

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20231202002

基于电子鼻、电子舌技术的荣昌猪肉及其制品 贮藏过程新鲜度检测研究

丛 军^{1,2}, 李 星^{1,2*}

(1. 重庆市畜牧科学院食品加工研究所, 荣昌 402460; 2. 重庆市肉质评价与加工工程技术研究中心, 荣昌 402460)

摘 要: **目的** 探究电子鼻、电子舌对贮藏期间荣昌猪肉及其制品新鲜度变化的检测效果。**方法** 测定贮藏期间荣昌猪肉及其制品菌落总数(total viable count, TVC)、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)及感官特性的变化,并以此划分其新鲜度等级。同时,采用电子鼻、电子舌分别对贮藏期间荣昌猪肉及其制品进行检测,运用线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)、传感器贡献率分析>Loading)、主成分分析(principal component analysis, PCA)识别荣昌猪肉及其制品的新鲜度。**结果** 电子鼻能够检测到荣昌猪肉及其制品在贮藏期间的气味变化,并能够对其新鲜度进行区分,而传感器 W1W 对应的硫化物类的变化是电子鼻检测其新鲜度的主要依据。电子舌能够很好地区分贮藏期间荣昌猪肉及其制品的滋味变化,并能够区分其新鲜度。**结论** 利用电子鼻、电子舌技术能够识别不同新鲜度的荣昌猪肉及其制品,为进一步研究荣昌猪肉及其制品新鲜度快速检测提供方法参考和理论依据。

关键词: 电子鼻; 电子舌; 荣昌猪肉及其制品; 菌落总数; 新鲜度

Detection of freshness of Rongchang pork and its products during storage based on electronic nose and electronic tongue technology

CONG Jun^{1,2}, LI Xing^{1,2*}

(1. Institute of Food Processing, Chongqing Academy of Animal Science, Rongchang 402460, China;
2. Chongqing Engineering Research Center of Meat Quality Evaluation and Processing, Rongchang 402460, China)

ABSTRACT: Objective To explore the detection effect of electronic nose and electronic tongue on the freshness changes of Rongchang pork and its products during storage. **Methods** Measuring the total viable count (TVC), total volatile basic nitrogen (TVB-N) and sensory properties of Rongchang pork and its products during storage to confirm the freshness according to the TVC. At the same time, electronic nose and electronic tongue were used to detect the various indexes of Rongchang pork and its products in the storage of them. Furthermore, using linear discriminant analysis (LDA), Loading analysis (Loading) and principal component analysis (PCA) to analysis these data in order to confirm the freshness of Rongchang pork and its products. **Results** The electronic nose could detect the odor variation and freshness of Rongchang pork also its products during storage. The changes of sulfide corresponding to

基金项目: 重庆市畜牧科学院科研机构绩效引导专项(22530J)、国家生猪技术创新中心奖补专项(21611)

Fund: Supported by the Performance Guidance Project for Research Institutions of Chongqing Academy of Animal Sciences (22530J), and the Special Award and Subsidy Program of National Center of Technology Lnnovation for Pigs (21611)

*通信作者: 李星, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为畜禽肉品质分析评价及加工技术。E-mail: lixing03@126.com

*Corresponding author: LI Xing, Master, Associate Professor, Chongqing Academy of Animal Sciences, No.51, Changlong Road, Rongchang 402460, China. E-mail: lixing03@126.com

sensor W1W was the major defining basis for the electronic nose detection. The electronic tongue could well distinguish the freshness and flavor changes of Rongchang pork and its products during storage. **Conclusion** The electronic nose and electronic tongue technology can be used to identify Rongchang pork and its products with different freshness, which provides a method reference and theoretical basis for the further study of the rapid detection of the freshness of Rongchang pork and its products.

KEY WORDS: electronic nose; electronic tongue; Rongchang pork and its products; total bacterial count; freshness

0 引 言

猪肉是中国最主要的肉类消费产品, 据国家统计局 2022 年调查统计, 全国猪牛羊禽肉产量为 9227 万 t, 其中猪肉产量 5541 万 t, 约占总产量的 60%^[1]。荣昌猪是我国西南型猪种中著名的地方良种猪^[2], 其肉质优良, 适宜加工成回锅肉、卤肉、腊肉等制品。猪肉及其肉制品是日常生活中不可缺少的动物蛋白来源, 同时也是微生物生长的天然培养基^[3]。鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉在贮藏的过程中, 由于微生物的作用, 其中的营养物质逐渐分解变质, 产生对人体有毒有害的物质^[4]。不仅影响食用品质, 甚至危及生命安全。

新鲜度是衡量猪肉品质的重要指标, 传统对肉类新鲜度评估的方法主要有感官评价、理化检测和微生物检测。但存在检测周期长、操作烦琐、易受人为因素影响等不足^[5]。近年来, 随着智能传感技术的发展, 电子鼻和电子舌等电子传感设备在检测领域表现出良好的适用性。由于其检测速度快、灵敏度高、重复性好, 被广泛应用于食品评价。国内外的研究人员已经利用电子鼻、电子舌技术评定了牛羊肉^[6-7]、猪肉^[8-10]、鸡肉^[11-12]、鱼肉^[13-14]等肉类的新鲜度, 然

而这些研究多以未加工的鲜肉样品进行评价, 鲜有对其肉制品的新鲜度进行检测, 检测效果更是未知。同时, 这些研究未能将气味传感器和味觉传感器两种技术联用。

本研究以荣昌猪的鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉为实验对象, 分别采用电子鼻、电子舌技术检测其在贮藏期间气味和滋味的变化, 结合菌落总数(total viable count, TVC)分析结果, 验证电子鼻、电子舌技术对荣昌猪肉及其制品新鲜度区分的有效性, 旨在为荣昌猪肉及其制品新鲜度快速检测提供方法参考和理论依据。

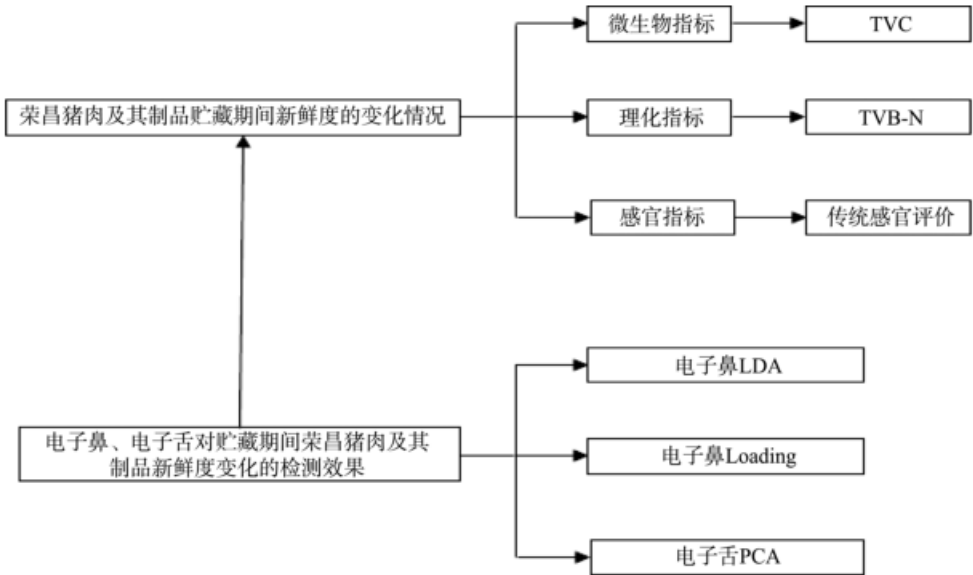
1 材料与amp;方法

1.1 实验设计

本研究共进行了 5 个实验, 具体实验设计及技术路线图如图 1。

1.1.1 荣昌猪肉及其制品贮藏期间新鲜度的变化情况

为测定贮藏期间荣昌猪肉及其制品新鲜度的变化, 本实验通过测定微生物指标(TVC)、理化指标[挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)]以及感官指标(传统感官评价), 以期得到贮藏期间新鲜度的变化情况。



