

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80613

# 基于感官、电子鼻和 GC-IMS 分析的 东北臭酱气味特征判别

汲生泷<sup>1</sup> 李美善<sup>1,2</sup> 李凤林<sup>1,2,3</sup> 陈福玉<sup>1,2</sup> 魏登<sup>1,2,3</sup>

(1. 吉林农业科技学院食品科学与营养工程学院, 吉林 吉林 132101; 2. 吉林省酿造技术科技创新中心, 吉林 吉林 132101; 3. 吉林农业科技学院“国家食物与营养教育示范基地”, 吉林 吉林 132101)

**摘要:** [目的] 探究 4 种市售臭酱挥发性风味的差异性并进行气味特征判别。[方法] 利用感官剖面、电子鼻结合气相色谱—离子迁移谱法 (gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS) 全面分析 4 种臭酱中挥发性风味的差异性及其气味特征。[结果] 4 种东北臭酱中的主要挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 为酯类、酸类、醛类、酮类以及吡嗪、呋喃和吡咯等杂环类挥发物; 酸香、腐香是构成臭酱“闻着臭”的核心气味, CJ1 臭酱的刺激性“臭味”较突出; CJ2 臭酱气味层次感更强; CJ3 臭酱气味较融合; CJ4 臭酱臭味较轻, 清香和芳香味重且柔和; 不同臭酱中的气味特征具有明显的差异。[结论] 基于感官剖面、电子鼻结合 GC-IMS 技术能够全面有效区分和判别 4 种不同市售臭酱的挥发性风味特征。

**关键词:** 东北臭酱; 感官剖面分析; 电子鼻; GC-IMS; 聚类分析

## Odor characteristic discrimination of Northeast Chinese fermented soybean paste based on sensory analysis, electronic nose, and GC-IMS

JI Shenglong<sup>1</sup> LI Meishan<sup>1,2</sup> LI Fenglin<sup>1,2,3</sup> CHEN Fuyu<sup>1,2</sup> WEI Deng<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin, Jilin 132101, China; 2. Jilin Brewing Technology Innovation Center, Jilin, Jilin 132101, China; 3. Jilin Institute of Agricultural Science and Technology "National Food and Nutrition Education Demonstration Base", Jilin, Jilin 132101, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the differences in volatile flavor profiles and discriminate odor characteristics among four kinds of commercially available fermented soybean paste. [Methods] A comprehensive analysis of the differences in volatile flavor profiles and odor characteristics of four types of fermented soybean paste is conducted by sensory profile, electronic nose, and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). [Results] The main volatile organic compounds (VOCs) in the four types of Northeast Chinese fermented soybean paste are esters, acids, aldehydes, ketones, and heterocyclic volatiles such as pyrazines, furans, and pyrroles. Sour and putrid aromas are the core odors contributing to the "pungent odor" of fermented soybean paste. CJ1 exhibits a more intense and irritating "stinky" odor, CJ2 demonstrates a more layered aroma profile, CJ3 shows a more harmonious aroma, and CJ4 has a milder pungent odor with more pronounced, softer, fresh, and floral aromas. Significant differences in odor characteristics are observed among different fermented soybean paste types. [Conclusion] The combination of sensory profile, electronic nose, and GC-IMS can effectively distinguish and discriminate the volatile flavor characteristics of the four commercially available fermented soybean paste types.

**Keywords:** Northeast Chinese fermented soybean paste; sensory profile analysis; electronic nose; GC-IMS; cluster analysis

基金项目: 吉林省教育厅产业化培育项目 (编号: JJKH20231157CYH); 吉林省大学生科技创新项目 (编号: S202311439056)

通信作者: 魏登 (1986—), 男, 吉林农业科技学院副教授, 硕士。E-mail: 584435939@qq.com

陈福玉 (1967—), 男, 吉林农业科技学院副教授, 硕士。E-mail: 195773488@qq.com

收稿日期: 2024-07-02 改回日期: 2025-04-02

引用格式: 汲生泷, 李美善, 李凤林, 等. 基于感官、电子鼻和 GC-IMS 分析的东北臭酱气味特征判别 [J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 44-53.

**Citation:** JI Shenglong, LI Meishan, LI Fenglin, et al. Odor characteristic discrimination of Northeast Chinese fermented soybean paste based on sensory analysis, electronic nose, and GC-IMS [J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 44-53.

