

基于GC-IMS和电子鼻分析牛肉腐败进程中挥发性风味物质的变化

赵志平, 张盛源, 陈泓帆, 凌紫青, 贾效函, 刘达玉

Changes of Volatile Flavor Substances of Beeves in Spoilage Process Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry and Electronic Nose

ZHAO Zhiping, ZHANG Shengyuan, CHEN Hongfan, LING Ziqing, JIA Xiaohan, and LIU Dayu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070121>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电子鼻结合气相-离子迁移谱联用技术分析兰茂牛肝菌气调贮藏期间挥发性风味物质的变化

Changes in Volatile Compounds of *Lanmaoa asiatica* during Controlled Atmosphere Storage Using Electronic Nose Combined with Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy

食品工业科技. 2021, 42(21): 111-117 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070297>

基于HS-SPME-GC-MS法优化酱牛肉中挥发性风味物质萃取条件

Optimization of the Extraction Conditions of Volatile Flavors in Marinated Beef Based on HS-SPME-GC-MS Technique

食品工业科技. 2018, 39(15): 266-273 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.15.047>

基于电子鼻、气相-离子迁移谱 (GC-IMS) 法分析广西螺蛳粉与螺蛳鸭脚煲风味

Analysis of the Flavor of Guangxi Luosi-Noodle and Luosi-Hot-Pot by Electronic Nose and Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry (GC-IMS)

食品工业科技. 2021, 42(9): 281-288 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070197>

应用电子鼻和GC-MS比较牛肉不同部位的挥发性物质组成

Comparison of volatile components in different parts of beef by electronic nose and GC-MS

食品工业科技. 2017(21): 241-246 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.21.048>

基于气相-离子迁移谱技术分析烤羊肉串的挥发性风味成分

Analysis of Volatile Flavor Substances in Mutton Shashlik Based on GC-IMS Technology

食品工业科技. 2021, 42(8): 256-263 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060339>

基于气相离子迁移谱技术分析杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分

Analysis of Volatile Compounds in the Manufacturing Process of *Eucommia Ulmoides* Leaves Fu Brick Tea Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry Method

食品工业科技. 2021, 42(21): 73-82 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020147>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵志平, 张盛源, 陈泓帆, 等. 基于 GC-IMS 和电子鼻分析牛肉腐败进程中挥发性风味物质的变化 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 235–244. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070121

ZHAO Zhiping, ZHANG Shengyuan, CHEN Hongfan, et al. Changes of Volatile Flavor Substances of Beeves in Spoilage Process Based on Gas Chromatography–Ion Mobility Spectrometry and Electronic Nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 235–244. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070121

· 分析检测 ·

基于 GC-IMS 和电子鼻分析牛肉腐败进程中挥发性风味物质的变化

赵志平, 张盛源, 陈泓帆, 凌紫青, 贾效函, 刘达玉*

(成都大学肉类加工四川省重点实验室, 四川成都 610106)

摘要:为探究牛肉腐败进程中挥发性风味物质的变化规律, 本研究以不同保藏时间的牛肉为研究对象, 通过气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 技术和电子鼻分析其挥发性风味物质。结果表明, 通过 GC-IMS 共检出 55 种挥发性风味物质, 主要包括 12 种酮类物质、10 种醇类物质、9 种酯类物质、8 种醛类物质和 4 种烃类物质。GC-IMS 和电子鼻分析表明, 牛肉腐败过程中挥发性风味物质含量呈显著上升趋势, 其中醇类、醛类、酯类、酸类、呋喃、吡咯、噻唑、胺类、吡嗪和醚类物质持续增加; 酮类、烃类和含硫化合物逐渐增加, 在第 7 d 时达到峰值, 而后逐渐下降。PCA 和 PLS-DA 分析表明, 牛肉腐败过程中挥发性风味物质发生了显著性变化。通过 VIP 值共筛选出 16 个差异性风味物质, 随着保藏时间的延长, 正己醛-D、正己醛-M、丁醛-M、丁醛-D、四氢吡咯-M、异戊醇-D、异戊醇-M、正丙醇-D、2,3-丁二酮等刺激性、不愉快风味物质的含量逐渐增加, 可作为区分牛肉腐败进程的潜在生物标志物。本研究为牛肉腐败进程的监测提供一定的理论依据。

关键词:牛肉, 腐败, 挥发性风味物质, 气相色谱-离子迁移谱

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)11-0235-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070121



本文网刊:

Changes of Volatile Flavor Substances of Beeves in Spoilage Process Based on Gas Chromatography–Ion Mobility Spectrometry and Electronic Nose

ZHAO Zhiping, ZHANG Shengyuan, CHEN Hongfan, LING Ziqing, JIA Xiaohan, LIU Dayu*

(Meat Processing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: In order to investigate the changes of volatile flavor substances in the process of beeves spoilage, beeves with different storage time were employed. The volatile flavor substances of beeves in spoilage process were analyzed by using gas chromatography ion transfer spectroscopy (GC-IMS) and electronic nose. The results showed that a total of 55 volatile flavor substances were detected through GC-IMS, mainly including 12 ketones, 10 alcohols, 9 esters, 8 aldehydes and 4 hydrocarbons. GC-IMS and electronic nose analysis indicated that the types and contents of volatile flavor substances significantly increased during the spoilage process. The alcohols, aldehydes, esters, acids, furans, pyrroles, thiophenes, amines, pyridines and ethers continuously increased during the spoilage process. However, ketones, hydrocarbons, and sulfur compounds gradually increased and reached peak at the seventh day, and then gradually decreased. PCA and PLS-DA analysis suggested that there were significant differences in volatile flavor substances of beeves in spoilage process. Sixteen different volatile flavor substances were identified by variable importance for the projection (VIP) value, with the extension of storage, the contents of irritating and unpleasant flavor substances such as n-hexanal-D, n-hexanal-M, butyraldehyde-M, butyraldehyde-D, tetrahydropyrrole-M, isoamyl-D, isoamyl-M, n-propanol-D, 2,3-butanedione gradually

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 四川省重点研发计划项目 (2023YFN0014)。

作者简介: 赵志平 (1981–), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 肉类食品加工与安全, E-mail: zhaozhiping@cdu.edu.cn。

* 通信作者: 刘达玉 (1964–), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: liudayu@cdu.edu.cn。

increased, which could be used as potential biomarkers to distinguish beeves with different degrees of spoilage. This work provides a theoretical basis for monitoring beef spoilage process.

Key words: beef; spoilage; volatile flavor substances; gas chromatography-ion transfer spectroscopy

牛肉产业是我国畜牧业和肉类产业的重要组成部分,随着中国经济的快速发展,牛肉产业得以快速发展^[1]。中国已成为世界第三大牛肉生产国,2022年牛肉年产量达767万吨,牛肉产值约6780亿元^[2]。由于鲜牛肉富含蛋白质、脂肪,在贮藏运输过程中极易受到微生物污染而发生腐败变质^[3-4]。肉品腐败变质导致每年20%的肉品浪费,造成了严重的经济损失,并显著增加了食物中毒的发生率,极大地制约了我国牛肉产业的发展。牛肉腐败变质通常表现为异味、发黏、变色和变软等,其中由微生物产生的挥发性化合物是肉品腐败异味的主要来源^[5]。挥发性盐基氮、菌落总数等是反映牛肉等肉品腐败的重要指标。牛肉等肉品腐败周期一般为7~10 d^[6]。