注: 挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N); 线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA); 传感器贡献率分析>Loading); 主成分分析(principal component analysis, PCA)。

图1 技术路线图
Fig.1 Technical roadmap

1.1.2 电子鼻、电子舌对贮藏期间荣昌猪肉及其制品新鲜度变化的检测效果

为验证电子鼻、电子舌是否能识别荣昌猪肉及其制品的新鲜度,采用电子鼻 LDA、电子鼻 Loading、电子舌 PCA 进行验证。

1.2 材料与仪器

荣昌猪肉(重庆麒豪农牧有限责任公司); 平板计数琼脂(生物试剂, 北京奥博星生物技术有限责任公司); 耐高温蒸煮袋(江苏申凯包装高新技术股份有限公司)。

PEN3 电子鼻(德国 Aisense 公司); Taste Sensing System SA402B 电子舌系统(日本 Insent 公司); JC100D 立式压力蒸汽灭菌器[德强净化科技(山东)有限公司]; GZX-GF101-II 电热恒温鼓风干燥箱(上海跃进医疗器械有限公司); SW-CJ-1FD 单人单面净化工作台(苏州净化设备有限公司); BPC-150F 生化培养箱(上海一恒科学仪器有限公司); DZ-500 真空包装机(诸城市美川机械有限公司); J-HH-6A 数显恒温水浴锅(上海皓庄仪器有限公司); PX223ZH 电子天平[精度 1 mg, 奥豪斯仪器(常州)有限公司]。

1.3 实验方法

1.3.1 样品预处理

鲜肉: 取荣昌猪背最长肌, 切成 200 g 左右的块状; 回锅肉: 取荣昌猪三线肉, 参考白婷等^[15]的方法进行加工, 灭菌(121℃, 15 min)后冷却, 成品取 200 g 左右; 卤肉: 取荣昌猪前腿肉, 参考何丹等^[16]的方法进行加工, 灭菌(121℃, 15 min)后冷却, 成品切成 200 g 左右的块状; 腊肉: 取荣昌猪后腿肉, 参考张东等^[17]的方法进行加工, 成品切成 200 g 左右的块状; 不同样品均使用聚乙烯(polyethylene, PE)进行真空包装, 置于 4℃冰箱存放, 以上每组均制备 3 个平行样品, 定期取样测定。

1.3.2 微生物指标测定

TVC 按照 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》进行测定, 实验设计 3 个平行样品。

1.3.3 理化指标测定

TVB-N 按照 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》微量扩散法进行测定, 实验设计 3 个平行样品。

1.3.4 感官评价

感官评价小组由 5 人组成, 该 5 名成员均为食品专业研究生, 并通过 GB/T 16291.1—2012《感官分析选拔、培训与管理评估员一般导则: 优选评估员》的选拔与培训。感官特性包括质地、气味、色泽 3 个方面, 评价小组根据样品呈现的感官状态打分, 分值设定: 新鲜 5 分, 较新鲜 4 分, 一般 3 分, 略有腐败 2 分, 明显腐败 1 分。

1.3.5 电子鼻检测

分别称取搅碎后的鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉样品各 10 g, 放置于 50 mL 顶空瓶中, 加盖密封, 置于水浴锅中 40℃静置平衡 30 min, 然后进样测定。测定参数: 清洗时间 120 s, 归零时间 5 s, 进样时间 60 s, 2 次进样间隔清洗时间 120 s, 载气流速 400 mL/min。每个样品设计 3 个平行。采用电子鼻程序 Winmuster 进行 LDA 分析和 Loading 分析。电子鼻具有 10 个高灵敏度的传感器, 其检测的物质见表 1。

表 1 电子鼻 10 种气敏传感器阵列及对应敏感物质类型
Table 1 The 10 kinds of gas sensor arrays and sensors of electronic nose

阵列序号	传感器名称	敏感物质类型
1	W1C	芳香成分, 苯类
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	芳香成分, 氨类
4	W6S	氢化物
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	甲基类
7	W1W	硫化物
8	W2S	醇类、醛酮类
9	W2W	芳香成分、有机硫化物
10	W3S	长链烷烃

1.3.6 电子舌检测

分别称取搅碎后的鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉样品各 30 g, 加入 150 mL 去离子水混匀, 倒入耐高温蒸煮袋中, 蒸煮袋封口后置于 100℃水浴锅中煮制, 鲜肉、腊肉煮制 30 min, 回锅肉和卤肉煮制 10 min, 冷却至室温。用快速滤纸过滤肉汤, 收集滤液于电子舌专用样品杯中进行测定。测定前需要活化传感器 24 h, 并对电子舌进行初始化、校准和诊断。每个样品设计 4 个平行, 取后 3 次作为测试结果, 以确保传感器输出响应值的稳定性。电子舌检测实验配备 5 种传感器, 分别用于测定酸味、苦味、苦味回味、涩味、涩味回味、鲜味、鲜味回味、咸味。

1.4 数据处理

各项指标重复测定 3 次, 结果采取平均值±标准偏差形式。当 $P < 0.05$ 认为差异显著。使用 IBM SPSS Statistics 26.0 以及电子鼻、电子舌仪器配套软件进行数据处理, GraphPad Prism 6 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 TVC 分析

微生物污染是猪肉及其制品发生腐败变质的主要原因, 其数量可以反映猪肉及其制品的新鲜度^[18-19]。一般认为, 当 TVC 小于 4 lg(CFU/g)时为新鲜状态, TVC 在 4~5 lg(CFU/g)之间时为较新鲜状态, TVC 大于 5 lg(CFU/g)时已经腐败^[20-22]。

4 组样品贮藏期间 TVC 的变化如图 2a、图 3a 所示。鲜肉的初始 TVC 为 3.62 lg(CFU/g), 为新鲜状态。至第 3 d, 鲜肉的 TVC 为 5.14 lg(CFU/g), 为腐败状态。肖虹等^[23]用无菌薄膜包装后的猪后腿肉贮藏 3 d 后 TVC 为 7.86 lg(CFU/g), 高于本研究结果, 可能是因为本研究所采用的真空包装比薄膜包装抑菌效果好。随着贮藏时间的延长, 回锅肉和卤肉的特 TVC 值整体呈上升趋势。第 3 d 时, 回锅肉的特 TVC 接近 4.00 lg(CFU/g), 至 10 d 时, 回锅肉的特 TVC 为 5.04 lg(CFU/g), 为腐败状态。而卤肉在第 5 d 时 TVC 才接近 4.00 lg(CFU/g), 至第 12 d 时超过国家标准限值[GB 2726, ≤ 5 lg(CFU/g)]。二者在相同条件下贮藏, 新鲜度的变化趋势有所差异, 且回锅肉的特 TVC 要高于卤肉, 这可能是因为卤肉中盐含量较高, 且添加的香料具有一定的抑菌作用^[24]。腊肉的初始 TVC 为 2.30 lg(CFU/g), 随着贮藏时间的增加, TVC 的值逐渐增加, 至 130 d 时, 腊肉 TVC 接近 5.00 lg(CFU/g), 此时腊肉仍未发生变质, 这可能是因为腊肉含盐量高, 且风干、熏制等工艺减少了腊肉中的水分, 抑制了微生物的生长繁殖。

