

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.23.006

# 基于电子鼻、气质联用技术结合感官评价 优化发酵刀板香复合菌种

马滢<sup>1</sup>, 潘道东<sup>2</sup>, 张昊<sup>3</sup>, 汪少芸<sup>4</sup>, 周辉<sup>1\*</sup>, 徐宝才<sup>1\*</sup>

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 宁波大学 食品与药学院, 浙江 宁波 315211; 3. 中国农业大学 食品科学与营养工程学院, 北京 100091; 4. 福州大学 生物与科学工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 为筛选出最适合应用于发酵刀板香中的复合菌种配比, 对不同配比的复合菌种发酵的刀板香风味进行综合评价, 采用电子鼻、顶空固相微萃取结合气质联用 (solid phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry, SPME/GC-MS) 技术和感官评价结合主成分分析、聚类分析对不同配比的复合菌种发酵的刀板香风味组成和差异性进行对比研究。结果表明, 各组别间风味存在差异, 7组发酵刀板香共检测出 66种挥发性风味物质, 包括醛类 10种、酮类 9种、醇类 9种、酸类 6种、酯类 5种、烯烃类 4种、烷烃类 10种、硫醚类 3种和其他 10种。与不添加复合菌种 (CK) 组相比, 添加复合菌种可以明显增加挥发性风味物质; 与 A 组 (复合菌种添加量为  $10^6$  CFU/g) 相比, B 组 (复合菌种添加量为  $10^7$  CFU/g) 的醛、醇类挥发性风味物质含量更高, 其中 B1 组 (弯曲乳杆菌 WQ: 木糖葡萄球菌 MT.S.14 配比为 1:3) 己醛、庚醛、壬醛、辛醛、1-辛烯-3 醇、丙酮、己酸乙酯含量明显增加。此外, B1 组的色泽更好, 感官评分更高。总的来说, 不同配比的复合菌种发酵的刀板香风味存在差异, 结合电子鼻、SPME/GC-MS 技术和感官评价结果发现, 添加比例为弯曲乳杆菌 WQ: 木糖葡萄球菌 MT.S.14 = 1:3、添加量为  $10^7$  CFU/g 的复合菌种更适合用于发酵刀板香。

**关键词:** 发酵刀板香; 复合发酵剂; 电子鼻; 气相色谱-质谱法; 挥发性气味物质

## Optimization of Complex Strains in Fermented Daobanxiang Based on Electronic Nose, GC-MS, and Sensory Evaluation

MA Ying<sup>1</sup>, PAN Daodong<sup>2</sup>, ZHANG Hao<sup>3</sup>, WANG Shaoyun<sup>4</sup>, ZHOU Hui<sup>1\*</sup>, XU Baocai<sup>1\*</sup>

(1. College of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. College of Food and Pharmacy, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100091, China; 4. College of Biological Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

**Abstract:** To screen the most suitable ratio of composite strains applied in fermented Daobanxiang, Anhui cuisine, the flavor of fermented Daobanxiang with different ratios of composite strains was evaluated comprehensively. Electronic nose, solid phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry (SPME/GC-MS) techniques, and sensory evaluation were used, and the flavor composition and difference of fermented Daobanxiang with different ratios of composite strains were studied and compared through principal component analysis and cluster analysis. These findings revealed that there were flavor differences between the groups. A total of 66 volatile flavor compounds were found in the seven groups of fermented Daobanxiang, including 10 aldehydes, nine ketones, nine alcohols, six acids, five esters, four olefins, 10 alkanes, three thioethers, and 10 other components. In comparison to the group without composite strains (CK), the addition of composite strains could significantly increase volatile flavor components. The B group (The addition amount of composite strains was  $10^7$  CFU/g) had a higher aldehyde and alcohol content than the A group (The addition amount of

基金项目: 安徽省同心科创工程项目(202206e08020006); 安徽省科技重大专项项目(2021d06050001); 安徽省现代农业工业技术体系专项基金(AHCYJSTX-05-18)

作者简介: 马滢(1999—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 肉品微生物控制与资源利用。

\*通信作者: 周辉(1972—), 男, 研究员, 研究方向: 肉品加工与质量控制; 徐宝才(1973—), 男, 研究员, 博士, 研究方向: 肉品加工与质量控制。

composite strains was  $10^6$  CFU/g), and the B1 group (*Lactobacillus curvatus* WQ: *Staphylococcus xylosus* MT.S.14 ratio of 1:3) had significantly increased contents of hexanal, heptanal, nonanal, octanal, 1-octene-3 alcohol, acetone, and ethyl caproate. In addition, the B1 group also scored higher in sensory tests and had better color. The flavor of fermented Daobanxiang with different ratios of composite strains varied in general. According to the electronic nose, SPME/GC-MS, and sensory evaluation results, the composite strain with the addition ratio of *Lactobacillus curvatus* WQ: *Staphylococcus xylosus* MT.S.14=1:3 and the addition amount of  $10^7$  CFU/g was more suitable for Daobanxiang fermentation.

**Key words:** fermented Daobanxiang; compound ferments; electronic nose; gas chromatography-mass spectrometry; volatile flavor component

引文格式:

马滢,潘道东,张昊,等.基于电子鼻、气质联用技术结合感官评价优化发酵刀板香复合菌种[J].食品研究与开发,2024,45(23):39-48.

MA Ying, PAN Daodong, ZHANG Hao, et al. Optimization of Complex Strains in Fermented Daobanxiang Based on Electronic Nose, GC-MS, and Sensory Evaluation[J]. Food Research and Development, 2024, 45(23): 39-48.

发酵刀板香是徽派传统美食之一,以其色、香、味、形俱佳而备受青睐,主要包括生肉制备(如分割、清洗)、盐腌、脱盐和干燥(或轻度发酵)<sup>[1]</sup>。传统的腊肉制作方法需要经过漫长的风干和贮藏过程,不仅费时费力,而且有可能在制作过程中遭受自然因素的影响,如气温、湿度等导致产品质量不稳定<sup>[2]</sup>。在腊肉的发酵过程中,微生物群是不可或缺的参与者。它们通过发酵碳水化合物来提供能量,能够水解和分解蛋白质和脂肪,从而释放出各种香味前体物质<sup>[3]</sup>。这些物质可以进一步被微生物转化为具有复杂芳香的挥发性化合物,为腊肉赋予独特的口感和香味。Wang等<sup>[1]</sup>也进一步证实微生物在传统腊肉品质形成中存在重要作用。

微生物发酵剂是一种通过微生物代谢作用来改善食品品质的添加剂,这些微生物利用基质中的营养物质进行生长和代谢,进而产生各种代谢产物,这些代谢产物可以改变基质的化学、物理特性,提高食品的风味、营养价值 and 安全性<sup>[3]</sup>。肉类发酵过程需要有发酵乳酸菌(lactic acid bacteria, LAB)、革兰氏过氧化氢酶阳性球菌(gram-positive catalase-positive cocci, GCC+)、凝固酶阴性葡萄球菌(coagulase-negative staphylococcus, CNS)或微球菌科的参与<sup>[4]</sup>。乳酸菌的主要作用是通过糖发酵产生乳酸来降低基质的pH值。降低食品中的pH值可以使纤维蛋白变性凝聚,从而增强产品的硬度和内聚性,有助于切片和口感的提升<sup>[5]</sup>。此外,乳酸菌由于有机酸或其他抗菌代谢物的产生,还可以抑制致病菌和腐败细菌的增殖<sup>[6]</sup>。同时,葡萄球菌有助于形成发酵肉制品的风味和色泽等典型特征,其具有丰富的脂肪酶和蛋白酶活性,这些酶可以分解脂肪和蛋白质,产生风味前体物质,与风味发育相关<sup>[7]</sup>。Xiao等<sup>[8]</sup>表明接种发酵剂的干发酵香肠的风味提升归