肉品腐败气味是微生物生长代谢的结果,微生物及其代谢途径的不同将直接决定肉制品腐败气味^[7]。新鲜牛肉中常见的初始挥发性风味成分主要有己醛、2-丁酮、1-辛烯-3-醇等^[8],微生物产生的挥发性代谢物包括有机酸、挥发性脂肪酸、乙酯、硫化物、酮、醛、醇、氨等^[9],所有挥发性代谢物共同作用构成了牛肉腐败气味。以莓实假单胞菌(*Pseudomonas fragi*)和恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)为主的假单胞菌是牛肉中的优势腐败菌,在生长过程中会释放大量的乙酸乙酯、辛酸乙酯、二硫化碳、壬醛、庚醛和己醇等挥发性化合物^[10-11]。此外,热死环丝菌是牛肉中的优势腐败菌。2-甲基丁酸和3-甲基丁酸是热死环丝菌在有氧条件下的特殊代谢物^[12],具有浓烈的汗臭和腐臭味^[13],对肉制品风味有不良影响。腐败气味是消费者评判鲜肉腐败的重要指标,Argyri等^[8]研究发现2-戊酮、2-壬酮、2-甲基-1-丁醇、3-甲基-1-丁醇、己酸乙酯、丙酸乙酯、乳酸乙酯、乙酸乙酯、乙醇、2-庚酮、3-辛酮、双乙酰和乙偶姻是牛肉腐败过程中可能的腐败标志物。

腐败牛肉的风味大多通过GC-MS定性和定量检测。近年来,气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)越来越多地用于食品工业中的风味表征,它结合了GC优异的分离能力与IMS的高灵敏度和快速响应,具有高灵敏性、高分辨率和快速分析的特点^[14-15],可以有效和直观地区分产品之间的风味差异并且提高了定性分析的准确性。目前,尚未发现利用GC-IMS分析牛肉腐败进程的研究报道。本研究利用GC-IMS分析牛肉腐败进程的挥发性风味组成,以期精准揭示牛肉腐败过程中不良风味的变化规律,为牛肉腐败进程的监测提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜牛上脑肉 购自成都市龙泉驿区平安批发

市场,屠宰后2 h内低温运送至实验室。

Flavour Spec®气相-离子迁移谱仪 德国G.A.S公司;PEN3电子鼻系统 德国Airsense公司;GL224I-1SCN型电子天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 试样制备方法 选用12月龄西门塔尔牛后颈部位牛上脑瘦肉作为实验材料,将牛肉切分为约400 g/块的肉块,进行托盘包装,将肉样置于普通塑料托盘,用透明高阻隔塑料袋包裹。后于4℃分别保存0、3、7和10 d,分别命名为D0、D3、D7和D10。

1.2.2 GC-IMS检测 将牛肉粉碎后真空保存于铝箔袋中,-40℃保存备用。精确称取3 g样品于20 mL顶空进样瓶中,密封,自动进样器参数设置为:顶空瓶孵化温度60℃,孵化时间15 min,孵化速度500 r/min,进样针温度85℃,进样体积500 μL,每个样品设3个重复。

气相色谱相关参数为:色谱柱MXT-WAX(30 m×0.53 mm),色谱柱温度:60℃,载气:N₂(纯度>99.999%),运行时间:30 min,载气起始流速2 mL/min,保持2 min,2~5 min流速为10 mL/min,5~15 min流速为15 mL/min,15~20 min流速为50 mL/min,20~25 min流速为100 mL/min。

离子迁移谱参数:电离源为氙,载气:N₂(纯度>99.999%),漂移管长度:10 cm,管内电压:400 V/cm,漂移气流速:150 mL/min,IMS探测器温度:45℃。

定性:利用GC-IMS系统自带软件VOCal根据保留时间、漂移时间进行挥发性化合物的定性分析。

定量:通过GC-IMS物质峰峰体积进行定量。

1.2.3 电子鼻检测 精确称取3 g粉碎后的牛肉试样于20 mL顶空瓶中,密封,室温平衡30 min,取顶

表1 PEN3电子鼻传感器名称及其性能描述

序号	传感器名称	性能
1	S1	对芳香族化合物敏感
2	S2	对氮氧化物敏感
3	S3	对氨和芳香族化合物敏感
4	S4	对氢气(氯化物)敏感
5	S5	对碳氢化合物和芳香族化合物敏感
6	S6	对甲基类化合物敏感
7	S7	对硫化物和萘烯敏感
8	S8	对醇类和醛酮类化合物敏感
9	S9	对芳香族成分和有机硫化物敏感
10	S10	对碳氢化合物敏感

空气体进行检测。样品检测时间 120 s, 清洗时间 60 s, 自动调零 5 s, 进样流量 600 mL/min, 每个样品平行测定 5 次。PEN3 电子鼻传感器信息如表 1 所示。

1.3 数据处理

利用 Microsoft office 2021 进行数据处理; PCA 和 OPLS-DA 分析通过 SIMCA(14.1)完成; 挥发性风味物质峰体积柱状图和电子鼻雷达图由 Origin 2021 绘制。聚类分析通过 R(v4.2.3)完成。

2 结果与分析

2.1 牛肉腐败进程中挥发性成分谱图分析

通过 GC-IMS 技术测定了牛肉腐败进程的挥发性风味成分, 挥发性风味谱图如图 1A 所示, 横坐标为化合物的离子迁移时间, 纵坐标为挥发性化合物的保留时间, 横坐标 1.0 处的红色竖线为归一化后的反应离子峰(RIP 峰)^[16]。图中每个点代表一种化合物,

红色代表该物质的含量较高, 蓝色代表该物质的含量较低。图中各点间分离明显, 无交叉重合, 说明 GC-IMS 能较好地分离牛肉腐败进程的挥发性风味成分。随着时间的延长, 谱图中的亮点数目和大小不断增加, 说明在腐败过程中牛肉的挥发性风味成分种类和含量逐渐增加, 为更直观地分析腐败过程中牛肉风味的变化情况, 以 D0-1 为对照, 各组样品扣除对照, 若挥发性风味成分含量相近则扣除背景后为白色, 若挥发性风味成分含量高于或低于对照, 则扣除背景后为红色或蓝色, 如图 1B 所示。各组样品挥发性风味组成存在显著差异, 随着时间的延长, 图中红色区域面积不断增加, 说明腐败过程中, 风味物质含量显著增加。

