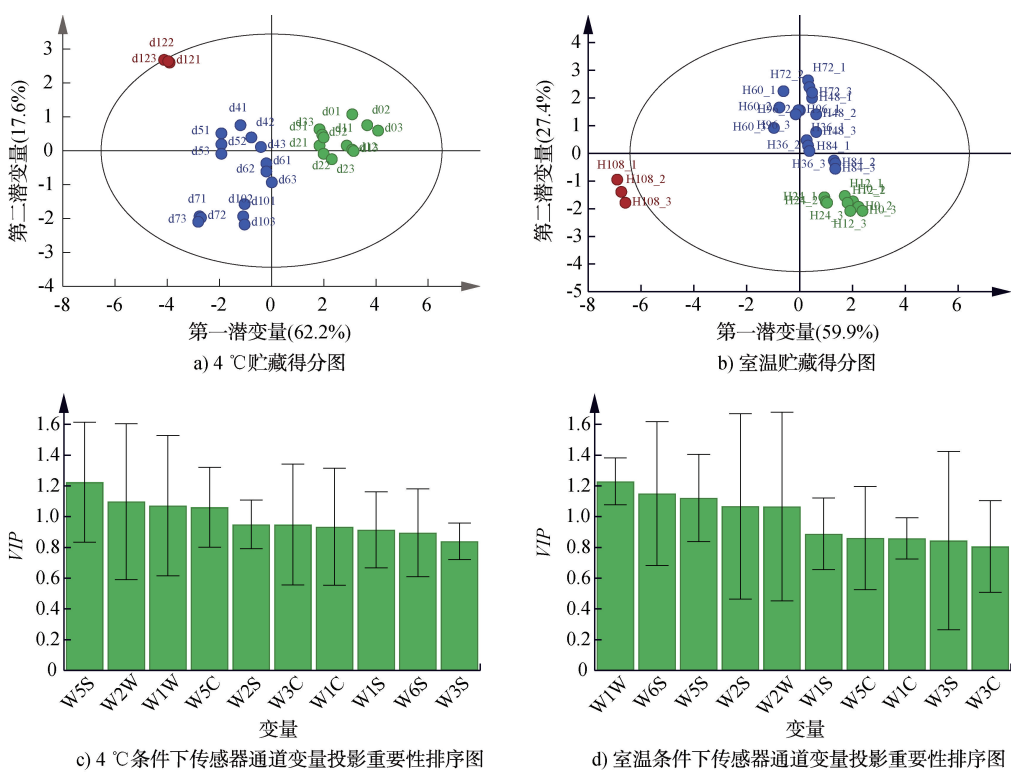


图 5 鱼糕样品的 PLS-DA 结果
Fig. 5 PLS-DA results of fish cake samples

新鲜鱼糕样品位于第二象限,次新鲜鱼糕样品位于第一和第四象限,不新鲜的鱼糕样品位于第三象限,落在 95%置信区间外,显示了与新鲜鱼糕样品的明显差异。此时,PLS-DA 模型对自变量的 R^2X 为 0.997,对因变量的 R^2Y 为 0.957,模型 Q^2 为 0.914,表明该模型可有效区分室温贮藏鱼糕样品的新鲜度。

在 PLS-DA 模型中,可根据变量投影重要性(VIP)判断分类过程中各变量的重要性,其中 VIP 大于 1 的变量对不同类样本的区分贡献较大。由图 5c)可以看出,VIP 大于 1 的传感器通道包括 W5S、W2W、W1W 和 W5C。由图 5 d)可以看出,VIP 大于 1 的传感器通道包括 W1W、W6S、W5S、W2S 和 W2W。综上可知,W5S(氮氧化物)、W2W(有机硫化物)和 W1W(硫化物、有机硫化物)3 个传感器为共有的对新鲜度区分有重要贡献的变量,即电子鼻技术结合 PCA 和 PLS-DA 可以较好地地区分鱼糕样品的新鲜度。

2.3.4 Stepwise-MLR 分析 通过检测蛋白质分解产生的氨类、胺类等碱性含氮物质可得到评价鱼类制品新鲜度的重要指标 TVB-N,而电子鼻的部分传感器也可检测到含氮挥发性成分,因此,笔者以电子鼻传感器通道信号为自变量,TVB-N 含量为因变量,进一步进行 Stepwise-MLR 分析。相比传统的多元回归分析,Stepwise-MLR 分析会对自变量进行筛选,保留对因变量影响较大的自变量,使回归方程更合理地反映自变量与因变量的关系。将鱼糕样品按 7:3 分为校正集和预测集,校正集 21 个样品,预测