东北臭酱以东北地区优质大豆为原料,经人工自然发酵<sup>[1]</sup>,利用发酵过程中的米曲霉、酵母菌和乳酸菌等微生物分解蛋白质和碳水化合物等大分子物质,自然成曲并发酵而成<sup>[2-3]</sup>。臭酱发酵过程中其主要营养物质在微生物各种酶的作用下分解和重组,生成各种活性物质,如蛋白质降解生成的功能性多肽<sup>[4-5]</sup>,蛋白质分解产物中的氨基与还原糖中的羰基发生美拉德反应生成的呋喃、酮类化合物和类黑精素等,使其具有较高的营养价值和生理功效<sup>[6-7]</sup>;同时,经微生物分解重组产生大量的硫化物以及各类呈鲜氨基酸、鲜味肽<sup>[8]</sup>等,共同赋予了东北臭酱特殊的风味,具有显著的地域特色。

臭酱的风味是衡量其品质的关键要素之一,“闻着臭,吃着香”,具有浓烈的异香特质;但目前关于东北臭酱挥发性风味物质的研究报道极少。研究拟利用感官剖面、电子鼻结合气相色谱—离子迁移谱法(GC-IMS)技术对4种市售东北臭酱挥发性风味品质进行全面分析,以期作为东北臭酱的标准化加工、风味调控及消费者选购提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

臭酱1(编号CJ1,产地为黑龙江省)、臭酱2(编号CJ2,产地为吉林省)、臭酱3(编号CJ3,产地为吉林省)、臭酱4(编号CJ4,产地为辽宁省):采用传统古法酿造,市售。

### 1.2 仪 器 与 设 备

电子天平:AL104型,瑞士梅特勒—托利多仪器有限公司;

电子鼻:cNose型,上海保圣实业发展有限公司;

气相色谱—离子迁移谱联用仪:FlavourSpec®型,德国G.A.S公司;

MXT-WAX 色谱柱:30 m×0.53 mm, 1 μm, 美国RESTEK公司;

磁性螺纹口顶空瓶:20 mL,山东海能科学仪器有限公司。

### 1.3 试 验 方 法

1.3.1 试样准备 分取并称量4种臭酱样品各30 mL于50 mL顶空瓶内,每组样品5个平行,各两组,分别进行感官分析和电子鼻检测;分取并称量4种臭酱样品各1 mL于20 mL顶空瓶中,每组3个平行,进行GC-IMS检测。

1.3.2 气味感官剖面分析试验 由50余人对不同市售臭酱样品进行嗅闻并进行气味描述,初步获取最大量的臭酱气味描述词库。再选择20名从事食品感官检验的专业人员组成气味感官评价小组进行气味感官嗅闻并描述,经筛选,保留客观、有代表性的气味描述词,确定最终的臭酱气味感官描述词库<sup>[9-10]</sup>。采用五点标度法对各气味

描述词的感官强度进行打分,以此对4种市售臭酱的气味特征进行静态描述分析<sup>[11-12]</sup>。

1.3.3 电子鼻测定条件 参照蒋涵等<sup>[13]</sup>的方法。电子鼻传感器信息见表1。

表1 传感器对应可响应敏感物质信息

Table 1 Sensors with their corresponding sensitive substances

传感器	可响应敏感物质	传感器	可响应敏感物质
S1	芳香族、烃类化合物	S6	甲基类化合物
S2	含氮氧类化合物	S7	硫化物和萜烯类
S3	氨类、芳香族物质	S8	苯、醛酮类物质
S4	氢化物类	S9	芳香族、硫化氢类
S5	烷烃芳香类物质	S10	烷烃类物质

### 1.3.4 GC-IMS 检测条件

(1) 顶空进样条件:将进样顶空瓶置于托盘中,设置自动顶空进样器孵化温度80℃,时间20 min,孵化振荡转速250 r/min,进样体积100 μL。

(2) GC 条件:色谱柱 Rtx-WAX (30 m×0.53 mm, 1 μm);载气为高纯氮气,初始流速2 mL/min;柱温60℃;进样器温度60℃<sup>[14]</sup>。气相色谱载气梯度洗脱程序:0~2 min, 2 mL/min;2~10 min, 2~10 mL/min;10~20 min, 10~100 mL/min;20~40 min, 100~100 mL/min。

(3) IMS 条件:载气/漂移气 N<sub>2</sub> (纯度99.999%),迁移气流速150 mL/min,迁移管温度45℃,迁移管长5.7 cm。

### 1.4 数 据 处 理 方 法

利用Origin 2021对电子鼻检测数据进行统计分析并绘制雷达图;采用SPSS 2023对GC-IMS相对定量结果的差异性、显著性进行分析,结果以均值±标准偏差表示,共3个平行。用SIMCA 14.1软件对GC-IMS数据进行降维分析;利用基迪奥生信云工具(OmicShare Tools)对关键性变量挥发性有机化合物(VOCs)进行聚类分析。