2.2 TVB-N 分析

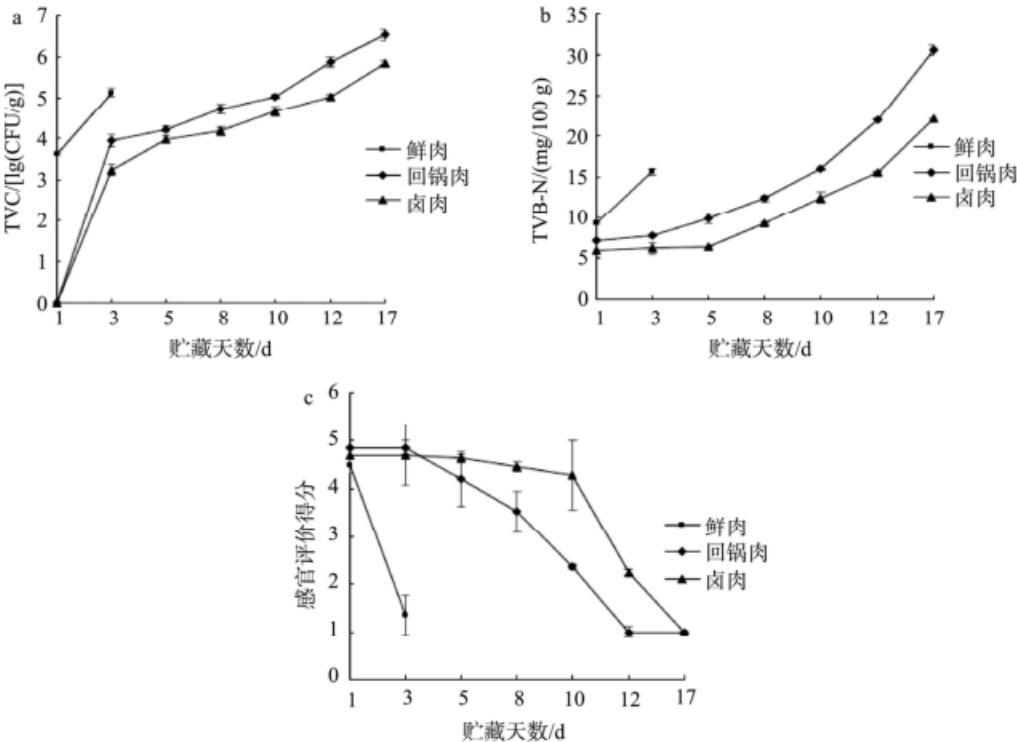
TVB-N 是评定猪肉及其制品品质的重要指标, 能客观地反映猪肉及其制品品质变化, 其含量与新鲜程度呈反比。

4 组样品贮藏期间 TVB-N 的变化如图 2b、图 3b 所示。随着贮藏时间的延长, 4 组样品的 TVB-N 整体呈上升趋势。其中鲜肉的 TVB-N 上升最快, 在第 3 d 时即超过国家标准

限值(GB 2707, ≤ 15 mg/100 g)。回锅肉的初始 TVB-N 为 7.11 mg/100 g, 第 3 d 时为 7.77 mg/100 g, 此阶段 TVB-N 增长较为缓慢, 第 10 d 时, TVB-N 上升至 15.94 mg/100 g, 而在第 10 d 后回锅肉的特 TVB-N 上升明显, 此时回锅肉质黏稠, 已有异味。卤肉的初始 TVB-N 为 5.86 mg/100 g, 第 5 d 时为 6.33 mg/100 g, 此阶段 TVB-N 增长较为缓慢, 而到第 12 d 时, TVB-N 为 15.55 mg/100 g, 而在第 12 d 之后卤肉的特 TVB-N 上升明显, 此时卤肉质黏稠, 已有异味。腊肉的初始 TVB-N 为 8.52 mg/100 g, 随着贮藏时间的增加, TVB-N 的值逐渐增加, 至 130 d 时, 腊肉 TVB-N 为 14.66 mg/100 g, 此时腊肉仍未发生变质, 没有明显异味。该结果与 2.1 TVC 分析结果相一致, 研究表明, 在细菌和酶的作用下, 肉中的蛋白质或其他含氮化合物被分解为氨类和胺类等碱性物, 使 TVB-N 变大^[25]。

2.3 感官评价分析

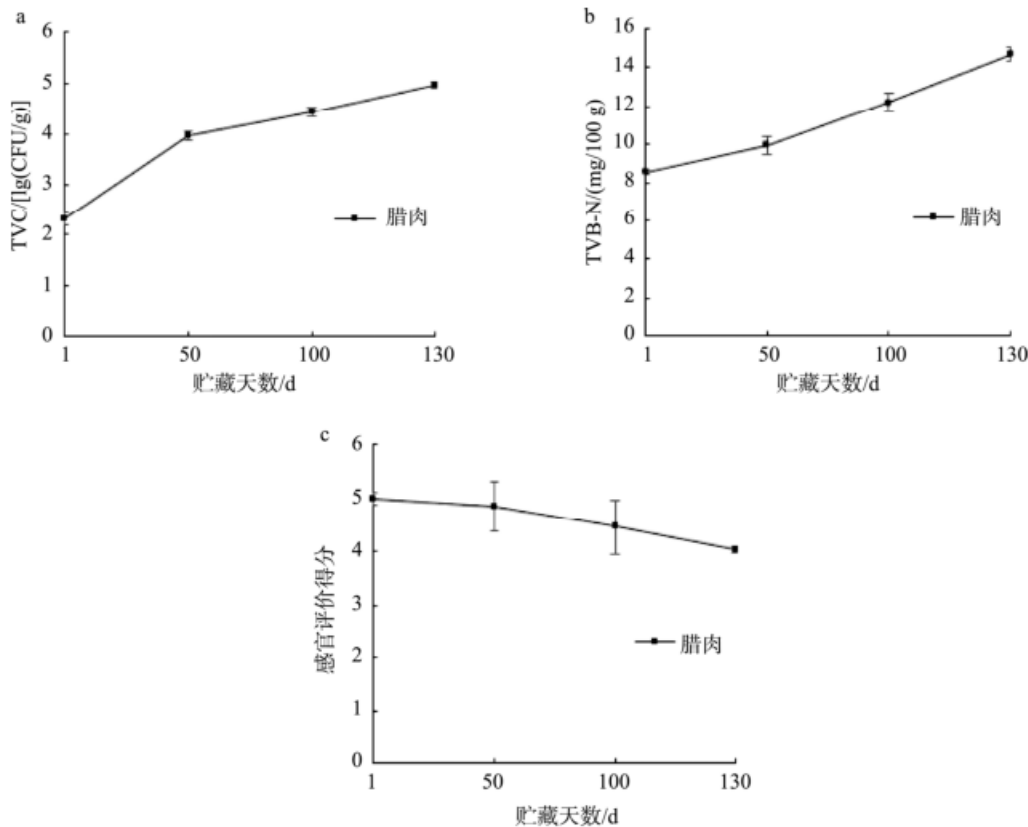
感官评价是评定猪肉及其制品新鲜度最直接的指标。4 组样品贮藏期间感官评价得分的变化如图 2c、图 3c 所示。随着贮藏时间的延长, 4 组样品的感官评价得分整体呈下降趋势。鲜肉的初始感官为新鲜状态, 至第 3 d, 鲜肉的质地变黏、有明显臭味、色泽变暗, 已经腐败。回锅肉在 1~3 d 之间鲜度变化不大, 仍然保持新鲜, 3 d 之后至 10 d 之前, 新鲜度有所下降。第 10 d 时感官评分接近 2 分, 质地轻微变黏, 出现轻微异味, 色泽轻微变暗, 逐渐开始腐败。10 d 之后