2.2 挥发性化合物指纹图谱分析

选取所有定性峰, 利用 GC-IMS 系统内置的 Gallery Plot 插件绘制牛肉腐败进程的挥发性风味物

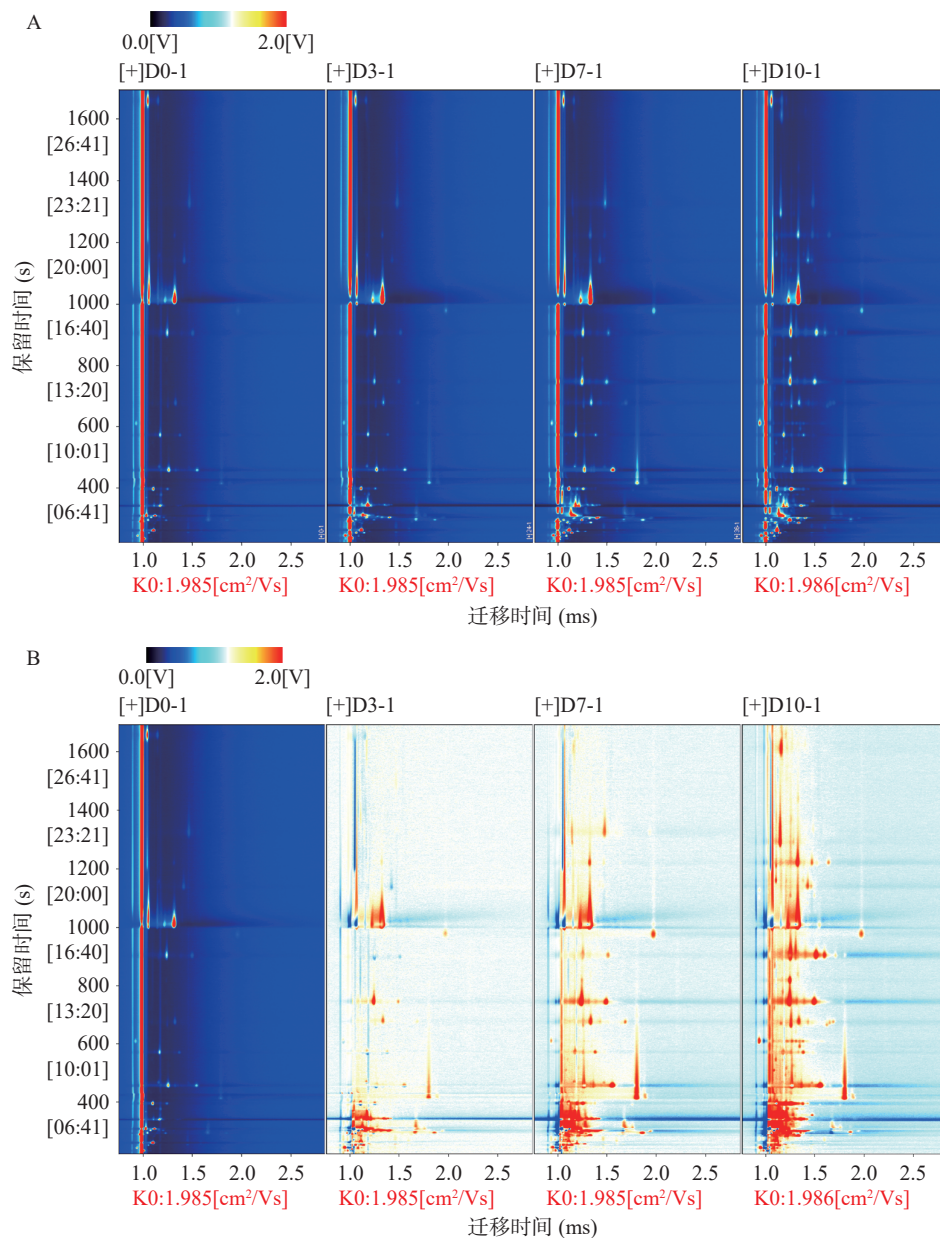


图 1 牛肉腐败进程 GC-IMS 二维谱图(A)和二维差异谱图(B)

Fig.1 Two-dimensional spectrum (A) and two-dimensional difference (B) of beeves spoilage process detected by GC-IMS

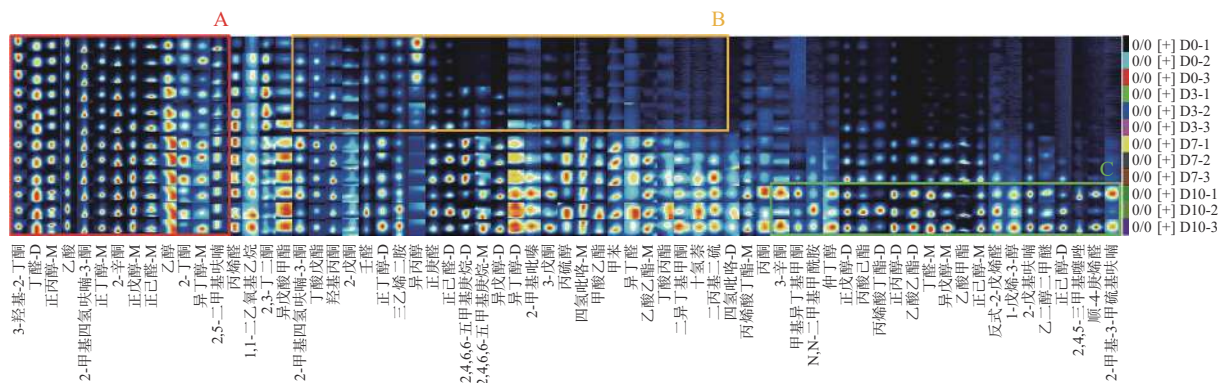


图2 牛肉腐败进程中挥发性风味物质指纹图谱
Fig.2 Fingerprint of VOCs of beeves spoilage process

物质指纹图谱,如图2所示。通过指纹图谱,可以直观地对比4组牛肉在风味物质组成和含量上的共性和差异。图中同一行为一个样品检出的挥发性成分组成情况,同一列为同一挥发性风味成分在不同样品中的信号峰情况,信号峰颜色的明亮程度代表了对应风味化合物含量的高低。图中A区域是4种共有且差异相对较小的挥发性风味成分,主要包括3-羟基-2-丁酮、丁醛-D、2-甲基四氢吡喃-3-酮和乙酸等;B区域是D0和D3样品中含量较低,D7和D10样品中含量较高的挥发性化合物,主要包括异丁醇-D、异丁醛、乙酸乙酯-M和甲苯等;C区域为D10样品含量相对较高的挥发性化合物,主要包括2-甲基-3-甲硫基吡喃、乙二醇二甲醚、丁醛-M和正丙醇-D等。

2.3 挥发性化合物定性及定量分析

采用保留时间和离子迁移时间对挥发性化合物进行定性分析,利用IMS系统峰体积进行定量分析,结果如表2所示。利用GC-IMS技术从4个牛肉样品中共检出67个物质峰,一些化合物可以以二聚体或三聚体的形式存在,从而产生部分信号峰^[17]。通过GC-IMS系统内置的NIST 2014和IMS数据库对检出的67个峰进行鉴定,检出55种挥发性风味化合物,其中12种挥发性化合物存在单倍体和二聚体(正己醇、异戊醇、正丙醇、正丁醇、正戊醇、异丁醇、丙烯酸丁酯、乙酸乙酯、丁醛、正己醛、四氢吡咯和2,2,4,6,6-五甲基庚烷)。酮类物质12种、醇类物质10种、酯类物质9种、醛类物质8种、烃类物质4种、吡喃化合物3种、含硫化合物和胺类物质各2种、吡咯、醚类、噻唑、酸类和吡嗪类物质各1种。如图3所示,各类风味物质在腐败过程中均有显著增加。

酮类物质是四个时间段最高的挥发性风味物质,主要来自脂肪酸的自动氧化和革兰氏阴性菌对脂质的水解作用,是肉类腐败过程中的主要挥发性风味之一^[18]。本研究中共检出12种酮类物质,其含量在腐败过程中上升,在第7d达到峰值106809.68 a.u.,而后逐渐下降至98100.15 a.u.,可能是由于假单胞菌

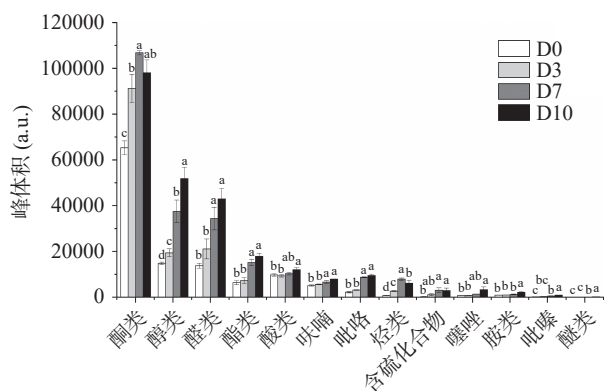


图3 牛肉腐败进程中挥发性化合物峰体积

Fig.3 Peak volume of VOCs of beeves spoilage process
注:图中不同小写字母表示同一类物质不同时间差异显著, $P < 0.05$ 。

等腐败菌在腐败过程中快速生长繁殖,引起脂质氧化所致^[7]。丙酮^[19]、2-戊酮^[20]等被认为是肉制品腐败气味的重要贡献者,在腐败过程中含量持续上升,其中丙酮在腐败过程中从9.92 a.u.上升至94.80 a.u.,2-戊酮由1016.96 a.u.增加至2126.76 a.u.,可能是由热死环丝菌在有氧条件下大量生长繁殖产生^[21]。

醇类物质是腐败牛肉中种类最丰富的挥发性化合物,醇类物质主要来源于碳水化合物发酵、甲基酮还原、氨基酸代谢和脂质氧化等多种途径^[22]。本研究共从4组检出10种醇类物质,除异丙醇外其它醇类物质在腐败过程中均有不同程度的显著上升,醇类物质总量从14850.50 a.u.显著上升至51894.59 a.u. ($P < 0.05$),可能是由于腐败微生物在腐败过程中快速生长发酵产生^[7]。乙醇具有辛辣的刺激气味^[23],是牛肉腐败过程中的重要标记物^[24]。本研究中,随着腐败时间的延长,乙醇含量从2636.34 a.u.显著上升至5036.93 a.u. ($P < 0.05$),与Zareian等^[25]研究结果一致。1-戊烯-3-醇主要来源于脂肪氧化,能显著增加肉品腥味^[26],本研究中1-戊烯-3-醇在腐败过程中从48.80 a.u.显著增加至249.56 a.u. ($P < 0.05$),对牛肉风味有不良影响。