## 2 结 果 与 分 析

### 2.1 臭 酱 气 味 感 官 剖 面 分 析

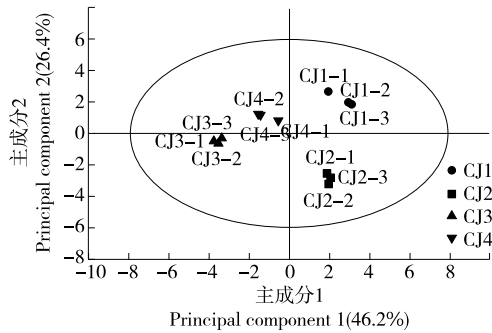
2.1.1 气味感官描述词库的建立 经气味感官评价小组严格研判和筛选,去除差异小、重复性差以及在嗅闻描述中难以达成一致的描述词,最终筛选出评价小组使用频率超过85%的15个气味感官描述词,分别为腐臭、腥臭、汗臭、酸臭、腊臭、铜臭、鲜甜、酸香、丁香、霉腐、酸败、豆腥、酒精、醋酸及咸鲜气味。采用五点标度法对各气味描述词的感官强度进行打分,五点标度法见表2。

2.1.2 气味感官剖面结果分析 根据五点标度法数据结果进行主成分分析(PCA),如图1(a)所示。4种臭酱的散点分布于4个不同象限,表明样品间的气味差异明显。绘

表 2 五点标度对应的中文语义

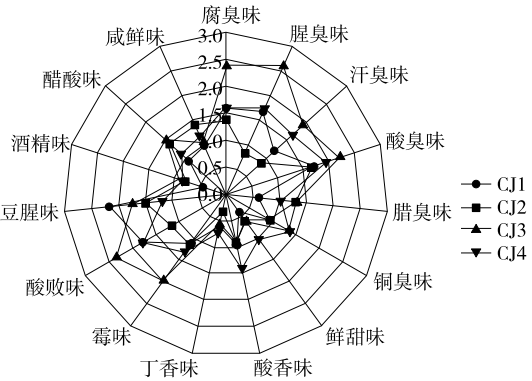
Table 2 Chinese semantics corresponding to the five-point reference scale

标度	1	2	3	4	5
语义	很弱	较弱	中等	较强	很强



(a) PCA得分图

制 4 组样品的气味感官雷达图,如图 1(b)所示。CJ1 的刺激性醋酸味、酸臭味、腊臭味较重;CJ3 豆腥味、酸败味、腥臭味较重, CJ4 和 CJ2 除具有刺激性臭味外,其他气味较融合。4 种臭酱中臭味主要来自发酵过程中的酸腐、酸败、氨臭味等,构成了臭酱特殊的“臭香”气味。



(b) 雷达图

图 1 4 种臭酱气味感官剖面分析的 PCA 得分图和雷达图

Figure 1 PCA score map and radar map of the four types of fermented soybean paste's odor sensory profile

2.2 臭酱电子鼻检测分析

为验证感官剖面分析结果,利用电子鼻检测分析 4 种臭酱样品中的气味物质,并绘制气味雷达图,如图 2 所示。

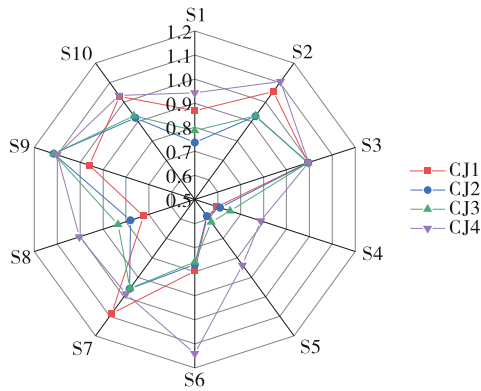


图 2 4 种臭酱电子鼻检测结果的雷达图

Figure 2 Radar map of electronic nose detection results for the four types of fermented soybean paste

由图 2 可知,CJ1 呈现出较浓郁的刺激性气味,在臭酱发酵过程中产生的硫化物、萜烯类以及其他挥发酸类、甲基类物质,可能是其呈现刺激性“酸臭味”的主要物质来源。CJ4 除有较强的刺激性“酸臭味”外,还有较强的清香、花果香等融合气味;CJ2 和 CJ3 刺激性酸臭气味较 CJ1 和 CJ4 的低,伴有融合的芳香、清香等融合气味;电子鼻检

测结果与气味感官剖面分析结果基本一致。

2.3 臭酱的 GC-IMS 检测

2.3.1 4 种臭酱的 GC-IMS 谱图 图 3(a)为不同市售臭酱的 GC-IMS 三维谱图,每一个峰表示一种挥发物,峰越高、体积越大、颜色越深(红),表示该化合物的浓度越高,反之则低。为了更直观地观测不同组样品中的 VOCs 的浓度差异,生成 GC-IMS 指纹谱图,如图 3(b)所示。