注: a. TVC变化; b. TVB-N变化; c. 感官评价得分变化。

图2 鲜肉、回锅肉、卤肉贮藏期间TVC、TVB-N和感官评价得分的变化

Fig.2 Changes of TVC, TVB-N, sensory scores of fresh meat, double cooked meat and marinated meat during storage



注: a. TVC变化; b. TVB-N变化; c. 感官评价得分变化。

图3 腊肉贮藏期间TVC、TVB-N和感官评价得分的变化

Fig.3 Changes of TVC, TVB-N, sensory scores of cured meat during storage

~17 d 回锅肉已完全腐败。卤肉在 1~5 d 之间鲜度变化不大, 仍然保持新鲜, 5 d 之后~12 d 之前, 新鲜度有所下降。第 12 d 时感官评分接近 2 分, 质地轻微变黏, 出现轻微异味, 色泽轻微变暗, 逐渐开始腐败。12 d 之后~17 d 卤肉已完全腐败。腊肉在贮藏期间的感官评价得分下降趋势相对平稳, 第 1~50 d 之间感官评分为 5.00~4.85, 50 d 之后~130 d 感官评分为 4.85~4.03, 此时腊肉的感官状态仍较好。这也与 TVC、TVB-N 的变化相对应。

2.4 新鲜度划分结果

4 组样品新鲜度划分结果见表 2。综合以上分析得出, 随着贮藏时间的延长, 新鲜度逐渐下降。鲜肉在贮藏期间新鲜度变化比较明显, 第 1 d 时为新鲜状态, 第 3 d 时则发生腐败; 卤肉的新鲜状态(1~5 d)比回锅肉(1~3 d)时间久, 较新鲜状态持续时间二者基本相同, 回锅肉(10 d)比卤肉(12 d)更早发生腐败变质; 腊肉新鲜度的变化比较缓慢, 在 1~50 d 处于新鲜状态, 51~130 d 处于较新鲜状态。

2.5 荣昌猪肉及其制品的电子鼻分析

2.5.1 荣昌猪肉及其制品的电子鼻响应曲线

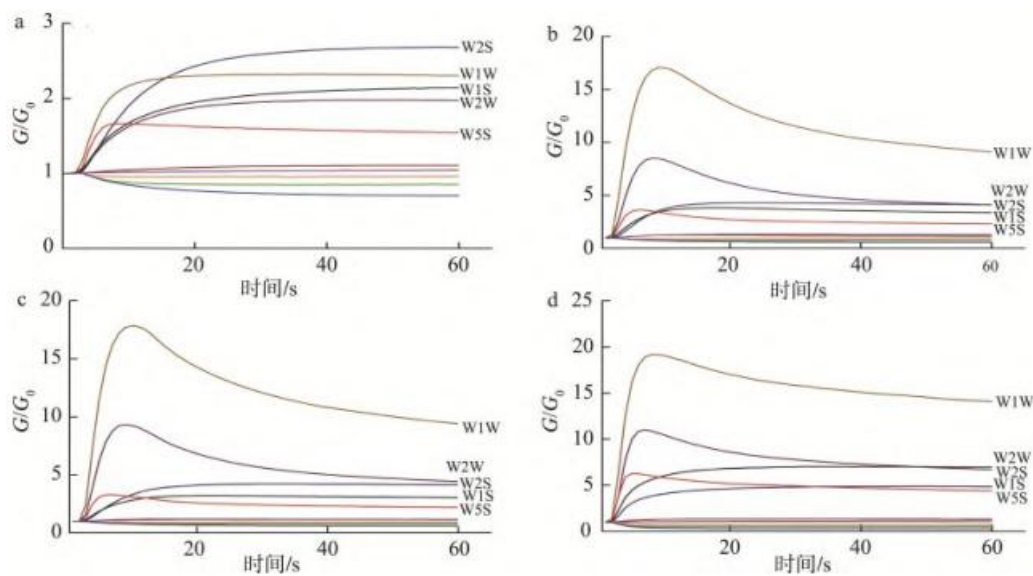
图 4 为 4 组样品贮藏初期的电子鼻信号响应曲线, 横

坐标为检测时间, 纵坐标为传感器的响应, 表示为 G/G_0 , 其中 G_0 和 G 是传感器检测前后的电阻, 每一条曲线代表一个传感器。由图 4 可知, 鲜肉(图 4a)的响应信号远低于回锅肉(图 4b)、卤肉(图 4c)、腊肉(图 4d), 这是由于生猪肉气味清淡, 一般只有咸味、金属味和血腥味; 经高温处理后, 肉中的化合物会发生复杂的反应, 产生多种挥发性芳香物质^[26-27]。鲜肉中 W2S(醇类、醛酮类)的响应值最高, 其次是 W1W(硫化物)、W1S(甲基类)、W2W(芳香成分和有机硫化物)、W5S(氮氧化物), 而其他传感器的响应变化很小。LI 等^[28]采用电子鼻检测冷却猪肉的挥发性风味, 结果表明猪肉产生的挥发性气味主要含有醇类、酮类、硫化物、醛类和有机酸, 与本研究的结果相似。回锅肉(图 4b)、卤肉(图 4c)、腊肉(图 4d)的响应曲线图中, W1W(硫化物)传感

表 2 鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉贮藏期间新鲜度划分结果
Table 2 Freshness division results of fresh meat, double cooked meat, marinated meat and cured meat during storage

类别	鲜肉	回锅肉	卤肉	腊肉
新鲜	1 d	1~3 d	1~5 d	1~50 d
较新鲜	-	4~9 d	6~11 d	51~130 d
腐败	3 d	>10 d	>12 d	-