醛类物质通常阈值较低且气味具有叠加作用,对肉品风味有重要影响^[27],主要来源于脂质氧化和不

表 2 牛肉腐败进程中挥发性风味物质
Table 2 VOCs of beeves spoilage process

序号	化合物种类及名称	CAS	RI	RT (min)	DT (ms)	峰体积(a.u)			
						D0	D3	D7	D10
A1	异丙醇	67-63-0	931.7	306.941	1.08831	520.35±97.27 ^a	215.83±36.89 ^b	79.19±37.91 ^c	152.84±30.70 ^{bc}
A2	乙醇	64-17-5	942.1	312.924	1.12888	2636.34±170.78 ^c	4379.72±424.92 ^b	5313.26±152.40 ^a	5036.93±164.20 ^a
A3	仲丁醇	78-92-2	1028.7	381.419	1.14981	72.10±6.27 ^c	93.66±13.15 ^c	252.50±6.98 ^b	568.69±67.65 ^a
A4	正丙醇-D	71-23-8	1044.7	399.803	1.24883	646.98±103.50 ^c	565.89±20.00 ^c	1835.43±30.24 ^b	5819.81±940.28 ^a
A5	正丙醇-M	71-23-8	1044.7	399.803	1.11204	2655.54±251.01 ^c	2462.51±100.54 ^c	3763.96±81.39 ^b	4524.69±72.58 ^a
A6	异丁醇-D	78-83-1	1097.6	461.304	1.36762	122.06±22.74 ^b	256.52±121.20 ^b	682.95±167.50 ^a	863.90±141.58 ^a
A7	异丁醇-M	78-83-1	1101.8	470.853	1.17240	400.44±126.61 ^b	467.19±28.30 ^{bc}	585.43±31.39 ^a	475.45±102.88 ^{bc}
A8	正丁醇-D	71-36-3	1147.5	574.081	1.38348	265.08±58.75 ^b	223.50±2.63 ^b	489.36±85.29 ^a	627.78±126.92 ^a
A9	正丁醇-M	71-36-3	1147.5	574.081	1.18332	2192.66±125.63 ^b	1974.50±33.31 ^b	2785.49±124.12 ^a	2934.42±279.92 ^a
A10	1-戊烯-3-醇	616-25-1	1157.3	596.104	1.35001	48.80±8.57 ^c	56.07±7.39 ^{bc}	79.27±15.73 ^b	249.56±26.97 ^a
A11	异戊醇-M	123-51-3	1214.3	748.874	1.49567	183.41±14.95 ^b	277.44±45.68 ^b	2358.99±461.41 ^a	3726.41±1971.03 ^a
A12	异戊醇-D	123-51-3	1214.7	750.432	1.24934	451.52±36.59 ^b	1888.82±335.87 ^b	6682.02±583.79 ^a	7749.64±1705.49 ^a
A13	正戊醇-D	71-41-0	1262.1	908.547	1.51394	708.00±151.71 ^c	1154.81±732.43 ^c	2772.38±1490.23 ^b	4816.31±379.89 ^a
A14	正戊醇-M	71-41-0	1262.6	910.056	1.25493	3062.55±465.05 ^b	4239.92±1643.61 ^b	6668.44±1886.33 ^a	8665.77±200.58 ^a
A15	正己醇-D	111-27-3	1363.7	1224.347	1.64693	324.62±40.99 ^b	315.28±19.17 ^b	471.34±177.22 ^b	947.37±268.69 ^a
A16	正己醇-M	111-27-3	1363.7	1224.347	1.33069	560.07±37.84 ^c	846.28±194.58 ^c	2724.47±1302.31 ^b	4735.02±808.51 ^a
B1	丙酮	67-64-1	825.8	246.220	1.12123	9.92±2.69 ^c	29.03±1.13 ^{bc}	43.88±6.92 ^b	94.80±29.42 ^a
B2	2-丁酮	78-93-3	917.4	298.752	1.05977	623.55±74.30 ^b	588.93±33.10 ^b	822.75±100.65 ^a	498.49±136.57 ^b
B3	2,3-丁二酮	431-03-8	996.9	344.817	1.17998	2934.18±1091.89 ^b	5598.47±933.03 ^a	5490.03±728.46 ^a	4037.02±820.00 ^{ab}
B4	2-戊酮	107-87-9	997.1	345.087	1.12164	1016.96±197.11 ^c	1611.60±77.74 ^b	1876.25±238.16 ^{ab}	2126.76±52.18 ^a
B5	3-戊酮	96-22-0	997.2	345.219	1.35880	258.71±131.51 ^d	791.14±245.08 ^c	1299.75±398.34 ^b	1959.10±277.55 ^a
B6	甲基异丁基甲酮	108-10-1	1009.5	359.320	1.47891	69.14±1.90 ^b	77.93±10.35 ^b	121.94±36.85 ^b	246.11±55.10 ^a
B7	二异丁基甲酮	108-83-8	1214.4	749.377	1.32300	159.02±13.11 ^b	198.07±17.49 ^b	541.77±74.40 ^a	728.11±231.34 ^a
B8	3-辛酮	106-68-3	1264	914.879	1.30920	309.20±23.54 ^b	368.37±133.93 ^b	562.29±167.57 ^b	1316.39±413.30 ^a
B9	3-羟基-2-丁酮	513-86-0	1289.8	1000.890	1.06948	3301.62±77.31 ^a	2905.06±131.56 ^b	2674.94±25.16 ^c	2840.25±126.85 ^{bc}
B10	羟基丙酮	116-09-6	1294.4	1016.226	1.23288	5699.53±279.40 ^c	8982.49±1052.62 ^b	11003.09±506.78 ^a	9571.10±879.20 ^b
B11	2-辛酮	111-13-7	1295.1	1018.546	1.3294	26014.51±1920.04 ^c	41501.87±4630.23 ^b	50207.38±827.20 ^a	44571.63±3530.74 ^{ab}
B12	2-甲基四氢呋喃-3-酮	3188-00-9	1304.5	1046.930	1.06879	24924.32±268.13 ^c	28602.11±1485.26 ^b	32165.60±733.07 ^a	30110.38±1867.32 ^{ab}
C1	甲酸乙酯	109-94-4	825.5	246.033	1.08638	83.57±30.10 ^b	297.14±30.13 ^b	1192.77±218.89 ^a	1352.45±542.41 ^a
C2	乙酸甲酯	79-20-9	849.5	259.803	1.19855	116.15±3.48 ^c	171.14±17.46 ^c	779.54±128.03 ^a	509.56±240.47 ^a
C3	乙酸乙酯-D	141-78-6	899	288.208	1.33453	44.39±2.95 ^c	51.38±7.45 ^c	950.49±147.22 ^b	2028.50±244.46 ^a
C4	乙酸乙酯-M	141-78-6	900	288.778	1.09765	118.73±42.51 ^b	243.85±13.78 ^b	1292.15±81.87 ^a	1333.72±144.70 ^a
C5	异戊酸甲酯	556-24-1	1027.9	380.543	1.19072	200.88±27.79 ^b	338.79±120.37 ^b	615.55±142.36 ^a	726.12±138.87 ^a
C6	异丁酸异丁酯	97-85-8	1062.4	420.154	1.80405	1170.72±548.03 ^b	983.37±469.80 ^{ab}	2257.79±717.83 ^{ab}	2226.11±673.34 ^a
C7	丁酸丙酯	105-66-8	1148.2	575.662	1.26304	105.09±14.21 ^b	130.27±49.64 ^b	340.90±97.26 ^a	444.04±138.03 ^a
C8	丙烯酸丁酯-M	141-32-2	1189.4	668.656	1.26216	489.74±81.92 ^c	669.57±186.32 ^c	1237.26±356.11 ^b	1857.04±58.72 ^a
C9	丙烯酸丁酯-D	141-32-2	1193.5	679.560	1.69325	140.08±12.47 ^d	301.38±164.75 ^c	722.30±103.54 ^b	937.59±179.80 ^a
C10	丁酸戊酯	540-18-1	1283.4	979.581	1.97539	3346.16±448.65 ^a	3319.81±464.08 ^a	4171.68±459.75 ^a	3865.73±428.80 ^a
C11	丙酸己酯	2445-76-3	1336.5	1142.707	1.42805	564.88±123.67 ^b	727.45±482.45 ^b	1590.88±797.28 ^{ab}	2639.81±932.10 ^a
D1	异丁醛	78-84-2	811.2	237.813	1.09711	39.40±3.31 ^b	55.00±17.70 ^b	153.82±21.32 ^a	178.73±88.50 ^a
D2	丙烯醛	107-02-8	843	256.046	1.06091	792.28±218.23 ^b	1514.68±310.46 ^a	1766.58±35.51 ^a	1571.35±145.72 ^a
D3	丁醛-D	123-72-8	864.8	268.569	1.11426	5441.62±157.39 ^c	7129.34±603.03 ^b	7515.13±129.33 ^b	10026.21±1506.57 ^a
D4	丁醛-M	123-72-8	915	297.350	1.25327	470.35±95.05 ^c	844.21±152.96 ^c	3080.32±837.26 ^b	8224.03±1765.30 ^a
D5	正己醛-D	66-25-1	1097.8	461.736	1.56130	1034.07±228.52 ^b	3404.65±2709.91 ^{ab}	9248.99±3692.75 ^a	9586.41±4765.92 ^a
D6	正己醛-M	66-25-1	1098.7	463.807	1.27008	2919.85±384.72 ^b	4425.37±1239.99 ^{ab}	6070.34±944.19 ^a	6079.29±1261.01 ^a
D7	反式-2-戊烯醛	1576-87-0	1136.6	549.392	1.10700	78.10±6.86 ^c	105.11±16.43 ^{bc}	144.92±35.91 ^b	288.84±51.63 ^a
D8	正庚醛	111-71-7	1193.3	678.781	1.34043	1026.79±273.54 ^b	1958.69±682.93 ^{ab}	3183.55±602.00 ^a	3296.19±1222.25 ^a
D9	顺-4-庚烯醛	6728-31-0	1262	908.163	1.60127	344.32±6.07 ^b	350.53±29.54 ^b	437.42±115.36 ^b	1334.91±569.15 ^a
D10	壬醛	124-19-6	1398.9	1329.801	1.47986	1637.24±602.92 ^a	1341.92±303.46 ^a	2798.61±76.03 ^a	2413.55±1424.49 ^a