因于微生物质量的改善。

因此,利用微生物发酵剂制作发酵刀板香可以提高其品质的稳定性和一致性,保证产品质量的稳定。通过调节微生物发酵剂的类型和使用配比还可以控制产品的口感、储存期等特性,进一步提高产品的质量,降低成本<sup>[9]</sup>。微生物发酵剂的应用还可以减少传统制作中的对环境的污染,因此也具有较好的环保效益<sup>[2]</sup>。目前对发酵刀板香的研究主要以加工工艺为主,对其添加发酵微生物的研究较少<sup>[10]</sup>。因此,本试验采用6组不同配比的复合微生物发酵剂对刀板香进行发酵,使用电子鼻、顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术以及感官分析等方法,对其品质及其挥发性风味成分等指标进行检测分析,以确定最佳配比,以期为徽派腊肉发酵刀板香提供更好的质量保证,使其更好地适应市场需求,以期进一步推动发酵刀板香加工技术的发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

猪背部五花肉:安徽东升食品有限公司;盐、白酒、白糖:市售;弯曲乳杆菌 WQ、木糖葡萄球菌 MT.S.14 菌株:合肥工业大学食品与生物工程学院肉品菌种保藏中心;MRS 培养基、MSA 培养基:广东环凯生物科技有限公司;2,4,6-三甲基吡啶(分析纯):上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

ME204E-02 电子分析天平:瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司;Synergy H1 酶标仪:美国 BioTek 仪器有限公司;BSD-150 振荡培养箱:上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;AC2-4S1 超净工作台:苏州安泰空气技术有

限公司;CR-400 色彩色差计:柯尼卡美能达(中国)投资有限公司;GCMS-QP2010 气质联用仪:日本岛津公司;50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS 萃取头(配套固相微萃取手动进样手柄):美国 Supelco 公司;PEN3 电子鼻分析仪:德国 AIR SENSE 公司;Rationli Combi Classic 蒸箱:德国 RATION 公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品制备

本试验共分为 7 组。各组菌种添加量及其配比如表 1 所示。

表 1 试验分组  
Table 1 Experiment grouping

分组	菌种添加量/ (CFU/g)	菌种浓度配比 (弯曲乳杆菌 D2:木糖葡萄球菌 S.14)
对照(CK)	不添加	
A1	$10^6$	1:3
A2	$10^6$	1:1
A3	$10^6$	3:1
B1	$10^7$	1:3
B2	$10^7$	1:1
B3	$10^7$	3:1

复合发酵剂制备:将弯曲乳杆菌 WQ 和木糖葡萄球菌 MT.S.14 活化三代,以 1% 的接种量分别接种到 MRS 培养基和 MSA 培养基中 37  $^{\circ}\text{C}$  培养 12 h,8 000 $\times$ g 离心 5 min 后,将两种菌种按照浓度配比进行混合,用无菌生理盐水洗 2~3 次,收集菌体备用。

刀板香制作工艺:选用肥瘦均匀的猪背部五花肉,将整片猪背肉切分成 40 cm $\times$ 15 cm 的长条,在低温环境下使用 8% 盐、2% 白酒和 1.5% 白糖进行腌制,腌制 15 d 后,将复合发酵剂使用注射方式接种到样品中,进行晾晒和发酵。发酵条件为 25  $^{\circ}\text{C}$  发酵 7 d,成熟后放置于 4  $^{\circ}\text{C}$  保存。

#### 1.3.2 色差测定

采用色彩色差计对成熟的样品进行色度值的客观仪器分析,其结果以 CIE  $L^*a^*b^*$  系统表示。 $L^*$  值表示亮度; $a^*$  值表示红绿偏向; $b^*$  值表示黄蓝偏向。将刀板香切成 2 cm 薄片,用聚乙烯薄膜将背侧面压平,然后进行测定。每个样品纯瘦肉、纯肥肉各取 2 片,每一片测 3 个点,共 6 个重复,取其平均值。

#### 1.3.3 电子鼻分析

电子鼻方法根据 Li 等<sup>[11]</sup>方法略作修改,称 2 g 样品置于顶空瓶中,置于 60  $^{\circ}\text{C}$  恒温水浴平衡 30 min,上机检测。电子鼻设置参数:检测时间 150 s,采集周期 1 s,清洗时间 120 s,预进样时间 5 s,进样流量 900 mL/min,载气流速 150 mL/min。每个样品平行测定 2 次。用 WINMUSTER 软件对数据进行处理,选择 145 s 处的信

号进行进一步分析。PEN3 型电子鼻传感器由 10 种金属氧化物传导阵列构成,不同传感器性能描述如表 2 所示。

表 2 PEN3 便携式标准传感器阵列及性能  
Table 2 PEN3 portable standard sensor array and performance

编号	传感器	传感器响应特征	检查极限/ (mL/mL)
R1	WIC	对芳香族化合物,苯类敏感	$10^{-5}$
R2	W5S	对氮氧化合物很灵敏	$10^{-6}$
R3	W3C	对芳香成分,氨类敏感	$10^{-5}$
R4	W6S	主要对氢化物有选择性	$10^{-4}$
R5	W5C	短链烷烃芳香成分	$10^{-6}$
R6	WIS	对甲基类灵敏	$10^{-4}$
R7	WIW	对硫化物灵敏	$10^{-6}$
R8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏	$10^{-4}$
R9	W2W	芳香族化合物,对有机硫化物灵敏	$10^{-6}$
R10	W3S	对烷烃灵敏	$10^{-5}$

#### 1.3.4 挥发性成分分析

挥发性成分的测定根据朱旱林<sup>[12]</sup>的方法略作修改,准确称取 4 g 刀板香样品,切碎后放置于顶空进样瓶中。加入 10  $\mu\text{L}$  2,4,6-三甲基吡啶(121.18  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )作为标准品,放置于 60  $^{\circ}\text{C}$  水浴锅中预热 30 min。将固相微萃取(solid phase microextraction, SPME)萃取针插入顶空瓶中萃取 30 min,于 250  $^{\circ}\text{C}$  下解吸 5 min。GC 条件:DB-5 MS 毛细管柱(60 m $\times$ 0.32 mm, 1  $\mu\text{m}$ ),起始温度 40  $^{\circ}\text{C}$ ,恒定温度保持 3 min,以 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  恒速升温至 200  $^{\circ}\text{C}$ ,恒定温度保持 3 min,然后以 8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  恒速升温至 250  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 5 min;载气为 He,流速为 1.0 mL/min,不分流进样。质谱(mass spectrometry, MS)条件:离子源温度为 200  $^{\circ}\text{C}$ ,接口温度为 250  $^{\circ}\text{C}$ ,离子源电子能量 70 eV,质量扫描范围( $m/z$ ) 45~600。利用 GC-MS 系统自带的美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)和 WILEY (Wiley Registry of Mass Spectral Data)谱库进行检索,保留相似度大于等于 80(最大值为 100)的物质,并且使用正构烷烃计算化合物的保留指数。使用面积归一化法计算各组分的相对峰面积,使用相对峰面积结合内标换算出其它物质的相对含量。定量方法:采用内标半定量法测定挥发性物质的相对含量(半定量法),物质浓度( $C, \mu\text{g}/100 \text{g}$ )的计算公式如下。

$$C = \frac{A_{\text{样}}}{A_{\text{内}}} \times 121.18 \times 0.01 \times 100/4$$

式中: $A_{\text{样}}$ 为样品的气质图谱峰面积; $A_{\text{内}}$ 为内标物质的气质图谱峰面积;121.18 为 2,4,6-三甲基吡啶浓度,  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ;0.01 为进样量, mL;4 为刀板香样品的质量, g。