注: -表示新鲜度划分结果未知。



注: a. 鲜肉; b. 回锅肉; c. 卤肉; d. 腊肉。

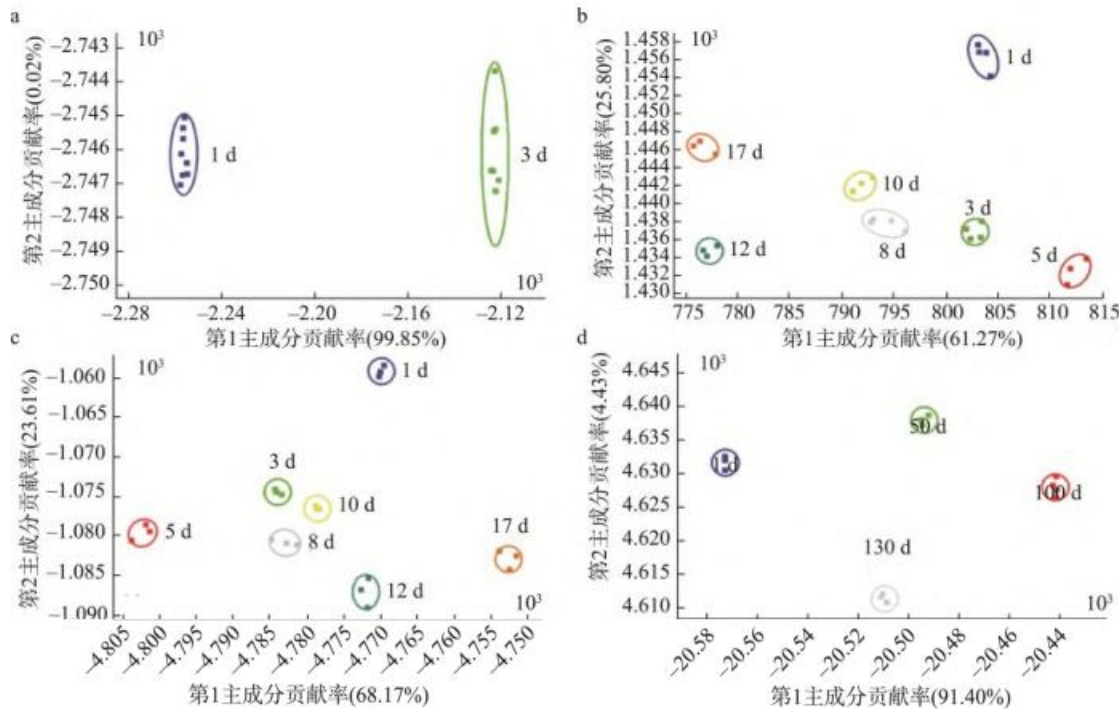
图4 鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉的电子鼻信号响应曲线

Fig.4 Electronic nose signal response curves of fresh meat, double cooked meat, marinated meat and cured meat

器的响应值最大, 其次为 W2W(有机硫化物)、W2S(醇类、醛酮类)、W1S(甲基类)传感器。熟化后荣昌猪肉挥发性气味主要是硫化物, 有机硫化物、醇类、醛酮类和甲基类的含量也有所增加。如图 4 所示, 从 55~60 s 之间, 电子鼻响应值曲线趋于平稳, 为保证实验数据准确度, 节约实验时间, 本研究选取响应曲线平稳状态下第 55 s 的响应值进行后续分析。

2.5.2 基于电子鼻响应值的 LDA

LDA 是一种常规的模式识别和样品分类方法, 它是对采集的挥发性成分响应值的空间分布状态及彼此之间的距离进行分析, 拉大组间距离, 缩小组内距离, 进而反映样品中挥发性气味的差异情况^[29]。4 组样品贮藏期间电子鼻 LDA 分析结果见图 5。



注: a. 鲜肉; b. 回锅肉; c. 卤肉; d. 腊肉。

图5 鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉贮藏期间的电子鼻LDA分析

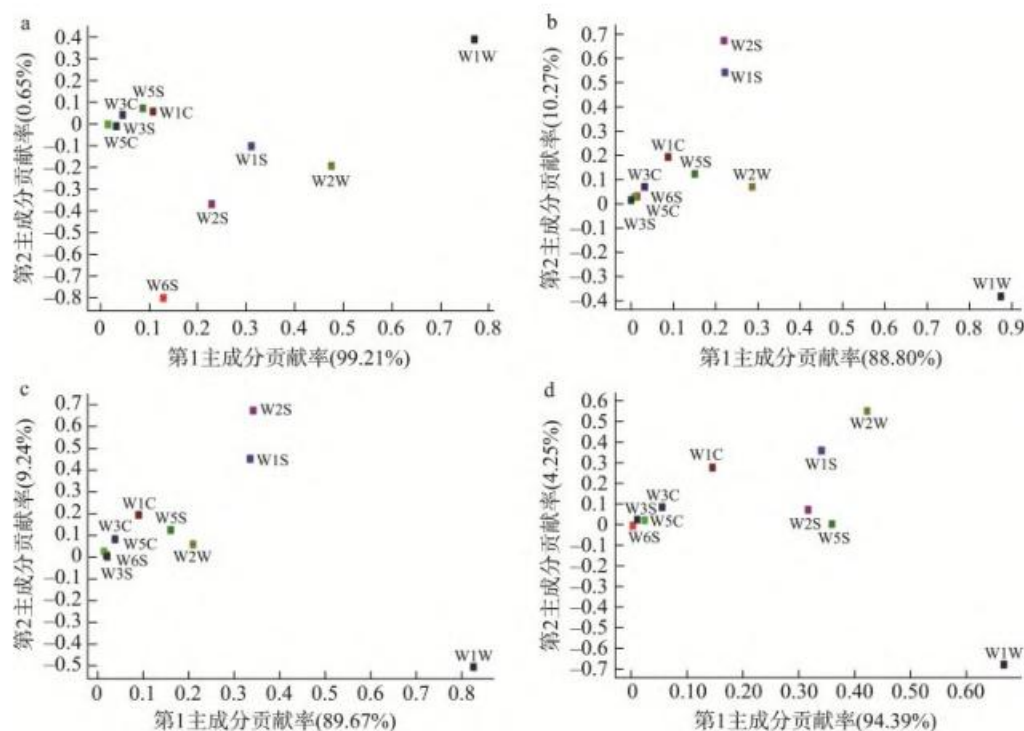
Fig.5 LDA analysis of electronic nose during storage of fresh meat, double cooked meat, marinated meat and cured meat

由图 5 可知, 鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉的第 1、2 主成分总贡献率分别为 99.87%、87.07%、91.78%、95.83%, 均高于 85%, 说明样品的两个主成分能够反映样品的整体信息^[26]。图 5a 中, 鲜肉第 1 d 与第 3 d 的响应信号无重叠且距离较远, 即鲜肉第 1 d 与第 3 d 产生的挥发性气味区别较大, 电子鼻可以识别不同贮藏日期鲜肉的新鲜度。图 5b 中, 回锅肉第 1 d 的响应信号与其他日期无重叠, 说明此时气味与其他日期区别较大; 第 3~10 d 的响应信号距离较近, 说明此时回锅肉产生的挥发性气味区别较小; 至 12 d 后, 响应信号与其他日期无重叠, 产生的挥发性气味与其他日期区别较大。不同贮藏日期的回锅肉分布在 LDA 的不同区域, 表明电子鼻可以识别不同贮藏日期回锅肉的新鲜度。图 5c 中, 回锅肉第 1 d、5 d 的响应信号与其他日期无重叠, 说明此时气味与其他日期区别较大; 第 8~12 d 的响应信号距离较近, 说明此时回锅肉产生的挥发性气味区别较小; 至 12 d 后, 响应信号与其他日期无重叠, 产生的挥发性气味与其他日期区别较大。不同贮藏日期的卤肉响应信号分布在 LDA 的不同区域, 表明电子鼻可以识别不同贮藏日期卤肉的新鲜度。图 5d 中, 腊肉样品组内各个点间的距离很小, 很好地聚类在一起, 组间距离较大, 明显分布在 LDA 不同区域, 表明电子鼻可以识别不同贮藏日期腊肉的新鲜度。因此, 结合 TVC、TVB-N 和感官评价分析结果, 利用电子鼻能够区分荣昌猪肉及其制品的 3 种新鲜度。

2.5.3 Loading 分析

Loading 分析可以确定不同传感器对样品气味区分的贡献大小, 从而判断是哪类气味在样品区分过程中起主要作用^[30]。传感器越接近原点, 说明传感器对样品分析起到的作用越小, 反之则越大^[31]。