续表 2

序号	化合物种类及名称	CAS	RI	RT (min)	DT (ms)	峰体积(a.u)			
						D0	D3	D7	D10
E1	1,1-二乙氧基乙烷	105-57-7	889.1	282.516	1.04394	214.11±36.13 ^a	197.20±17.35 ^a	210.85±31.75 ^a	227.81±36.77 ^a
E2	2,2,4,6,6-五甲基庚烷-M	13475-82-6	927.2	304.353	1.32478	94.37±26.67 ^c	662.42±96.37 ^b	1805.92±236.12 ^a	2009.57±244.44 ^a
E3	烃类 2,2,4,6,6-五甲基庚烷-D	13475-82-6	927.7	304.643	1.40232	142.48±41.71 ^d	1403.34±189.00 ^c	4605.53±297.26 ^b	2618.14±1233.68 ^a
E4	甲苯	108-88-3	1052.3	408.558	1.04598	305.16±44.92 ^b	394.28±38.83 ^b	1128.70±161.30 ^a	978.60±103.27 ^a
E5	十氢萘	91-17-8	1164.4	612.114	1.26939	41.02±8.84 ^b	57.30±28.50 ^b	166.36±84.35 ^a	254.71±50.19 ^a
F1	2,5-二甲基咪唑	625-86-5	947.7	316.113	1.04120	4861.95±385.88 ^c	5314.77±295.19 ^{bc}	5763.98±522.24 ^{ab}	6095.40±334.42 ^a
F2	咪唑 2-戊基咪唑	3777-69-3	1236	821.304	1.25062	215.85±12.63 ^c	298.71±119.02 ^c	778.87±293.45 ^b	1593.80±280.80 ^a
F3	2-甲基-3-甲硫基咪唑	63012-97-5	1342.3	1160.071	1.10794	45.04±6.41 ^b	57.76±9.62 ^b	94.77±7.83 ^b	223.76±107.16 ^a
G1	含硫化合物 丙硫醇	107-03-9	843.1	256.103	1.14261	162.59±106.01 ^b	1030.26±604.80 ^{ab}	2756.88±1128.83 ^a	2487.64±1305.72 ^a
G2	二丙基二硫	629-19-6	1363.7	1224.347	1.47588	89.72±9.46 ^b	91.01±14.06 ^b	313.42±166.54 ^a	460.01±12.72 ^a
H1	胺类 N,N-二甲基甲酰胺	68-12-2	1325.2	1108.857	1.25602	81.32±8.37 ^c	104.70±14.68 ^{bc}	182.54±32.42 ^b	320.92±88.03 ^a
H2	三乙烯二胺	280-57-9	1509.4	1661.185	1.16265	848.25±19.64 ^b	875.93±40.81 ^b	1069.55±224.27 ^b	1831.65±347.76 ^a
I1	吡咯 四氢吡咯-D	123-75-1	1010.2	360.184	1.28101	28.99±4.80 ^b	41.86±13.92 ^b	208.58±68.53 ^a	283.65±68.91 ^a
I2	四氢吡咯-M	123-75-1	1021.5	373.102	1.04116	2179.67±404.59 ^c	3126.32±207.51 ^b	8534.37±212.28 ^a	9204.86±714.87 ^a
J1	吡嗪 2-甲基吡嗪	109-08-0	1261.2	905.624	1.40956	224.50±26.41 ^c	301.65±107.21 ^c	542.53±191.90 ^b	903.61±91.25 ^a
K1	醚类 乙二醇二甲醚	110-71-4	906.7	292.582	1.29012	19.18±5.85 ^c	21.84±6.35 ^c	92.41±19.73 ^b	256.23±42.83 ^a
L1	噻唑 2,4,5-三甲基噻唑	13623-11-5	1387.5	1295.756	1.15503	820.04±81.77 ^b	786.82±98.13 ^b	1383.54±24.08 ^b	3323.61±1565.01 ^a
M1	酸类 乙酸	64-19-7	1510.2	1663.479	1.05634	9747.76±597 ^b	9361.83±626.33 ^b	10312.96±660.74 ^b	12065.69±1067.15 ^a

注: 同行不同小写字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

饱和脂肪酸的氧化裂解^[28]。本研究中,共检出 8 种醛类物质,其含量均在腐败过程中逐渐增加,醛类物质总含量从 13784.02 a.u 显著上升至 42999.50 a.u ($P<0.05$),说明在腐败过程中,牛肉脂质氧化程度加深。己醛和壬醛是肉制品中最常见的醛类物质,主要通过亚油酸等不饱和脂肪酸的氧化产生^[29],被认为是脂肪氧化的重要指标,其含量在腐败过程中分别从显著上升,说明腐败过程中不饱和脂肪酸氧化加剧。