## 1.3.5 感官评价

采用感官评分法对发酵刀板香样品进行感官评价,感官评价标准如表3所示。

表3 发酵刀板香感官评价标准

Table 3 Standards for sensory evaluation of fermented Daobanxiang

感官评定指标	评价标准	分值
气味	腊肉气味强烈,香气浓郁	8~10
	腊肉气味明显但不强烈,香味浓厚	6~<8
	腊肉气味明显但轻微,香气轻柔	4~<6
	腊肉气味轻微不明显,香味淡雅	2~<4
	没有腊肉气味,也无香味	0~<2
滋味	咸度适中,味道浓郁,风味丰富,回味悠长	8~10
	咸度较适中,酸味较浓,风味层次分明,令人回味无穷	6~<8
	咸淡适中,酸味轻柔,风味一般,略有欠缺	4~<6
	咸淡不一,酸味平淡或浓烈,风味单一,需改进	2~<4
	过咸或过淡,酸味不纯,风味淡薄,需要大幅改善	0~<2
色泽	瘦肉呈红褐色,脂肪透明,色泽鲜明,色彩饱满	8~10
	瘦肉呈红褐色,脂肪为乳白色,光泽适中,色彩明亮	6~<8
	瘦肉颜色较淡,脂肪呈淡黄色,光泽色彩稍显平淡	4~<6
	瘦肉颜色很淡,脂肪呈亮黄色,光泽欠缺,色彩较暗淡	2~<4
	瘦肉呈绿色,脂肪亮黄色,没有光泽	0~<2
口感	口感鲜嫩,无明显粗糙感,肥而不腻	8~10
	口感较为鲜嫩,无明显粗糙感,肥而不腻	6~<8
	口感尚可,略有粗糙感,有油感	4~<6
	肉质较为坚韧或较为松软,有粗糙感,部分渗油	2~<4
	肉质非常坚硬或非常松软,有明显粗糙感,严重渗油	0~<2
组织状态	弹性很好	8~10
	较有弹性	6~<8
	略有弹性	4~<6
	弹性很弱	2~<4
	无弹性	0~<2

20名经过培训的评估人员,按照表3对发酵刀板香样品进行感官评定试验。感官分析前,专家组成员接受专业的感官评价培训。具体处理如下:将刀板香切成4~5 mm切片在蒸箱(150 °C)内蒸20 min,煮熟后分别盛于白色无味纸盘中发给每位评价人员,从腊肉的准备到送达评定人员进行评定时间间隔不超过1 min,嗅闻前纸盘上用保鲜膜封好防止气味流失<sup>[12]</sup>。要求评定人员先看并嗅闻样品,然后食用。在表格内对每个指标分别打分作出评定,嗅闻2个样品间必须间隔30 s以上。试验采用10分制量化加权评分法,分别对产品的气味、滋味、色泽、口感、组织状态5项指标进行

评定,确定产品整体可接受性。根据刀板香产品感官品质的不同要求,为各项指标赋予了不同的权重,其中气味和滋味各占0.3,色泽占0.2,口感和组织状态各占0.1。最终根据评分结果确定产品的整体可接受性。

## 1.4 数据处理

试验数据使用Office 2019进行统计整理,结果以平均值±标准差表示,利用SPSS 26进行单因素方差分析,显著水平 $P<0.05$ ,利用GraphPad Prism 8进行主成分分析。

## 2 结果与分析

## 2.1 色差测定结果

不同组别发酵刀板香的色泽的分析结果如表4所示。

表4 发酵刀板香的色泽

Table 4 Color of fermented Daobanxiang

样品	瘦肉			肥肉		
	L*值	a*值	b*值	L*值	a*值	b*值
CK	35.52±5.36 <sup>a</sup>	4.72±0.25 <sup>c</sup>	8.01±1.52 <sup>bc</sup>	74.93±0.54 <sup>a</sup>	-2.99±0.16 <sup>d</sup>	10.33±0.30 <sup>bc</sup>
A1	34.05±1.74 <sup>a</sup>	7.68±0.53 <sup>c</sup>	6.36±0.4 <sup>bc</sup>	74.07±0.12 <sup>a</sup>	-1.75±0.05 <sup>b</sup>	9.36±0.29 <sup>c</sup>
A2	35.89±0.31 <sup>a</sup>	5.26±0.11 <sup>de</sup>	8.97±0.24 <sup>b</sup>	70.60±0.21 <sup>b</sup>	-1.86±0.08 <sup>bc</sup>	9.81±0.14 <sup>bc</sup>
A3	31.01±1.83 <sup>ab</sup>	5.84±0.17 <sup>d</sup>	7.70±0.66 <sup>bc</sup>	75.06±0.37 <sup>a</sup>	-2.19±0.02 <sup>c</sup>	14.89±0.06 <sup>a</sup>
B1	28.43±2.15 <sup>b</sup>	10.03±0.73 <sup>a</sup>	11.58±2.37 <sup>a</sup>	72.79±0.15 <sup>ab</sup>	-1.30±0.02 <sup>a</sup>	14.49±0.14 <sup>a</sup>
B2	28.3±0.34 <sup>b</sup>	8.69±0.11 <sup>b</sup>	11.45±0.13 <sup>a</sup>	61.24±3.35 <sup>c</sup>	-1.32±0.37 <sup>a</sup>	8.74±1.66 <sup>c</sup>
B3	31.6±0.56 <sup>ab</sup>	7.95±0.22 <sup>bc</sup>	6.27±0.77 <sup>c</sup>	71.01±0.94 <sup>b</sup>	-1.54±0.27 <sup>ab</sup>	11.18±1.05 <sup>b</sup>

注:同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

由表4可知,与CK组相比,使用复合发酵剂发酵的刀板香在瘦肉和肥肉中的色泽表现出一定的变化。复合发酵剂组的样品L\*值整体呈降低趋势,而a\*值均有所增加;其中,B组的a\*值大于A组,可能是因为B组添加的总体菌浓度比A组多。同时在B组中,B1瘦肉的a\*值最大达到10.03,其在瘦肉和肥肉中都表现出较好的色泽,可能是因为B1组中添加的木糖葡萄糖菌MT.S.14浓度最高,对产品的色泽产生了积极影响<sup>[13]</sup>。

## 2.2 电子鼻气味分析

为更直观地比较和分析不同配比的复合菌种发酵刀板香的香气特征,通过绘制雷达图来展示7组刀板香样品在10个不同传感器下的响应强度峰值,结果如图1所示。

由图1可知,W5S的响应值最大,其次是W1W、

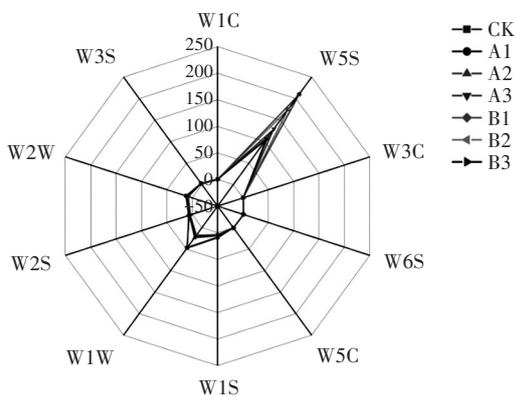


图1 不同配比的复合菌种发酵刀板香的电子鼻雷达图

Fig.1 Electronic nose radar map of fermented Daobanxiang with different ratios of composite strains