图 6 为 4 组样品的 Loadings 分析。由图 6 可知, 鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉的第 1、2 主成分总贡献率分别为 99.86%、99.07%、98.91%、98.64%, 说明样品之间挥发性气味相互独立, 区分度较好^[32]。图 6a 中, W1W 传感器对主成分 1、主成分 2 的贡献率均最大, W2W 传感器对主成分 1 的贡献率次之, 其余传感器主成分的贡献率较小甚至接近于零。由此可得, 含硫化合物在鲜肉贮藏过程中起主要区分作用, 其次为有机硫化物。含硫化合物主要来源于蛋白质分解产生, 大多数情况下肉中含硫化合物浓度很低, 但发生腐败时其含量会随着微生物的增殖而大幅提高^[33-34]。顾赛麒等^[34]采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法对贮藏期间猪肉产生的挥发性风味物质进行检测, 结合微生物实验分析确定了 9 种最重要的表征肉品腐败的特征性挥发物, 其中绝大多数为含硫化合物, 与本研究分析结果一致。图 6b、c 中, 回锅肉与卤肉的分析结果相似, W1W 传感器对主成分 1 贡献率最大, W2S、W1S 传感器对第 2 主成分贡献率最大, 由此可知, 含硫化合物在回锅肉、卤肉贮藏过程中起主要区分作用, 其次为醇类、醛酮类和甲基类成分。图 6d 中, W1W 传感器对主成分 1 贡献率最大; W2W 传感



注: a. 鲜肉; b. 回锅肉; c. 卤肉; d. 腊肉。

图6 鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉的电子鼻Loading分析

Fig.6 Electronic nose Loading analysis of fresh meat, double cooked meat, marinated meat and cured meat

器对第 2 主成分贡献率最大, W1S 传感器次之; 由此表明, 含硫化合物在腊肉在贮藏过程中起主要区分作用, 有机硫化物次之。综上可知, 在 4 组样品贮藏过程中, 传感器 W1W 对应的硫化物的变化是电子鼻检测其新鲜度的主要依据。此外, 图中有众多传感器的坐标接近原点, 对样品区分起的作用很小, 可以通过进一步研究对传感器阵列组合进行优化, 以达到更好的检测效果。

2.6 荣昌猪肉及其制品的电子舌分析

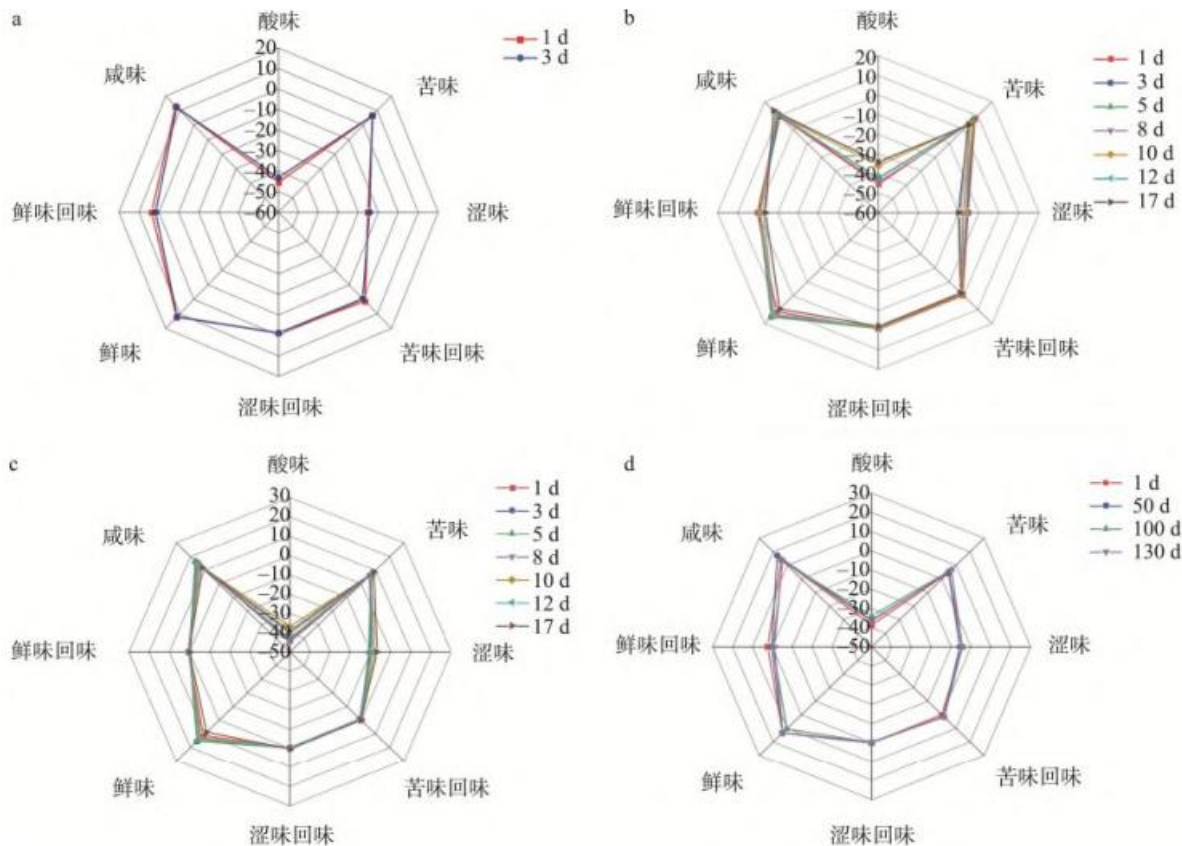
2.6.1 荣昌猪肉及其制品的电子舌响应值分析

电子舌对不同贮藏时间下 4 组样品的味觉响应值测定结果如图 7 所示, 由图 7 可知, 在整个贮藏过程中, 4 组样品的味觉响应轮廓大致相似, 但响应值存在一定差异, 说明不同传感器对不同贮藏时期的样品的敏感度不同。贮藏 1 d 时, 4 组样品的咸味和鲜味的响应信号值最高, 表明贮藏初期主要呈咸味和鲜味。随着贮藏时间的增加, 鲜味的信号强度总体呈下降趋势, 其中回锅肉和卤肉鲜味的下降趋势最为明显, 贮藏 17 d 后, 分别下降了 19.09% 和 22.76%; 酸味信号强度显著性增加($P<0.05$), 4 组样品分别由贮藏初期的-45.36、-45.46、-43.78、-38.55 增加至-43.11、-34.25、-38.31、-36.27, 表明贮藏后期主要呈酸味。这可能是因为贮藏期间受微生物生长繁殖的影响, 使样品中氨