酯类物质阈值较低且气味浓郁,是肉制品重要的挥发性风味来源,主要来源于醇和酸在非酶催化下的酯化反应以及微生物作用下的酶催化酯化反应^[30]。本研究中酯类物质含量在腐败过程中呈显著的上升趋势,酯类物质总含量从 6380.40 a.u 显著上升至 17920.68 a.u ($P<0.05$),可能是由于在腐败过程中,牛肉在微生物的作用下产生醇类和酸类物质,进一步经酯化反应后生成酯类物质^[31]。乙酸乙酯是自然腐败肉中的主要酯类物质^[32],具有刺激性气味^[33],本研究中乙酸乙酯含量随着保藏时间的增加而增加,与郭依萍等^[34]的研究结果一致。此外,从腐败牛肉中检出了具有刺激性气味的丙烯酸丁酯,在腐败过程中含量增加。

含硫化合物主要来源于含硫氨基酸的降解,如甲硫氨酸和半胱氨酸^[35]。本研究中共检出了 2 种含硫化合物,分别为丙硫醇和二丙基二硫,其中二丙基二硫在腐败初期变化不大,随着腐败的加深其含量分别从 1030.26 a.u 和 91.01 a.u 上升至 2487.64 a.u 和 460.01 a.u,与张凡等^[36]研究结果一致。此外,乙酸是四组牛肉中唯一的酸类物质,乙酸主要来源于微生物

作用下的碳水化合物代谢^[37],具有强烈的刺激性酸味^[38],是腐败肉酸臭味的重要来源。在腐败前期,乙酸含量较为稳定,但在腐败中后期,乙酸含量从 10312.96 a.u 显著上升至 12065.69 a.u ($P<0.05$),可能是由于腐败前期乙酸被用于乙酯类物质的合成,而醋酸菌在腐败中后期大量利用碳水化合物代谢产生的乙醇产生乙酸所致^[39]。

2.4 多元统计分析

2.4.1 主成分分析 为进一步明确牛肉腐败进程中挥发性风味成分的差异,以挥发性风味物质峰体积为数据源,进行 PCA 分析。结果如图 4 所示,所建立的主成分模型将风味分为 2 个主成分,其中主成分 1 贡献率为 75.80%,主成分 2 贡献率为 15.40%,累计贡献率达 91.20%,表明所建立的 PCA 模型能较

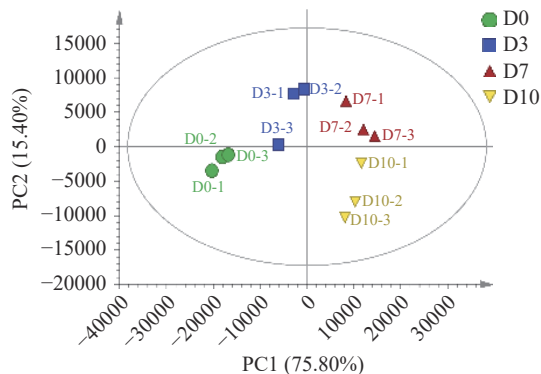


图 4 牛肉腐败进程中牛肉挥发性风味主成分分析得分散点图

Fig.4 Scatter plot of the scores of the principal component analysis of volatile flavor of beeves spoilage process

好地反映不同样品间的风味差异。4 个样本的 12 个样本点分别位于坐标系的不同位置, 各组间分离明显, 无交叉重合, 说明牛肉腐败进程的风味差异显著, 与指纹图谱分析结果相互印证。在主成分 1 上 D0 和 D3 分布较为接近, D7 和 D10 分布较为接近, 表明 D0 和 D3 风味较为接近, D7 和 D10 风味较接近。

2.4.2 PLS-DA 分析 为进一步分析牛肉腐败进程的挥发性风味差异, 通过 PLS-DA 对牛肉腐败进程的风味进行分析, 结果如图 5A 所示, 所建立的 PLS-DA 模型累计累积可以解释 91.00% 的原始变量, 说明该模型很好地反映了样品的整体情况^[40]。4 个样本的 12 个样本点均位于 95% 的置信区间内, 组间分离明显, 无交叉重合, 说明牛肉腐败进程的风味差异显著, 所建立的 PLS-DA 模型能较好地地区分 4 种进程。

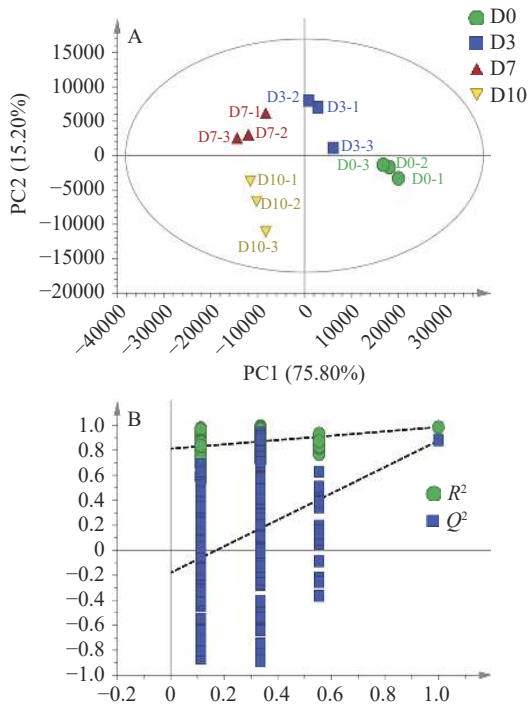


图 5 牛肉腐败进程中 PLS-DA 得分散点图(A)及置换检验结果(B)

Fig.5 Scatter plot of PLS-DA scores of beeves spoilage process (A) and results of substitution test (B)

为了进一步验证模型是否出现过拟合现象, 采用 200 次循环迭代置换检验, 结果如图 5B 所示。 Q^2 的回归线与 Y 轴的焦点都在负半轴, 表明 PLS-DA 模型稳定可靠, 不存在过拟合现象。

2.4.3 差异风味物质筛选 通过 PLS-DA 的变量投影重要度(variable importance for the projection, VIP) 对牛肉腐败进程中的差异风味物质进行筛选, 结果如表 3 所示。以 $VIP>1$ 为筛选标准^[41], 共筛选出 16 种差异风味物质, 可作为区分牛肉腐败进程的潜在生物标志物, 分别为 2-辛酮、正己醛-D、丁醛-M、四氢吡咯-M、异戊醇-D、正丙醇-D、2-甲基四氢呋喃-3-酮、丁醛-D、正戊醇-M、异戊醇-M、2,2,4,6,6-五甲基庚烷-D、正戊醇-D、2,4,5-三甲基噻唑、正己醛-M、正己醇-M 和 2,3-丁二酮。随着保藏时间的延长, 正己醛-D、正己醛-M、丁醛-M、丁醛-D、四氢吡咯-M、异

表 3 差异风味物质及其气味描述

Table 3 Description of differential flavor substances and their odor

序号	化合物名称	CAS	VIP	阈值 (mg/kg) ^[42]	气味描述
1	2-辛酮	111-13-7	4.09091	0.04	花草香
2	正己醛-D	66-25-1	2.79090	0.21	酸败、刺激性气味 ^[43]
3	丁醛-M	123-72-8	2.29986	0.05	刺激性气味 ^[44]
4	四氢吡咯-M	123-75-1	2.01654		刺激性气味
5	异戊醇-D	123-51-3	1.99894	0.25	不愉快气味
6	正丙醇-D	71-23-8	1.78065	7.00	刺激性气味
7	2-甲基四氢呋喃-3-酮	3188-00-9	1.62901		
8	丁醛-D	123-72-8	1.57109	0.05	刺激性气味
9	正戊醇-M	71-41-0	1.48215	5.00	果香
10	异戊醇-M	123-51-3	1.36635	0.25	不愉快气味
11	2,2,4,6,6-五甲基庚烷-D	13475-82-6	1.34167		
12	正戊醇-D	71-41-0	1.10760	5.00	果香
13	2,4,5-三甲基噻唑	13623-11-5	1.09442	0.05	坚果香气
14	正己醛-M	66-25-1	1.05012	0.21	酸败、刺激性气味 ^[43]
15	正己醇-M	111-27-3	1.03851	0.70	果香
16	2,3-丁二酮	431-03-8	1.01774	0.016	刺激性气味