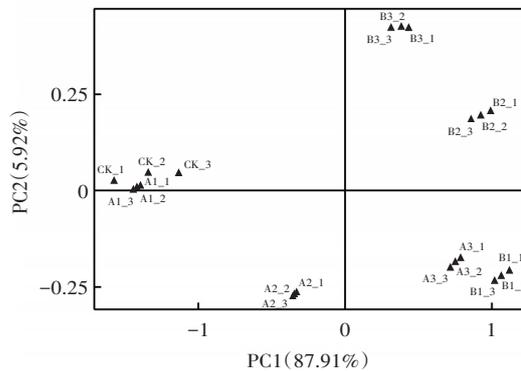


图2 不同配比的复合菌种发酵刀板香的电子鼻主成分分析

Fig.2 Principal component analysis of electronic nose of fermented Daobanxiang with different ratios of composite strains

W2W、W2S、W1S, 显示出样品中的挥发性风味成分在氮化合物、无机硫化物、有机硫化物、甲基类和醇类方面具有显著响应能力。这意味着这些化合物在刀板香样品中起重要的风味贡献作用, 并且对于感知其风味特征至关重要。通过观察传感器信号响应的强弱, 可以初步判断样品之间的气味物质存在差异。

采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 进一步对电子鼻的检测结果深入分析, 结果如图2所示。

由图2可知, PC1和PC2的贡献率分别为87.91%和5.92%, 总贡献率达到93.83%, 表明结果可信, 可以很好地代表样品的结果。其中, 在水平轴的左半区,

CK和A1距离很近, 存在部分重叠, 表明CK和A1的风味差异不大; 而其他5个样品与CK的距离较远, 与CK组表现出明显的风味特征差异。同时, 发现A组和B组存在差异, 在A组中, A1、A2和A3之间相距较远, 显示出它们在气味物质上存在显著差异; 在B组中, B1、B2和B3在气味特征上也相距较大。B1组与CK组距离最远, 两组风味差异最大。

### 2.3 挥发性物质组成分析

使用GC-MS测定不同配比的复合菌种发酵刀板香的挥发性化合物。GC-MS鉴定的挥发性化合物如表5所示。

表5 不同配比的复合菌种发酵刀板香的挥发性风味成分相对含量

Table 5 Relative content of volatile flavor components of fermented Daobanxiang with different ratios of composite strains

编号	中文名称	相对含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )						
		CK	A1	A2	A3	B1	B2	B3
醛类								
V1	己醛	466.2 $\pm$ 160.0 <sup>c</sup>	758.7 $\pm$ 132.3 <sup>bc</sup>	891.6 $\pm$ 142.0 <sup>abc</sup>	1 187 $\pm$ 401.4 <sup>abc</sup>	1 693.8 $\pm$ 462.6 <sup>a</sup>	1 471.3 $\pm$ 644.5 <sup>ab</sup>	970.9 $\pm$ 87.1 <sup>abc</sup>
V2	庚醛	5.4 $\pm$ 0.1 <sup>c</sup>	10.2 $\pm$ 3.1 <sup>bc</sup>	19.9 $\pm$ 1.9 <sup>ab</sup>	22.4 $\pm$ 5.9 <sup>ab</sup>	25.1 $\pm$ 11.4 <sup>a</sup>	20.4 $\pm$ 8.9 <sup>ab</sup>	13.5 $\pm$ 1.4 <sup>abc</sup>
V3	壬醛	13.9 $\pm$ 1.5 <sup>d</sup>	22.2 $\pm$ 2.5 <sup>cd</sup>	56.1 $\pm$ 5.3 <sup>a</sup>	48.0 $\pm$ 13.3 <sup>ab</sup>	35.2 $\pm$ 10.5 <sup>bc</sup>	31.3 $\pm$ 12.6 <sup>bcd</sup>	49.0 $\pm$ 5.0 <sup>ab</sup>
V4	辛醛	6.8 $\pm$ 1.1 <sup>b</sup>	6.3 $\pm$ 1.3 <sup>b</sup>	17.1 $\pm$ 0.8 <sup>a</sup>	15.3 $\pm$ 4.3 <sup>a</sup>	10.2 $\pm$ 3.4 <sup>ab</sup>	14.6 $\pm$ 6.9 <sup>a</sup>	15.3 $\pm$ 0.7 <sup>a</sup>
V5	琥珀二甲醛	44.5 $\pm$ 21.3 <sup>a</sup>	-	24.6 $\pm$ 4.7 <sup>ab</sup>	34.0 $\pm$ 9.0 <sup>a</sup>	38.0 $\pm$ 10.3 <sup>a</sup>	-	10.6 $\pm$ 7.9 <sup>bc</sup>
V6	2-甲基丁醛	-	-	28.4 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>	-	15.1 $\pm$ 12.0 <sup>b</sup>	-	-
V7	3-甲基丁醛	2.4 $\pm$ 1.0 <sup>a</sup>	-	-	1.3 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	1.5 $\pm$ 0.6 <sup>ab</sup>	0.3 $\pm$ 0.0 <sup>c</sup>	-
V8	戊醛	-	-	-	48.5 $\pm$ 7.6 <sup>a</sup>	-	23.8 $\pm$ 4.2 <sup>b</sup>	20.2 $\pm$ 2.1 <sup>b</sup>
V9	2-丙烯醛	-	-	-	-	-	0.9 $\pm$ 0.4 <sup>a</sup>	-
V10	(E)-2-辛烯醛	-	-	-	-	-	2.0 $\pm$ 0.3 <sup>a</sup>	-
醇类								
V11	1-己醇	100.0 $\pm$ 85.4 <sup>a</sup>	8.9 $\pm$ 1.9 <sup>b</sup>	26.3 $\pm$ 1.4 <sup>b</sup>	11.6 $\pm$ 3.3 <sup>b</sup>	19.2 $\pm$ 9.1 <sup>b</sup>	11.5 $\pm$ 1.2 <sup>b</sup>	15.4 $\pm$ 1.8 <sup>b</sup>
V12	1-戊醇	61.4 $\pm$ 33.7 <sup>a</sup>	16.3 $\pm$ 3.5 <sup>c</sup>	26.0 $\pm$ 3.3 <sup>b</sup>	34.1 $\pm$ 11.4 <sup>b</sup>	33.6 $\pm$ 20.2 <sup>b</sup>	12.9 $\pm$ 1.7 <sup>c</sup>	18.4 $\pm$ 2.0 <sup>c</sup>
V13	1-辛烯-3-醇	49.0 $\pm$ 10.6 <sup>c</sup>	58.4 $\pm$ 16.1 <sup>bc</sup>	137 $\pm$ 13.7 <sup>abc</sup>	123.3 $\pm$ 49.8 <sup>abc</sup>	161.2 $\pm$ 25.6 <sup>a</sup>	140.8 $\pm$ 85.4 <sup>abc</sup>	149.6 $\pm$ 13.5 <sup>ab</sup>
V14	2-乙基-1-己醇	1.6 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>	2.6 $\pm$ 0.6 <sup>b</sup>	4.7 $\pm$ 0.2 <sup>b</sup>	4.6 $\pm$ 1.5 <sup>b</sup>	9.2 $\pm$ 4.0 <sup>a</sup>	4.2 $\pm$ 1.3 <sup>b</sup>	3.4 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>
V15	4-乙基环己醇	0.0 $\pm$ 0.0 <sup>bc</sup>	0.7 $\pm$ 0.2 <sup>b</sup>	-	1.4 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>	1.2 $\pm$ 0.7 <sup>a</sup>	-	-
V16	1-辛醇	-	-	-	-	2.4 $\pm$ 0.1 <sup>a</sup>	-	-
V17	2,4-二甲基环己醇	-	-	0.8 $\pm$ 0.1 <sup>a</sup>	-	-	-	-
V18	1-戊烯-3-醇	-	-	-	-	6.4 $\pm$ 4.0 <sup>a</sup>	-	-
V19	1,4-丁二醇	-	-	-	-	-	-	0.5 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>