集 9 个样品。Stepwise-MLR 模型预测结果如图 6 所示。基于 W3C、W5S 和 W1W 这 3 个传感器通道信号与 TVB-N 含量建立 4 ℃贮藏鱼糕样品线性回归模型,其 R^2 为 0.925 0,这表明电子鼻的 W3C、W5S 和 W1W 传感器通道对鱼糕样品新鲜度的变化有较强的响应,基于这 3 个传感器通道信号,可以预测鱼糕样品在贮藏过程中的 TVB-N 含量。TVB-N 含量的多元线性回归预测模型如下:

$$\text{TVB-N 含量} = 97.799 - 126.894W3C \text{ 通道信号} + 20.646W5S \text{ 通道信号} - 8.599W1W \text{ 通道信号}$$

基于这一回归模型预测样品的 TVB-N 含量如图 6a)所示,实测值与预测值的相关系数 R^2 为 0.932 5,预测集样品的预测均方根误差为 1.21,表明所建立的 Stepwise-MLR 模型预测结果准确。

基于 W1S、W3C、W5C、W5S、W2S 和 W1C 这 6 个传感器通道信号与 TVB-N 含量建立的室温贮藏鱼糕样品线性回归模型,其 R^2 为 0.992 8,表明以上 6 个传感器通道对鱼糕样品新鲜度的变化有较强的响应。TVB-N 含量的多元线性回归预测模型如下:

$$\text{TVB-N 含量} = -107.121 + 19.638W1S \text{ 通道信号} + 634.4W3C \text{ 通道信号} - 436.521W5C \text{ 通道信号} + 14.937W5S \text{ 通道信号} - 19.732W2S \text{ 通道信号} - 87.028W1C \text{ 通道信号}$$

基于这一回归模型预测样品的 TVB-N 含量如图 6b)所示,实测值与预测值的相关系数 R^2 为 0.992 8,预测集样品的预测均方根误差为 0.62,表明所建立的 Stepwise-MLR 模型预测结果准确。

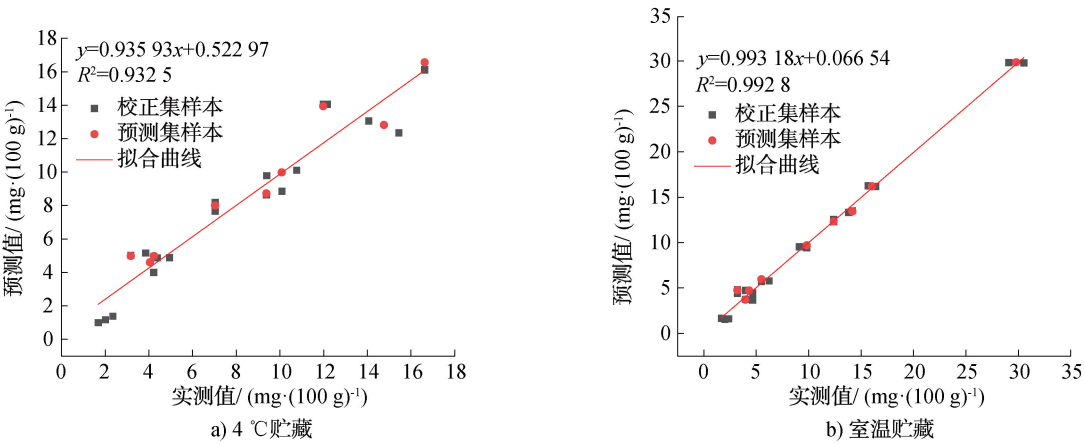


图 6 Stepwise-MLR 模型预测结果
Fig. 6 Prediction results of Stepwise-MLR models

3 结论

本文基于电子鼻检测信号,结合 PCA、HCA、PLS-DA 和 Stepwise-MLR 多元统计分析方法建立了鱼糕贮藏过程中新鲜度的预测模型。通过 PCA、HCA 和 PLS-DA 分析发现,基于电子鼻响应信号可以将新鲜鱼糕样品、次新鲜鱼糕样品和不新鲜鱼糕样品区分开,鱼糕贮藏过程中产生的氮氧化物、硫化物、甲烷等是新鲜度下降的重要指标。基于这些重要指标对应的电子鼻传感器信号建立了鱼糕贮藏过程中 TVB-N 含量的多元线性回归预测模型,模型预测值与实测值的相关系数 R^2 均大于 0.932 5,预测集样品的预测均方根误差均小于 1.22。因此,基于电子鼻技术预测鱼糕样品贮藏过程中新鲜度的变化是可行的。该研究对开发鱼糕样品新鲜度的无损、快速检测方法具有一定的指导意义。下一阶段将进一步结合气相色谱-质谱联用技术研究鱼糕贮藏过程中气味的变化,并优选合适的传感器和多元统计分析方法,建立更精准的新鲜度预测模型。