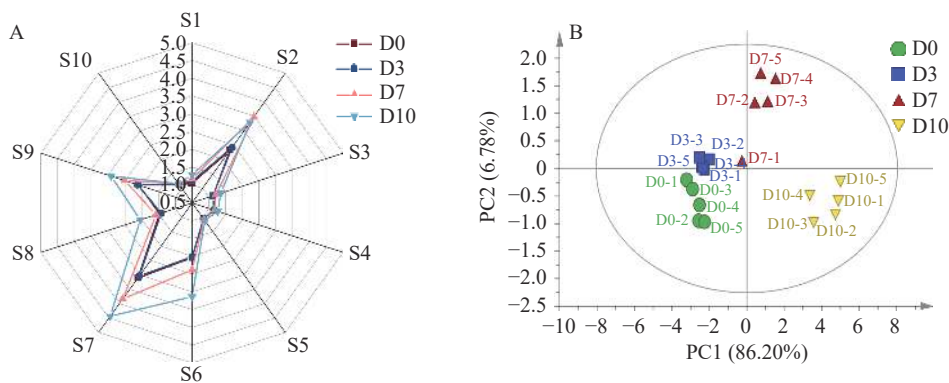


图 6 牛肉腐败进程中电子鼻传感器响应雷达图(A)及主成分得分散点图(B)

Fig.6 Sensors response radar plot (A) and scatter plot of principal component scores (B) for beeves spoilage process

戊醇-D、异戊醇-M、正丙醇-D、2,3-丁二酮等刺激性、不愉快风味物质的含量逐渐增加。其中2,3-丁二酮、丁醛、正己醛等物质阈值较低,对腐败牛肉刺激性气味的形成有重要作用。

2.5 电子鼻分析

电子鼻传感器对牛肉腐败进程的挥发性风味成分响应值如图6A所示,传感器S2、S3、S6、S7、S8、S9差异明显,随着腐败时间的延长其响应值逐渐增加,表明腐败过程中氮氧化物、芳香族化合物、甲基类化合物、硫化物、醇类和醛酮类物质不断增加,与GC-IMS结果一致。对电子鼻相应数据进行分析,结果如图6B所示,PCA模型累积贡献率达92.98%,说明所建立的模型能较好地反映样品的整体信息^[45]。图中不同样本分布于坐标系不同区域,分离明显无重合,说明牛肉腐败进程中风味存在显著差异,与GC-IMS结果一致。

3 结论

本研究对牛肉腐败进程中挥发性化合物进行了测定分析。利用GC-IMS建立了4种腐败牛肉的挥发性风味指纹图谱,共提取了67个物质峰,鉴定出55种挥发性化合物。GC-IMS和电子鼻分析结果表明,牛肉腐败进程的风味存在显著差异,在腐败过程中,牛肉挥发性风味的含量显著增加,其中醇类、醛类、酯类、酸类、呋喃、吡咯、噻唑、胺类、吡嗪和醚类物质在腐败过程中持续增加,酮类烃类和含硫化合物在腐败过程中逐渐增加,在第7d时达到峰值,而后逐渐下降。PCA和PLS-DA分析表明不同腐败牛肉样品风味存在显著差异。通过VIP值共筛选出16种差异性风味物质,其中正己醛-D、正己醛-M、丁醛-M、丁醛-D、四氢吡咯-M、异戊醇-D、异戊醇-M、正丙醇-D、2,3-丁二酮等刺激性、不愉快风味物质的含量逐渐增加。可作为区分牛肉腐败进程的潜在生物标志物。

本研究建立了牛肉腐败进程挥发性风味的可视化指纹图谱,阐明了牛肉腐败过程中挥发性风味的变化规律,为牛肉腐败进程的精准监测提供一定的理论依据。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] LI X Z, YAN C G, ZAN L S. Current situation and future prospects for beef production in China—a review[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2018, 31(7): 984–991.

[2] 曹兵海, 李俊雅, 王之盛, 等. 2022年度肉牛牦牛产业技术发展报告[J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59(3): 330–335. [CAO Binghai, LI Junya, WANG Zhisheng, et al. Report on the technological development of the beef yak industry in 2022[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2023, 59(3): 330–335.]

[3] ALIREZALU K, MOVLAN H S, YAGHOUBI M, et al. ϵ -Plylysine coating with stinging nettle extract for fresh beef preservation[J]. *Meat Science*, 2021, 176: 108474.

[4] DURAN A, KAHVE H I. The effect of chitosan coating and vacuum packaging on the microbiological and chemical properties of beef[J]. *Meat Science*, 2020, 162: 107961.

[5] STUTZ H K, SILVERMAN G J, ANGELINI P, et al. Bacteria and volatile compounds associated with ground-beef spoilage[J]. *Journal of Food Science*, 1991, 56(5): 1147–1153.

[6] 张秀凤, 申晓琳, 赵金辉. 冷鲜牛肉腐败临界期及特定腐败菌研究[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2018(24): 66–69, 260. [ZHANG Xiufeng, SHEN Xiaolin, ZHAO Jinhui. Study on critical spoilage period and specific spoilage bacteria of chilled beef[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2018(24): 66–69, 260.]

[7] 杨啸吟, 张一敏, 梁荣蓉, 等. 包装冷却肉中微生物腐败及其挥发性气味的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 285–293. [YANG Xiaoyin, ZHANG Yimin, LIANG Rongrong, et al. Microbial spoilage and formation and detection of volatile odor compounds in packaged chilled meat: A review[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 285–293.]

[8] ARGYRI A A, MALLOUCHOS A, PANAGOUE E Z, et al. The dynamics of the HS/SPME–GC/MS as a tool to assess the spoilage of minced beef stored under different packaging and temperature conditions[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2015, 193: 51–58.

[9] CASABURI A, PIOMBINO P, NYCHAS G J, et al. Bacterial populations and the volatilome associated to meat spoilage[J]. *Food Microbiology*, 2015, 45: 83–102.

[10] EDWARDS R A, DAINITY R H, HIBBARD C M. Volatile compounds produced by meat pseudomonads and relate reference strains during growth on beef stored in air at chill temperatures[J]. *The Journal of Applied Bacteriology*, 1987, 62(5): 403–412.

[11] ERCOLINI D, CASABURI A, NASI A, et al. Different molecular types of *Pseudomonas fragi* have the same overall behaviour as meat spoilers[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 142(1–2): 120–131.

[12] CASABURI A, DE FILIPPIS F, VILLANI F, et al. Activities of strains of *Brochothrix thermosphacta* in vitro and in meat[J]. *Food Research International*, 2014, 62: 366–374.

[13] THIERRY A, MAILLARD M B, RICHOUX R, et al. *Propionibacterium freudenreichii* strains quantitatively affect production of volatile compounds in swiss cheese[J]. *Lait*, 2005, 85(1–2): 57–74.

[14] YANG X, ZHU K, GUO H, et al. Characterization of volatile compounds in differently coloured *Chenopodium quinoa* seeds before and after cooking by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129086.

[15] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126158.

[16] YANG Y, WANG B, FU Y, et al. HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds across different production stages of fermented soybean whey tofu[J]. *Food Chemistry*, 2021, 346: 128880.