续表5 不同配比的复合菌种发酵刀板香的挥发性风味成分相对含量

Continue table 5 Relative content of volatile flavor components of fermented Daobanxiang with different ratios of composite strains

编号	中文名称	相对含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )						
		CK	A1	A2	A3	B1	B2	B3
酮类								
V20	3-戊酮	3.9±2.5 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	-
V21	2-庚酮	14.7±7.4 <sup>a</sup>	3.7±0.6 <sup>b</sup>	7.0±0.5 <sup>b</sup>	8.1±2.2 <sup>ab</sup>	8.5±4.0 <sup>ab</sup>	3.3±0.5 <sup>b</sup>	5.3±0.7 <sup>b</sup>
V22	2,2-二甲基-3-庚酮	-	2.1±0.2 <sup>b</sup>	-	-	7.4±1.1 <sup>a</sup>	-	-
V23	2,3,3-三甲基环丁酮	-	-	-	-	1.6±0.9 <sup>a</sup>	-	-
V24	4-甲基-2-氧杂环酮	-	-	6.1±1.7 <sup>a</sup>	-	-	-	-
V25	丙酮	-	-	-	14.7±11.4 <sup>a</sup>	-	20.9±4.8 <sup>a</sup>	18.0±2.0 <sup>a</sup>
V26	3-辛烯-2-酮	-	-	-	4.8±1.1 <sup>a</sup>	-	-	-
V27	甲基乙炔基甲酮	-	-	-	-	2.1±0.9 <sup>a</sup>	-	-
V28	3-甲基-2-丁酮	-	-	-	-	-	0.8±0.0 <sup>a</sup>	-
酸类								
V29	丁酸	17.5±7.1 <sup>b</sup>	32.3±23.5 <sup>b</sup>	-	35.1±44.8 <sup>b</sup>	50.8±39.8 <sup>ab</sup>	12.8±16.9 <sup>b</sup>	103.0±17.8 <sup>a</sup>
V30	戊酸	-	-	-	99.5±0.8 <sup>a</sup>	24.9±19.1 <sup>c</sup>	-	-
V31	丙酸酐	1.1±0.7 <sup>ab</sup>	-	-	25.4±18.3 <sup>a</sup>	-	-	23.1±14.2 <sup>a</sup>
V32	2-甲基戊酸酐	5.0±2.0 <sup>a</sup>	-	-	35.3±35.8 <sup>ab</sup>	5.7±2.2 <sup>b</sup>	-	-
V33	2-甲基丙酸酐	-	-	6.9±1.0 <sup>a</sup>	1.5±0.4 <sup>b</sup>	-	9.2±4.5 <sup>a</sup>	-
V34	醋酸酐	-	-	-	-	2.3±2.0 <sup>a</sup>	-	-
酯类								
V35	甲酸甲酯	-	-	33.2±3.4 <sup>a</sup>	-	-	-	3.5±3.3 <sup>b</sup>
V36	己酸乙酯	7.0±0.5 <sup>ab</sup>	7.6±1.4 <sup>ab</sup>	12.2±0.9 <sup>a</sup>	-	11.9±4.2 <sup>ab</sup>	11.6±4.6 <sup>ab</sup>	6.6±1.6 <sup>b</sup>
V37	丙酸 2-甲基丁酯	1.4±0.7 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	-
V38	正己酸乙酯	-	11.5±7.2 <sup>b</sup>	-	-	-	-	127.9±9.1 <sup>a</sup>
V39	碳酸二乙酯	-	3.2±1.4 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-
烯炔类								
V40	三甲基氧化烯	-	18.7±5.2 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-
V41	3-辛烯,6-甲基	-	1.5±0.7 <sup>b</sup>	4.0±0.1 <sup>a</sup>	-	-	-	-
V42	1,3-丁二炔	-	-	-	-	-	-	16.8±5.6 <sup>a</sup>
V43	3-壬烯	-	-	-	-	-	-	3.1±0.4 <sup>a</sup>
硫醚类								
V44	二甲醚	688.7±382.1 <sup>a</sup>	95.3±26.3 <sup>b</sup>	279.3±30.2 <sup>b</sup>	41.8±12.8 <sup>b</sup>	175.3±112.3 <sup>b</sup>	-	-
V45	二硫化碳	646.5±463.9 <sup>ab</sup>	414.5±142.5 <sup>b</sup>	953.0±63.3 <sup>a</sup>	643.7±101.9 <sup>ab</sup>	533.8±296.7 <sup>ab</sup>	155.7±24.4 <sup>b</sup>	179.1±55.8 <sup>b</sup>
V46	二甲基砜	-	-	-	-	1.1±0.5 <sup>a</sup>	-	0.3±0.1 <sup>b</sup>
烷烃类								
V47	丁基环丁烷	6.8±2.9 <sup>a</sup>	-	7.5±0.6 <sup>a</sup>	5.6±1.6 <sup>ab</sup>	3.7±1.1 <sup>bc</sup>	1.2±0.1 <sup>cd</sup>	4.8±0.4 <sup>ab</sup>
V48	戊烷	5.5±1.1 <sup>ab</sup>	2.2±1.7 <sup>bc</sup>	6.2±3.2 <sup>a</sup>	-	3.6±2.0 <sup>abc</sup>	-	-
V49	甲基环丁烷	-	4.7±4.7 <sup>a</sup>	1.4±0.1 <sup>ab</sup>	2.0±1.9 <sup>ab</sup>	0.6±0.5 <sup>ab</sup>	0.3±0.1 <sup>ab</sup>	0.4±0.0 <sup>ab</sup>
V50	3-甲基壬烷	-	3.1±1.1 <sup>b</sup>	4.6±1.0 <sup>b</sup>	6.8±1.7 <sup>a</sup>	-	-	-
V51	2-甲基壬烷	-	-	-	-	5.8±4.9 <sup>a</sup>	-	-
V52	1,1-二乙氧基乙烷	-	7.2±5.4 <sup>a</sup>	-	1.0±0.4 <sup>b</sup>	-	0.5±0.2 <sup>b</sup>	-
V53	2-甲基辛烷	-	-	-	8.2±1.0 <sup>a</sup>	-	-	3.0±2.3 <sup>b</sup>
V54	3-甲基十一烷	-	-	-	1.8±0.6 <sup>a</sup>	1.3±0.4 <sup>a</sup>	-	-
V55	仲丁胺	-	-	-	-	37.9±10.1 <sup>a</sup>	14.4±0.1 <sup>b</sup>	-
V56	丙基环丙烷	-	-	-	-	-	7.4±5.0 <sup>a</sup>	-
其他								
V57	N,N-二乙基甲酰胺	8.7±4.4 <sup>a</sup>	1.4±0.2 <sup>b</sup>	5.3±1.0 <sup>ab</sup>	6.9±2.1 <sup>a</sup>	4.6±2.2 <sup>ab</sup>	1.7±0.2 <sup>b</sup>	1.8±0.2 <sup>b</sup>
V58	N,N-二丁基甲酰胺	3.4±1.7 <sup>bc</sup>	2.2±0.1 <sup>cd</sup>	6.0±0.9 <sup>a</sup>	5.3±1.4 <sup>ab</sup>	4.0±1.1 <sup>abc</sup>	-	1.9±0.6 <sup>cd</sup>
V59	甲苯	15.4±6.9 <sup>a</sup>	-	14.7±3.7 <sup>a</sup>	11.0±1.6 <sup>ab</sup>	14.4±6.9 <sup>a</sup>	-	3.5±0.4 <sup>bc</sup>
V60	三氯甲烷	2.0±0.9 <sup>ab</sup>	1.3±0.2 <sup>b</sup>	1.6±0.2 <sup>b</sup>	2.8±0.8 <sup>a</sup>	-	-	-
V61	1H-四唑-5-胺	6.0±1.5 <sup>a</sup>	1.0±0.5 <sup>a</sup>	-	-	-	-	13.7±16 <sup>a</sup>
V62	1,3-丙二胺	1.3±1.1 <sup>b</sup>	2.7±1.7 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-
V63	5H-四唑-5-胺	-	1.6±0.8 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-
V64	2-n-丁基呋喃	-	1.2±0.4 <sup>abc</sup>	1.9±0.5 <sup>ab</sup>	2.8±0.9 <sup>a</sup>	2.6±1.5 <sup>a</sup>	0.9±0.2 <sup>bc</sup>	1.6±0.1 <sup>ab</sup>
V65	2-戊基呋喃	-	-	-	115±28.3 <sup>a</sup>	106.9±36.1 <sup>a</sup>	34.6±3.1 <sup>b</sup>	125.3±11.0 <sup>a</sup>
V66	二叔丁基过氧化物	24.0±16.6 <sup>a</sup>	3.9±0.4 <sup>b</sup>	5.9±2.9 <sup>b</sup>	5.5±2.0 <sup>b</sup>	2.7±1.5 <sup>b</sup>	3.5±0.4 <sup>b</sup>	1.5±0.2 <sup>b</sup>