参考文献:

- [1] WELLS N, YUSUFU D, MILLS A. Colourimetric plastic film indicator for the detection of the volatile basic nitrogen compounds associated with fish spoilage[J]. *Talanta*, 2019, 194: 830–836.
- [2] KOSOWSKA M, MAJCHER M A, FORTUNA T, et al. Volatile compounds in meat and meat products[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 37(1): 1–7.
- [3] ZHOU J J, WU X Y, CHEN Z, et al. Evaluation of freshness in freshwater fish based on near infrared reflectance spectroscopy and chemometrics[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 106: 145–150.
- [4] 吴海龙, 龙婉君, 谷惠文, 等. 高阶仪器多维校正理论及其在环境分析化学中的应用研究进展[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(3): 74–86.
- [5] ALI M M, HASHIM N, ABD AZIZ S, et al. Principles and recent advances in electronic nose for quality inspection of agricultural and food products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 1–10.
- [6] SANAEIFAR A, ZAKIDIZAJI H, JAFARI A, et al. Early detection of contamination and defect in foodstuffs by electronic nose: A review [J]. *TRAC-Trends in Analytical Chemistry*, 2017, 97: 257–271.
- [7] KODOGIANNIS V. Application of an electronic nose coupled with fuzzy-wavelet network for the detection of meat spoilage[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(4): 730–749.
- [8] GAMBOA J C R, ALBARRACIN E E S, DA SILVA A J, et al. Wine quality rapid detection using a compact electronic nose system: Application focused on spoilage thresholds by acetic acid[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 108: 377–384.
- [9] HUI G H, WANG L Y, MO Y H, et al. Study of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) quality predictive model based on electronic nose[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 166: 301–308.
- [10] QIU S S, WANG J. The prediction of food additives in the fruit juice based on electronic nose with chemometrics[J]. *Food Chemistry*, 2017, 230: 208–214.
- [11] XU J Y, LIU K W, ZHANG C. Electronic nose for volatile organic compounds analysis in rice aging[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 83–93.
- [12] GUNEY S, ATASOY A. Freshness classification of horse mackerels with E-nose system using hybrid binary decision tree structure[J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2020, 34(3): 2050003.
- [13] 沈秋霞, 朱克永, 李明元, 等. 低场核磁结合电

子鼻判定复合保鲜剂对冷藏虹鳟鱼片品质变化的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35 (12): 130-136.

[14] 曲映红,王锋,施文正. 感官评定在鱼糜制品工艺优化中的应用[J]. 山东化工, 2018, 47 (22): 122-124.

[15] 王丹,姜启兴,许艳顺,等. 鱼糕质构的仪器分析与感官评定间的相关性[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 24-27, 210.

[16] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定: GB 5009. 228—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[17] 刘明,潘磊庆,屠康,等. 电子鼻检测鸡蛋货架期新鲜度变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (4): 317-321.

Prediction of freshness of Jingzhou fish cake during storage based on electronic nose technology

ZHANG Xin¹, CHEN Shuangyi¹, GU Huiwen², YIN Xiaoli¹

1. College of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434025, China;

2. College of Chemistry and Environmental Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China

Abstract: At different storage conditions, the freshness of fish cake after storage was analyzed by sensory evaluation, volatile basic nitrogen (TVB-N) detection and electronic nose. Combining with principal component analysis (PCA), hierarchical cluster analysis (HCA), partial least square discriminant analysis (PLS-DA) and stepwise multiple linear regression analysis (Stepwise-MLR), freshness discriminant and prediction analysis based on the electronic nose data were carried out. The research results show that the freshness of the fish cake samples was well distinguished at 4 °C and room temperature. Nitrogen oxide, sulfide and methane were the important indications of freshness decrease. The correlation coefficients between measured and predicted TVB-N values based on stepwise-MLR were greater than 0.932 5. And the predicted root mean square errors of the prediction set samples were less than 1.22. It could be concluded that electronic nose combined with multivariate statistical analysis could provide a nondestructive, simple and rapid method for detecting the freshness of fish cake.

Key words: fish cake; storage; freshness; electronic nose technology

(责任编辑:杨晓娟)