基酸、呈味核苷酸、组氨酸等含量发生改变, 进而导致滋味物质发生变化^[35]。

2.6.2 基于电子舌响应值的 PCA

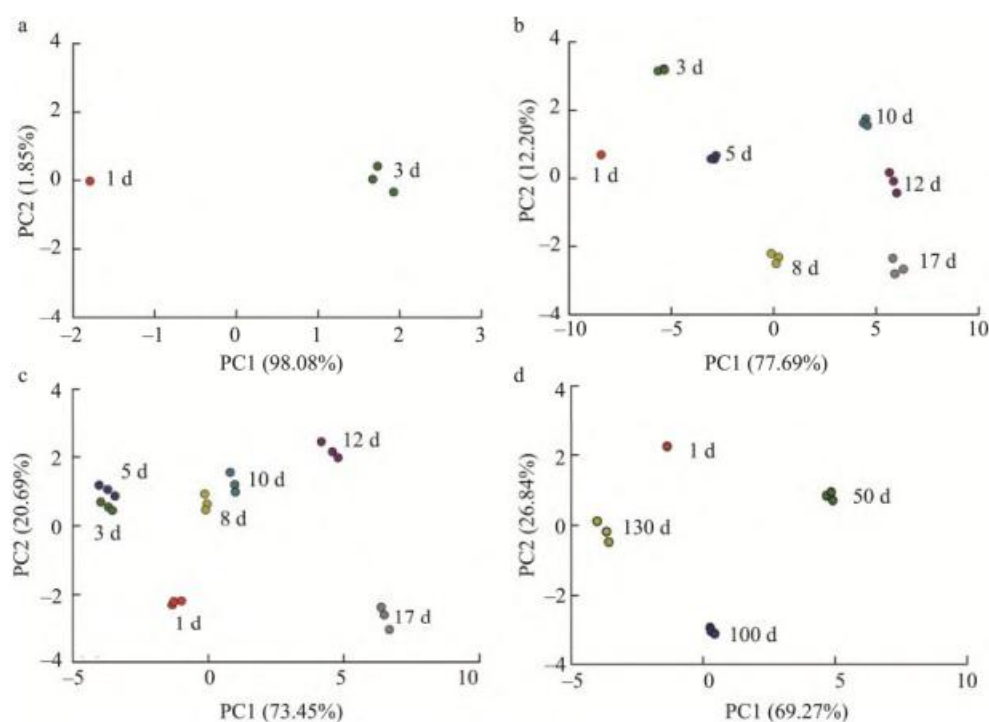
通过电子舌系统对 4 组样品贮藏期间的味觉响应值进行 PCA, 结果见图 8。由图 8 可知, 鲜肉、回锅肉、卤肉、腊肉的主成分总贡献率分别为 99.93%、89.89%、94.14%、96.11%, 说明 PCA 结果可以有效地反映样品的整体信息。4 组样品在不同贮藏期的滋味响应值分布在 PCA 的不同区域, 表明电子舌系统可以区分不同贮藏日期的样品。图 8a 中, 鲜肉第 1 d 与第 3 d 相隔较远, 说明彼此之间滋味特征差异较大。图 8b 中, 回锅肉第 1 d、3 d 分布于 PC1 负半轴, 第 10 d 分布于 PC1 正半轴, 且相隔较远, 说明彼此之间滋味特征差异较大。第 10 d 与 12 d 在 PCA 分布上较接近, 说明滋味特征比较相似。图 8c 中, 卤肉第 3 d、5 d 在 PCA 分布上较接近, 说明滋味特征比较相似。第 1 d 与第 5 d 在分布上相隔较远, 说明彼此之间滋味特征差异较大。第 12 d 与 17 d 分布于 PC1 正半轴, 与其他天数在 PCA 分布上相隔较远, 说明彼此之间滋味特征差异较大。图 8d 中, 腊肉不同天数明显分布在 PCA 不同区域, 说明彼此之间滋味特征差异较大。电子舌分析结果与 TVC、TVB-N 和感官评价测定结果相互印证, 说明电子舌能较好地地区分 3 种新鲜度的荣昌猪肉及其制品。



注: a. 鲜肉; b. 回锅肉; c. 卤肉; d. 腊肉。

图7 不同贮藏时间下荣昌猪肉及其制品的电子舌检测雷达图

Fig.7 Radar diagram of electronic tongue detection of Rongchang pork and its products under different storage times



注: a. 鲜肉; b. 回锅肉; c. 卤肉; d. 腊肉。

图8 鲜肉、回锅肉、卤肉和腊肉贮藏期间的电子舌PCA分析

Fig.8 Electronic PCA analysis of fresh meat, double cooked meat, marinated meat and cured meat during storage

3 结 论

本研究以荣昌猪肉及其制品为研究对象,以 TVC、TVB-N 和感官评价分析结果划分 3 个新鲜度等级,采用电子鼻、电子舌对其新鲜度进行识别。结果表明:在贮藏过程中,荣昌猪肉及其制品随着贮藏时间的增加,新鲜度呈下降趋势,鲜肉于第 3 d 达到上限[5.14 lg(CFU/g)],回锅肉于第 10 d 达到上限[5.04 lg(CFU/g)],卤肉于第 12 d 达到上限[5.03 lg(CFU/g)],腊肉于第 130 d 接近上限[4.96 lg(CFU/g)];电子鼻、电子舌能够对荣昌猪肉及其制品新鲜度进行有效区分,且分析结果与 TVC、TVB-N 和感官评价检测结果一致;Loading 分析发现,传感器 W1W 对应的硫化物类的变化是电子鼻检测其新鲜度的主要依据;电子舌响应值分析发现,荣昌猪肉及其制品在贮藏初期主要呈咸味和鲜味,在贮藏后期主要呈酸味。传统的感官评价和理化检测易受个体因素影响,且费时费力,而由传感器阵列和信号处理系统组成的电子鼻、电子舌能模拟人的嗅觉和味觉,并克服人的嗅觉疲劳和味觉疲劳,使检测结果更加可靠。利用电子鼻技术、电子舌技术能够快速、高效、准确地检测到荣昌猪肉及其制品在贮藏期间的气味变化和滋味变化,并区分其新鲜度。以上研究结果表明,电子鼻、电子舌技术能够作为荣昌猪肉及其肉制品贮藏过程新鲜度检测的有效手段。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2022 年统计数据[EB/OL]. [2023-01-18]. http://www.stats.gov.cn/sj/sjjd/202302/t20230202_1896736.html [2023-07-13].
- [2] 王金勇, 郭宗义, 朱丹. 荣昌猪[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [3] LI H, CHEN Q, ZHAO J. Non-destructive evaluation of pork freshness using a portable electronic nose (E-nose) based on a colorimetric sensor array [J]. *Anal Method*, 2014, 6(16): 6271–6277.
- [4] CHEN J, GU J, ZHANG R, *et al.* Freshness evaluation of three kinds of meats based on the electronic nose [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, (3): 605.
- [5] 牛超, 杨卫东, 胡鹏明, 等. Wi-freshness: 基于 CSI 的猪肉新鲜度检测系统研究[J]. *物联网学报*, 2023, 7(2): 143–152.
- [6] NIU C, YANG WD, HU PM, *et al.* Wi-freshness: Research on CSI-based pork freshness detecting system [J]. *Chin J Inter*, 2023, 7(2): 143–152.
- [7] GRASSI S, BENEDETTI S, OPIZZIO M, *et al.* Meat and fish freshness assessment by a portable and simplified electronic nose system (mastersense) [J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3225.
- [8] 刘小花, 周彬静, 彭蓉, 等. 基于电子鼻和高光谱成像技术的冷鲜牛肉微生物的生长模型构建[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(3): 595–605.
- [9] LIU XH, ZHOU BJ, PENG J, *et al.* Modeling of microbial growth in chilled beef based on the E-nose and hyperspectral imaging techniques [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2023, 46(3): 595–605.
- [10] XIAO HW, XIANG YL, CHENG K, *et al.* A comprehensive method for assessing meat freshness using fusing electronic nose, computer vision, and artificial tactile technologies [J]. *Sensors*, 2020, 2020: 14.
- [11] 周红标, 张宇林, 李珊, 等. 基于电子鼻的猪肉新鲜度的检测[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(6): 1386–1389.
- [12] ZHOU HB, ZHANG YL, LI S, *et al.* Detection of Pork freshness using a novel wireless electronic nose [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2013, 29(6): 1386–1389.
- [13] GIL L, BARAT JM, BAIGTS D, *et al.* Monitoring of physical-chemical