注:同行不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。-表示未检出。

由表5可知,在不同配比的复合菌种发酵刀板香中共检测到66种挥发性化合物,包括醛类10种、酮类9种、醇类9种、酸类6种、酯类5种、烯炔类4种、烷炔类10种、硫醚类3种和其他10种。

### 2.3.1 醛类化合物

醛类主要来自脂质自氧化和少量的美拉德反应。醛具有低气味阈值,是发酵肉制品中重要的挥发性化合物<sup>[14]</sup>。由表5可知,该研究鉴定到大量的线性醛和不饱和支链醛,其中A组和B组中己醛、庚醛、壬醛和辛醛的相对含量与CK组对比整体明显提高。己醛和庚醛通常给发酵肉制品带来草味和脂肪味。己醛是最丰富的,可用于评估脂质氧化水平<sup>[15]</sup>。己醛的相对含量在B1样品中最大,为1693.8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。壬醛具有柑橘、绿色气味,有助于刀板香在成熟阶段的风味<sup>[13]</sup>。(E)-2-辛烯醛、2-甲基丁醛、2-丙烯醛等不饱和支链醛在CK组中未被检出,而在添加复合菌种后B1和B2组中被部分检出( $P<0.05$ )。这些醛类物质有助于刀板香等发酵肉制品中脂肪和水果味的风味发展<sup>[16]</sup>。

### 2.3.2 醇类化合物

醇与脂质氧化、氨基酸降解、甲基酮还原和酸降解密切相关<sup>[17]</sup>。由表5可知,发酵刀板香中1-己醇、1-戊醇的相对含量相对于CK组显著降低。由于其在发酵过程中不断氧化为相应的酸、醛和酯,相对含量从100.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和61.4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 最低下降到8.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和12.9  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。甲基支链醇(1-辛烯-3-醇、2-乙基-1-己醇、4-乙基环己醇)与CK组相比含量明显增加,是影响风味的主要醇类。1-辛烯-3-醇具有特征性的蘑菇香气,气味阈值低,在添加了复合菌种的样品中含量很高,其中B1组含量达到最高为161.2  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,这种甲基支链醇起源于通过Ehrlich途径对氨基酸的Strecker降解和脂肪酸(如亚油酸)的降解<sup>[18]</sup>。

### 2.3.3 酮类化合物

酮是由氨基酸降解和微生物代谢产生的,为发酵肉制品提供了特殊的发酵风味,通常呈清香、奶香和果香<sup>[19]</sup>。由表5可知,在CK组中酮类物质检出较少,添加复合菌种后酮类物质增加。其中2-庚酮在所有组别中均存在,其对刀板香果香的形成起重要作用<sup>[20]</sup>。

### 2.3.4 酸类化合物

酸主要来自脂质氧化、磷脂和甘油三酯水解<sup>[14]</sup>。来自脂质氧化的短链酸(碳原子数 $<6$ )因其相对较低的气味阈值而对香肠香气的影响更大。由表5可知,该研究中只鉴定出6种酸或酸酐。丁酸和戊酸是微生物在发酵过程中产生的代谢产物。这些微生物会分解蛋白质和脂肪,释放出氨基酸和脂肪酸,其中一部分会被进一步代谢为丁酸和戊酸<sup>[21]</sup>。同时,某些微生物中的酶可以将氨基酸转化为相应的酸。丁酸主要是由亮氨酸代谢而来,而戊酸则与异亮氨酸代谢有关<sup>[14]</sup>。戊酸

在A3组样品中含量最高,为99.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。丁酸和戊酸常常给肉制品带来一种独特的香气,其中丁酸的香气较为明显。丁酸可能呈现出果香、醇香或腌制风味的特点<sup>[22]</sup>,其在B3组样品里含量达到最高为103.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。酸酐可以提供微生物发酵过程所需的酸性条件。在发酵过程中,酸酐可以被微生物利用,并转化为其他有机酸。这些有机酸进一步促进发酵过程,提高产物的质量和口感。醋酸酐有醋酸醛(acetic aldehyde)和水果酯的香甜气味,丙酸酐肉制品添加一种微酸的、奶香味道<sup>[14]</sup>。醋酸酐只在B1组样品中被发现含量为2.3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

### 2.3.5 酯类化合物

酯来源于短链酸和醇的酯化<sup>[13]</sup>,这也与葡萄球菌中的酯酶活性有关。由表5可知,检测到的甲酸甲酯、己酸乙酯等乙酯化合物对发酵刀板香风味起重要作用。由此产生的果香和甜味可以掩盖发酵过程中产生的难闻气味,例如变质<sup>[21]</sup>。己酸乙酯在A2中的含量最高,为12.2  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

### 2.3.6 炔类化合物

由表5可知,共发现烯炔类4种和烷炔类10种,其含量的差异可能是在微生物代谢的影响下脂肪酸裂解的含量和程度不同造成的。添加复合菌种明显增加了烷炔类的种类,其中A3、B1中烷炔的种类较多,含有丁基环丁烷、甲基环丁烷、3-甲基十一烷等6种烷炔。支链环丁烷通具有水果香气,尤其是香蕉或梨的香味,其往往被认为是一种具有甜味和芳香的化合物,可以增加肉制品的香气和口感。

### 2.3.7 硫醚类化合物及其他

在7组发酵刀板香样品中还检测到二甲醚、二硫化碳、二甲基砷3种硫醚化合物和其他10种物质包括胺类、咪唑、过氧化物等。由表5可知,二甲醚具有甜味和果香,在A组和B组样品中,A2的含量最高,为279.3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,但相对于CK组,添加复合菌种组的二甲醚含量显著降低( $P<0.05$ ),可能是由于二甲醚在发酵过程中通过水解反应和氧化反应被转化为相应的醇和酮<sup>[14]</sup>。二硫化碳具有刺激性气味和辛辣感,具有硫磺、大蒜的气味,与CK组相比,添加复合菌种组的二硫化碳的含量整体在降低。