[17] 张培茵, 孟宁, 刘明, 等. 低温等离子体处理对糙米原料及糙米饭风味特性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 74–80. [ZHANG

- Peiyin, MENG Ning, LIU Ming, et al. Effects of low temperature plasma treatment on flavor characteristics of raw and cooked brown rice[J]. *Food Science*, 2021, 42(15): 74–80.]
- [18] 周煦成. 基于蚕丝素纤维的气敏传感器开发及检测猪肉新鲜度研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017. [ZHOU Xucheng. Development of gas sensors based on silk fibroin fiber and their application in pork freshness detection[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.]
- [19] 余舒婷, 林淑芳, 黄姝玲, 等. 腐败食品快速检测技术的应用及研究进展[J]. *食品科技*, 2022, 47(9): 297–303. [YU Shuting, LIN Shufang, HUANG Shuling, et al. Application and research progress of rapid detection technology for spoilage food[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(9): 297–303.]
- [20] 马姗, 于文龙, 焦英帅, 等. 不同减菌处理对凡纳对虾贮藏期间品质的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(3): 116–124. [MA Shan, YU Wenlong, JIAO Yingshuai, et al. Effects of different bacteria reducing treatments on the quality of *Penaeus vannamei* during storage[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(3): 116–124.]
- [21] PATANGE A, BOEHM D, BUENO-FERRER C, et al. Controlling *Brochothrix thermosphacta* as a spoilage risk using in-package atmospheric cold plasma[J]. *Food Microbiology*, 2017, 66: 48–54.
- [22] SIDIRA M, KANDYLIS P, KANELLAKI M, et al. Effect of immobilized *Lactobacillus casei* on the evolution of flavor compounds in probiotic dry-fermented sausages during ripening[J]. *Meat Science*, 2015, 100: 41–51.
- [23] 刘俊霞, 赵萍, 金晶, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱结合化学计量学分析大鲵肉冷藏期间挥发性成分[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(22): 269–278. [LIU Junxia, ZHAO Ping, JIN Jing, et al. Analysis of volatile components in giant salamander meat during cold storage based on gas chromatography-ion mobility spectrometer and chemometrics[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(22): 269–278.]
- [24] MANSUR A R, SEO D H, SONG E J, et al. Identifying potential spoilage markers in beef stored in chilled air or vacuum packaging by HS-SPME-GC-TOF/MS coupled with multivariate analysis[J]. *LWT*, 2019, 112: 108256.
- [25] ZAREIAN M, BÖHNER N, LOOS H M, et al. Evaluation of volatile organic compound release in modified atmosphere-packaged minced raw pork in relation to shelf-life[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, 18: 51–61.
- [26] 吴静, 黄卉, 李来好, 等. 鱼制品腥味产生机制及调控措施研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 254–261. [WU Jing, HUANG Hui, LI Laihao, et al. Review on the formation and regulation of the fishy odor in fish products[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(24): 254–261.]
- [27] 陈泓帆, 聂鑫, 宋川, 等. 不同种类白酒对广式香肠质构和风味的影响分析[J]. *食品科技*, 2022, 47(12): 104–112. [CHEN Hongfan, NIE Xin, SONG Chuan, et al. Analysis of the effect of different kinds of Baijiu on the texture and flavor of Cantonese sausage[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(12): 104–112.]
- [28] WANG Y, TING J Y, CAN J X, et al. Study on lipolysis-oxidation and volatile flavour compounds of dry-cured goose with different curing salt content during production[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 33–40.
- [29] JÄÄSKELÄINEN E, HULTMAN J, PARSHINTSEV J, et al. Development of spoilage bacterial community and volatile compounds in chilled beef under vacuum or high oxygen atmospheres[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 223: 25–32.
- [30] SOLOMANDO J C, ANTEQUERA T, MARTÍN A, et al. Fish oil microcapsules as omega-3 enrichment strategy: Changes in volatile compounds of meat products during storage and cooking[J]. *Foods*, 2021, 10(4): 745.
- [31] 潘晓倩, 周慧敏, 李素, 等. 卤牛肉贮藏过程中气味活性化合物变化及异味分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(22): 240–248. [PAN Xiaoqian, ZHOU Huiming, LI Su, et al. Changes in odor-active compounds during storage and analysis of off-flavor substances in stewed marinated beef[J]. *Food Science*, 2021, 42(22): 240–248.]
- [32] 方金玉. 冷鲜牛肉中假单胞菌和热死环丝菌致腐机制及其光动力杀菌控制研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022. [FANG Jinyu. Spoilage mechanisms of *Pseudomonas* and *Brochothrix thermosphacta* in chilled beef and photodynamic inactivation control[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2022.]
- [33] 顾雅昕, 乔柱, 郭行, 等. 发酵乳杆菌 LBM97 所产细菌素提取方法的优化及比较[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(19): 111–116. [GU Yaxin, QIAO Zhu, GUO Xing, et al. Optimization and comparison of extraction methods of bacteriocin produced by *Lactobacillus fermentum* LBM97[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(19): 111–116.]
- [34] 郭依萍, 栗婧文, 窦晗, 等. 精准温控对冰温贮藏生鲜猪肉保鲜效果的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(1): 150–158. [GUO Yiping, LI Jingwen, DOU Han, et al. Effect of precise temperature control on the preservation effect of fresh pork during ice-temperature storage[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(1): 150–158.]
- [35] 吴鸣, 吴浚滢, 范琦琦, 等. 食品风味物质的合成机理及检测方法的研究进展[J/OL]. *食品科学*, 1–14[2024-03-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231010.0933.044.html>. [WU Ming, WU Junying, Fan Qiqi, et al. Research progress on synthesis mechanism and detection methods of food flavor substances[J]. *Food Science*, 1–14[2024-03-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231010.0933.044.html>.]
- [36] 张凡, 张宇帆, 苏心悦, 等. 基于顶空气相离子迁移谱的干腐病马铃薯挥发性成分分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 317–323. [ZHANG Fan, ZHANG Yufan, SU Xinyue, et al. Analysis of volatile components in potatoes with dry rot by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 317–323.]
- [37] 朱嘉敏, 么紫瑶, 李梦彤, 等. 不同接种量的清酒乳杆菌对低钠盐风干肠品质的改善作用研究[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(7): 133–142. ZHU Jiamin, MO Ziyao, LI Mengtong, et al. Study on different inoculation levels of *Lactobacillus sakei* on the improvement of quality characteristics of low-sodium dry sausages[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(7): 133–142.
- [38] 黄晓霞, 游云, 刘巧瑜, 等. 不同剂量 ^{60}Co - γ 射线辐照对烟鸡胸肉贮藏过程中滋味的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(7): 56–64. [HUANG Xiaoxia, YOU Yun, LIU Qiaoyu, et al. Effects of different doses of ^{60}Co - γ irradiation on the taste of smoked chicken breast during storage[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(7): 56–64.]
- [39] HUTCHINSON U F, JOLLY N P, CHIDI B S, et al. Vinegar engineering: A bioprocess perspective[J]. *Food Engineering Reviews*, 2019, 11(4): 290–305.
- [40] 周慧敏, 张顺亮, 郝艳芳, 等. HS-SPME-GC-MS-O 结合电子

- 鼻对坨坨猪肉主体风味评价分析[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 218-226. [ZHOU Huimin, ZHANG Shunliang, HAO Yanfang, et al. Analysis of major flavor components of Tuotuo Pork, a traditional meat product in Liangshan, Southwest China's Sichuan, by HS-SPME-GC-MS-O combined with electronic nose[J]. Food Science, 2021, 42(2): 218-226.]
- [41] WANG J, LI X, WU Y, et al. HS-SPME/GC-MS reveals the season effects on volatile compounds of green tea in high-latitude region[J]. Foods, 2022, 11(19): 3016.
- [42] VAN GEMERT L. Compilations of flavour threshold values in water and other media[M]. Boelens Aroma Chemical Information Service, 2003.
- [43] 罗杰琼, 张森, 贾洪锋, 等. 不同部位原切牛排品质对比分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 270-279. LUO Jieqiong, ZHANG Miao, JIA Hongfeng, et al. Comparative analysis of quality of raw cut steak in different parts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 270-279.
- [44] 赵改名, 王森, 祝超智, 等. 基于顶空气相离子迁移色谱对鸭肉腥味特征物质的鉴定[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 247-255. [ZHAO Gaiming, WANG Sen, ZHU Chaozhi, et al. Identification of characteristic odorants in duck meat by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(4): 247-255.]
- [45] 白洁, 蒋华彬, 陶国琴, 等. 基于 SPME-GC-MS 和 PCA 分析气流膨化处理对马铃薯方便粥香气成分的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 217-224. [BAI Jie, JIANG Huabin, TAO Guoqin, et al. Analysis of the aromatic components of potato flour incorporated instant congee processed by explosion puffing by combined use of SPME-GC-MS and PCA[J]. Food Science, 2020, 41(14): 217-224.]