- and microbiological changes in fresh pork meat under cold storage by means of a potentiometric electronic tongue [J]. Food Chem, 2011, 126(3): 1261–1268.
- [11] 李玉花, 史翰卿, 熊资璇, 等. 融合电子鼻和视觉技术的鸡肉新鲜度检测装置研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 433–440.
- LI YH, SHI HQ, XIONG YW, et al. Research of chicken freshness detection device based on electronic nose and vision technology [J]. Trans Chin Soc Agric Mach. 2022, 53(11): 433–440.
- [12] EDITA R, DARIUS G, VINAUSKIENĖ R, et al. Rapid evaluation of fresh chicken meat quality by electronic nose [J]. Czech J Food Sci, 2018, (5): 420–426.
- [13] YING X, ZINNAI A, VENTURI F, et al. Freshness evaluation of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) by electronic nose [J]. J Food Meas Charact, 2017, 11(3): 1026–1034.
- [14] 贾哲, 陈晓婷, 潘南, 等. 基于电子舌快速检测冷藏双斑东方鲀的新鲜度[J]. 现代食品科技, 2021, 37(5): 220–229.
- JIA Z, CHEN XT, PAN N, et al. The freshness of frozen *Fugu bimaculatus* detected by electronic tongue [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(5): 220–229.
- [15] 白婷, 答博文, 汪正熙, 等. 回锅肉不同加工阶段的风味特征分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 244–257.
- BAI T, ZAN BW, WANG ZX, et al. Flavor components in different processing stages of twice-cooked pork [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(8): 244–257.
- [16] 何丹, 王卫, 吉莉莉, 等. 天然植物提取物对传统腌腊及酱卤肉制品特性的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(11): 18–23.
- HE D, WANG W, JI LL, et al. Effect of natural plant extracts on quality characteristics of traditional cured or sauced meat products [J]. Meat Res, 2019, 33(11): 18–23.
- [17] 张东, 李洪军, 王鑫月, 等. D-最优混料设计优化腊肉低盐配方[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(8): 204–211.
- ZHANG D, LI HJ, WANG XY, et al. D-optimal mixture design optimization of low salt formula for cured meat [J]. Food Ferment Ind, 2017, 43(8): 204–211.
- [18] 王丹凤, 王锡昌, 刘源, 等. 电子鼻分析猪肉中负载的微生物数量研究[J]. 食品科学, 2010, 31(6): 148–150.
- WANG DF, WANG XC, LIU Y, et al. Estimation of total bacterial count in pork using electronic nose [J]. Food Sci, 2010, 31(6): 148–150.
- [19] 朱瑶迪, 邹小波, 黄晓玮, 等. 猪肉贮藏过程中挥发性成分的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 374–378.
- ZHU YD, ZOU XB, HUANG XW, et al. Volatile components of variation in pork storage process [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(24): 374–378.
- [20] CUI H, DONG Y, LU TH, et al. Effect of ethanolic extract from *Morus alba* L. leaves on the quality and sensory aspects of chilled pork under retail conditions [J]. Meat Sci, 2021, 172: 108368.
- [21] 陈崇艳. 冷吃鹅肉特定腐败菌的鉴定、微波杀菌及防腐保质研究[D]. 自贡: 四川轻化工大学, 2021.
- CHEN CY. Identification of specific spoilage bacteria in cold eating goose meat, microwave sterilization and anticorrosive quality preservation research [D]. Zigong: Sichuan University of Light Industry and Technology, 2021.
- [22] 刘光宪, 王丽, 李雪, 等. 3种天然抗氧化剂对腊肉理化性质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(15): 6177–6184.
- LIU GX, WANG L, LI X, et al. Effects of 3 kinds of natural antioxidants on physicochemical properties of Chinese cured meat [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(15): 6177–6184.
- [23] 肖虹, 谢晶. 基于电子鼻技术判定冷却猪肉新鲜度[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(7): 169–172.
- XIAO H, XIE J. Determining the freshness of chilled pork based on electronic nose technology [J]. Food Ferment Ind, 2010, 36(7): 169–172.
- [24] 刘瑶瑶, 邹宇晓, 郑雪君, 等. 天然香辛料在肉制品绿色加工中的研究进展[J]. 中国调味品, 2022, 47(7): 215–220.
- LIU YY, ZHOU YX, ZHENG XJ, et al. Research progress of natural spices in green processing of meat products [J]. China Cond, 2022, 47(7): 215–220.
- [25] CAO Y, GU W, ZHANG. Effects of chitosan, aqueous extract of ginger, onion and garlic on quality and shelf life of stewed-pork during refrigerated storage [J]. Food Chem, 2013, 141(3): 1655–1660.
- [26] 林宇山, 岑泳延. 对猪肉风味的探讨[J]. 食品工业科技, 2006, (9): 194–197.
- LIN YS, CEN YY. Discussion on the flavor of pork [J]. Sci Technol Food Ind, 2006, (9): 194–197.
- [27] 吕东坡, 朱仁俊. 猪肉中风味物的研究进展[J]. 食品工业科技, 2009, 30(8): 352–355.
- LV DP, ZHU RJ. Research progress of pork flavor compounds [J]. Sci Technol Food Ind, 2009, 30(8): 352–355.
- [28] LI MY, WANG HB, SUN LX, et al. Application of electronic nose for measuring total volatile basic nitrogen and total viable counts in packaged pork during refrigerated storage [J]. J Food Sci, 2016, 81(4): M906–M912.
- [29] 白丽娟, 齐馨, 陈洋, 等. 电子鼻技术在小黄鱼新鲜度检测中的应用[J]. 食品工业科技, 2016, 37(14): 63–66.
- BAI LJ, QI X, CHEN Y, et al. Application of electronic nose technology in small yellow croaker freshness [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(14): 63–66.
- [30] GÓMEZ AH, WANG J, HU G, et al. Electronic nose technique potential monitoring mandarin maturity [J]. Sens Actuat B Chem, 2005, 113(1): 347–353.
- [31] 李晓晗, 陈慧敏, 王宝怡, 等. 电子鼻评价不同萎凋工艺对红茶香气的影响[J]. 茶叶通讯, 2020, 47(1): 102–106.
- LI XH, CHEN HM, WANG BY, et al. Effect of different withering process on aroma of black tea evaluated by electronic nose [J]. J Tea Commun, 2020, 47(1): 102–106.
- [32] 李雪, 杜传来, 翟立公, 等. 不同压榨温度下奇亚籽油气味的电子鼻分析[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 15–19.
- LI X, DU CL, ZHAI LG, et al. Analysis of odor components of chia seed oil at different pressing temperatures by electronic nose [J]. China Oils Fats 2021, 46(4): 15–19.
- [33] 李丽, 周洪斌, 王苏华, 等. 离子色谱法测定肉类中总硫的含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(16): 5588–5593.
- LI L, ZHOU HB, WANG SH, et al. Determination of total sulfur in meats by ion chromatography [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(16): 5588–5593.
- [34] 顾赛麒, 王锡昌, 刘源, 等. 不同新鲜度冷却猪肉中挥发物的变化[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(1): 169–176.
- GU SQ, WANG XC, LIU Y, et al. Changes of volatile compounds in chilled pork at different freshness [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2011, 27(1): 169–176.
- [35] CHEN DW, ZHANG M. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Food Chem, 2007, 104(3): 1200–1205.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



丛 军, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为畜禽肉制品加工。
E-mail: 18996097224@163.com



李 星, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为畜禽肉品质分析评价及加工技术。
E-mail: lixing03@126.com