### 2.3.8 聚类分析

使用欧氏距离作为度量标准进行的聚类分析结果如图3所示。

图3显示了在不同配比复合菌种条件下发酵刀板香的香气特征的变化规律。聚类分析热图的横轴表示不同的配比复合菌种组别,纵轴表示挥发性物质的种类。在热图中,颜色的深浅反映了样品之间的含量的多少,相似的样品会聚集在一起形成簇。图注中的行组别表示样品中挥发性化合物的类别。由图3可知,与CK组相比,A组和B组(添加复合菌种的组别)增

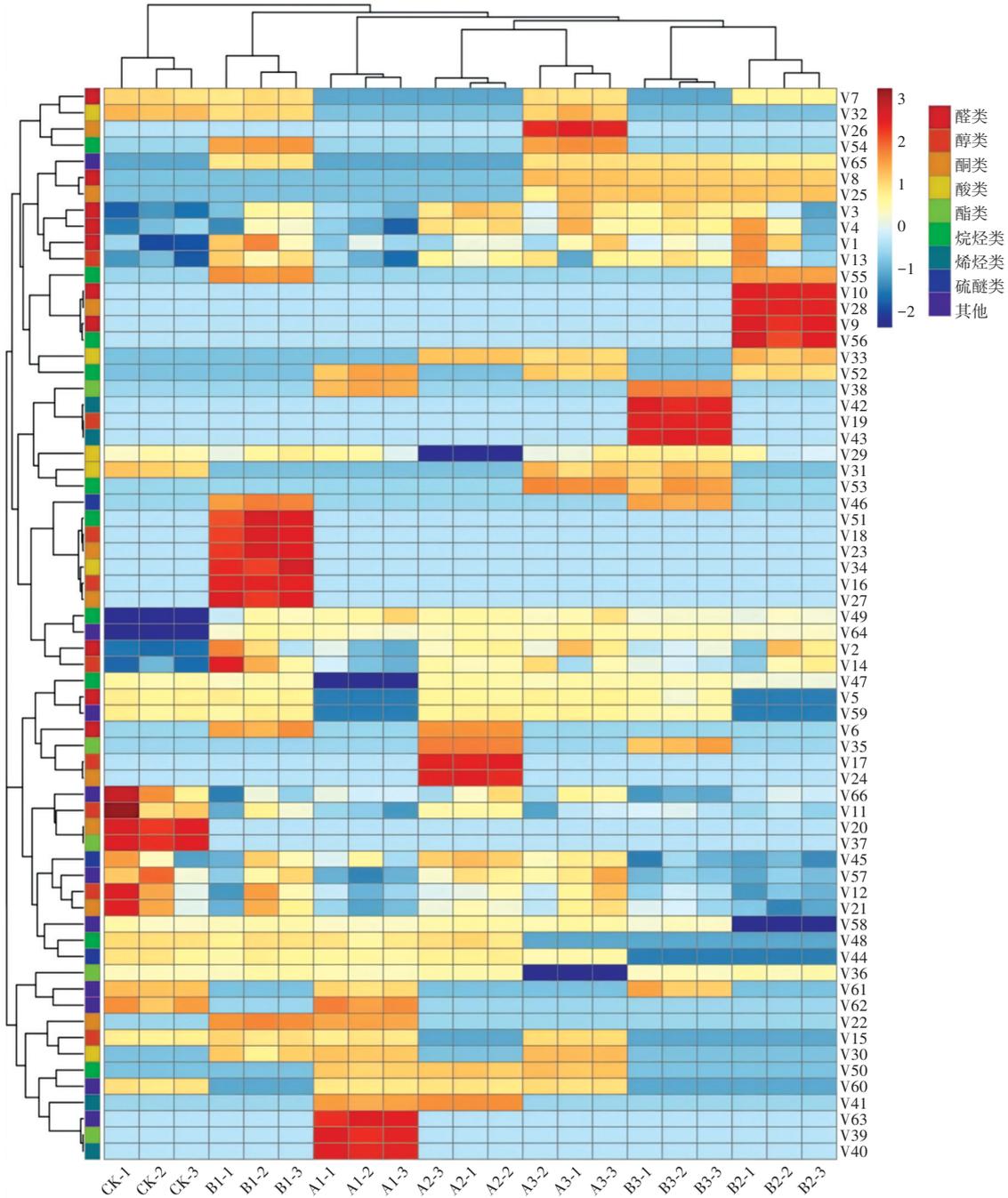


图3 不同配比的复合菌种发酵刀板香的挥发性物质聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of volatile components of fermented Daobanxiang with different ratios of composite strains

强了醛类、醇类、酸类等挥发性物质,降低了硫醚类的物质含量。其中 B1 组显著增加了己醛、庚醛、壬醛、辛醛、1-辛烯-3 醇、丙酮,己酸乙酯的含量,B2 组显著提高了 2-丙烯醛、(E)-2-辛烯醛的含量,这些物质对发酵肉类的风味产生起到重要作用,同时所有样品中,B1 组的醛类、醇类等物质含量较高,所呈现的风味效果最好。

#### 2.4 感官评价分析

7 组发酵刀板香的感官评价雷达图如图 4 所示。

由图 4 可知,CK 组的感官评价不如添加复合菌种组,B 组的感官评价各维度评分比 A 组更好,其中 B1 的综合评分较好,总体评分达到 7.267,气味,色泽和组织状态均较好。与前期色泽和 GC-MS 的结果相对应。可能是因为 B1 组复合菌种配方中添加的木糖葡萄糖球菌 MT.S.14 浓度最高,木糖葡萄糖球菌可以分解蛋白质和脂肪,产生各种挥发性化合物,例如醛、酮和醇等,这些化合物赋予腊肉特殊的香气<sup>[23]</sup>。同时木糖葡萄糖球菌具有发酵能力,可以利用腊肉中的营养物质进行发酵

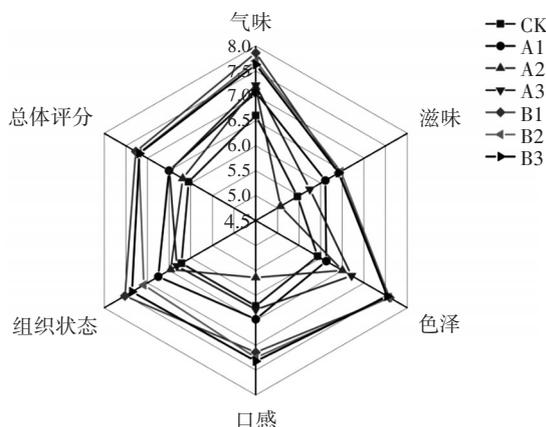


图4 不同配比的复合菌种发酵刀板香的感官评价雷达图

Fig.4 Radar map of sensory evaluation of fermented Daobanxiang with different ratios of composite strains

代谢<sup>[24]</sup>。这个过程产生的代谢产物包括有机酸、酶和其他活性成分,能够改变腊肉的风味<sup>[25]</sup>。而CK组的感官相对较差,总体评分为6.05。

### 3 结论

本研究应用电子鼻检测分析、SPME/GC-MS 技术结合感官评价分析不同配比的复合菌种对发酵刀板香的挥发性风味物质。电子鼻对不同配比的复合菌种对发酵刀板香的挥发性物质进行检测与分析,PCA 分析结果表明,不同配比的复合菌种发酵的刀板香可以通过电子鼻有效区别出来。SPME/GC-MS 结果表明,7种发酵刀板香样品在发酵过程中共检测出66种挥发性成分,包括醛类10种、酮类9种、醇类9种、酸类6种、酯类5种、烯炔类4种、烷烃类10种、硫醚类3种和其他10种,醛类、醇类和酮类等挥发性物质对发酵刀板香风味的影响起关键作用,复合菌种的添加使发酵刀板香形成新的风味,B1组可以明显增加己醛、庚醛、壬醛、辛醛、1-辛烯-3-醇、丙酮、己酸乙酯的含量。色泽、电子鼻、GC-MS 和感官评价的分析结果均显示,B1组(添加比例为弯曲乳杆菌 WQ:木糖葡萄球菌 MT.S.14=1:3、添加量为 $10^7$  CFU/g)对刀板香色泽、风味和感官的效果最好。本研究通过对复合菌种添加量和添加比例的优化,最终发现添加比例为弯曲乳杆菌 WQ:木糖葡萄球菌 MT.S.14=1:3、添加量为 $10^7$  CFU/g的复合菌种更适合作为发酵刀板香。本研究的结果将丰富发酵刀板香高效标准化生产的理论框架,为更准确地开发风味增强型复合发酵剂提供参考,并有助于提高传统发酵刀板香的风味质量。

### 参考文献:

[1] WANG Y, WANG Z M, HAN Q L, et al. Comprehensive insights into the evolution of microbiological and metabolic characteristics of the fat portion during the processing of traditional Chinese bacon[J].

Food Research International, 2022, 155: 110987.

[2] 杨洁, 赵丽华. 不同发酵剂对发酵肉制品风味物质的影响[J]. 食品工业, 2016, 37(6): 235-238.

YANG Jie, ZHAO Lihua. The influence of different starter cultures on flavor substances of fermented meat[J]. The Food Industry, 2016, 37(6): 235-238.

[3] DOS SANTOS CRUXEN C E, FUNCK G D, HAUBERT L, et al. Selection of native bacterial starter culture in the production of fermented meat sausages: Application potential, safety aspects, and emerging technologies[J]. Food Research International, 2019, 122: 371-382.

[4] MA Y, GAO Y F, XU Y J, et al. Microbiota dynamics and volatile metabolite generation during sausage fermentation[J]. Food Chemistry, 2023, 423: 136297.

[5] DROSINOS E H, PARAMITHIOTIS S, KOLOVOS G, et al. Phenotypic and technological diversity of lactic acid bacteria and staphylococci isolated from traditionally fermented sausages in Southern Greece[J]. Food Microbiology, 2007, 24(3): 260-270.

[6] ALMEIDA DA COSTA W K, DE SOUZA G T, BRANDÃO L R, et al. Exploiting antagonistic activity of fruit-derived *Lactobacillus* to control pathogenic bacteria in fresh cheese and chicken meat[J]. Food Research International, 2018, 108: 172-182.

[7] CHEN Q, KONG B H, HAN Q, et al. The role of bacterial fermentation in lipolysis and lipid oxidation in Harbin dry sausages and its flavour development[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 77: 389-396.

[8] XIAO Y Q, LIU Y N, CHEN C G, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus xylosum* on flavour development and bacterial communities in Chinese dry fermented sausages[J]. Food Research International, 2020, 135: 109247.

[9] YANG P, ZHONG G X, YANG J C, et al. Metagenomic and metabolomic profiling reveals the correlation between the microbiota and flavor compounds and nutrients in fermented sausages[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131645.

[10] 周莹, 王兆明, 涂健, 等. 基于16S rRNA的徽派腊肉加工过程中微生物群落结构分析[J]. 肉类研究, 2021, 35(3): 1-7.

ZHOU Ying, WANG Zhaoming, TU Jian, et al. Analysis of microbial community structure during the processing of Hui-style bacon by 16S rRNA sequencing[J]. Meat Research, 2021, 35(3): 1-7.

[11] LI P, ZHOU H, WANG Z Q, et al. Analysis of flavor formation during the production of Jinhua dry-cured ham using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS)[J]. Meat Science, 2022, 194: 108992.

[12] 朱早林. 特定耐逆微生物在刀板香品质形成中的作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.

ZHU Hanlin. Study on the role of specific stress-tolerant microorganisms in the formation of the quality of knife board incense[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.

[13] LI Y X, CAO Z X, YU Z H, et al. Effect of inoculating mixed starter cultures of *Lactobacillus* and *Staphylococcus* on bacterial communities and volatile flavor in fermented sausages[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 200-211.

[14] FLORES M, PIORNOS J A. Fermented meat sausages and the challenge of their plant-based alternatives: A comparative review on aroma-related aspects[J]. Meat Science, 2021, 182: 108636.

[15] ZHAO Y, WANG Y Q, LI C S, et al. Novel insight into physicochemical and flavor formation in naturally fermented tilapia sausage based on microbial metabolic network[J]. Food Research International, 2021, 141: 110122.

[16] LI C S, ZHAO Y, WANG Y Q, et al. Contribution of microbial com-

- munity to flavor formation in tilapia sausage during fermentation with *Pediococcus pentosaceus*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112628.
- [17] WANG H Y, SU W, MU Y C, et al. Correlation between microbial diversity and volatile flavor compounds of *Suan Zuo* rou, a fermented meat product from Guizhou, China[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 736525.
- [18] ZHAO D D, HU J, CHEN W X. Analysis of the relationship between microorganisms and flavour development in dry-cured grass carp by high-throughput sequencing, volatile flavour analysis and metabolomics[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130889.
- [19] HU Y Y, WANG H, KONG B H, et al. The succession and correlation of the bacterial community and flavour characteristics of Harbin dry sausages during fermentation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110689.
- [20] ZHOU H, CUI W, GAO Y F, et al. Analysis of the volatile compounds in Fuliji roast chicken during processing and storage based on GC-IMS[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1484-1493.
- [21] HU Y, ZHANG L, LIU Q, et al. The potential correlation between bacterial diversity and the characteristic volatile flavour of traditional dry sausages from Northeast China[J]. Food Microbiology, 2020, 91: 103505.
- [22] WANG J, HOU J N, ZHANG X, et al. Improving the flavor of fermented sausage by increasing its bacterial quality via inoculation with *Lactobacillus plantarum* MSZ2 and *Staphylococcus xylosum* ycc3[J]. Foods, 2022, 11(5): 736.
- [23] SÁNCHEZ MAINAR M, STAVROPOULOU D A, LEROY F. Exploring the metabolic heterogeneity of coagulase-negative staphylococci to improve the quality and safety of fermented meats: A review[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 247: 24-37.
- [24] 周慧敏, 张顺亮, 赵冰, 等. 木糖葡萄糖菌和肉葡萄糖菌混合发酵剂对腊肉品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(22): 32-38. ZHOU Huimin, ZHANG Shunliang, ZHAO Bing, et al. Effect of starter culture mixture of *Staphylococcus xylosum* and *S. carnosus* on the quality of dry-cured meat[J]. Food Science, 2018, 39(22): 32-38.
- [25] 葛芮瑄, 罗玉龙, 剧柠. 传统发酵肉制品中微生物菌群对风味形成的研究进展[J]. 微生物学通报, 2022, 49(6): 2295-2307. GE Ruixuan, LUO Yulong, JU Ning. Research progress on the microbial flora affecting flavor formation of traditional fermented meat products[J]. Microbiology China, 2022, 49(6): 2295-2307.

加工编辑:张岩蔚  
收稿日期:2024-01-06