由图 3(a)可知,4 种臭酱中多数 VOCs 的体积峰具有明显的差异性。由图 3(b)可知,CJ1 臭酱样品中  $\gamma$ -戊内脂等 30 种 VOCs 浓度较高;CJ2 样品中的丙酸苄酯等 13 种 VOCs 浓度较高;CJ3 样品中甲酸香草酯等 27 种 VOCs 浓度较高;CJ4 样品中 2-乙酰基吡啶等 30 种 VOCs 浓度较高。整体看,4 种臭酱中的绝大多数 VOCs 在种类和浓度上具有明显的差异。

2.3.2 4 种臭酱的 GC-IMS 定性和相对定量分析 利用 GC-IMS 技术从 4 种臭酱样品中共定性出 90 种 VOCs。采用体积归一化法可得各 VOCs 的相对含量,对各 VOCs 相对含量进行差异性、显著性分析,结果见表 3。样品中各类挥发性化合物占挥发性化合物总量的比例见表 4。

由表 3 和表 4 可知,从 4 种臭酱样品中共检测出 90 种 VOCs,包含酯类 20 种,醇类 16 种,挥发酸类 7 种,醛类 15 种,酮类 12 种,硫醚类 2 种,杂环类 11 种,烯萜类 3 种,另有茶香螺烷、三乙烯二胺、1,4-二氯苯、茛 4 种 VOCs。它们共同构成了臭酱特殊的异香风味品质。

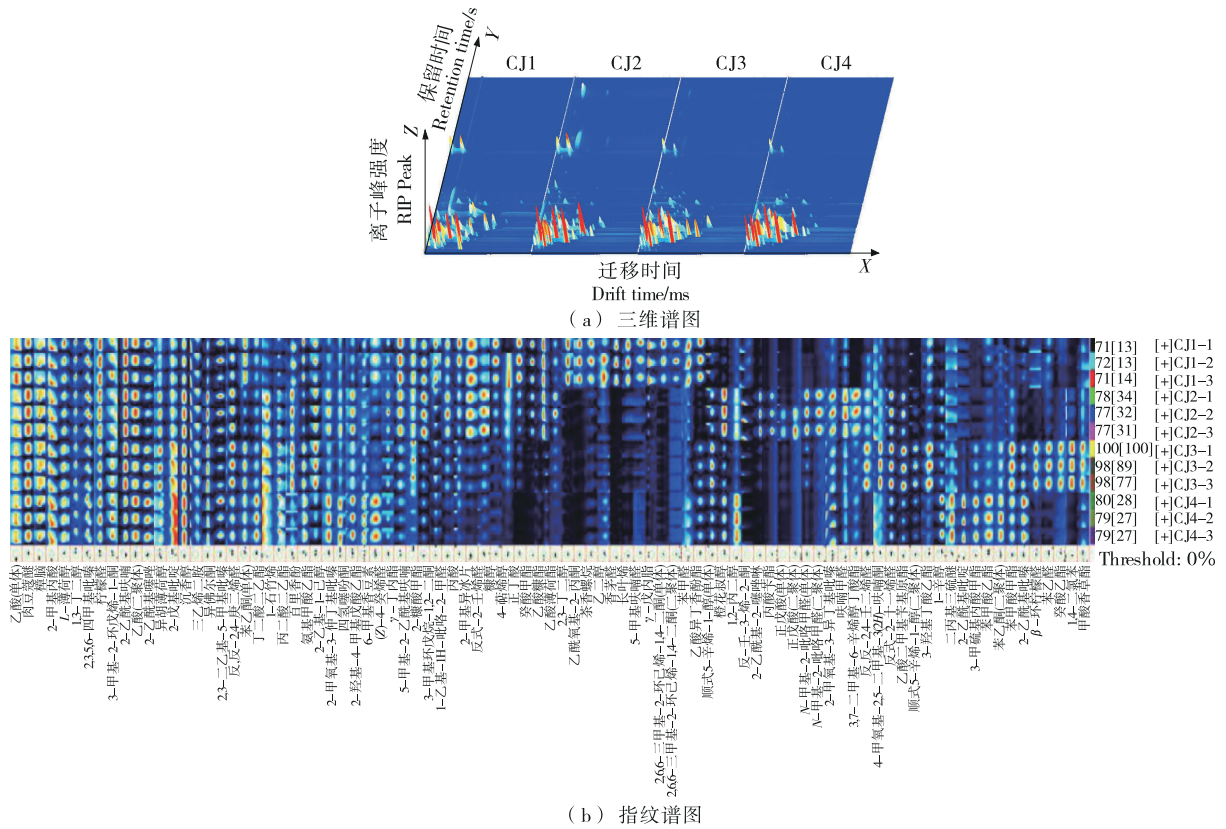


图3 4种臭酱的GC-IMS三维谱图和指纹谱图

Figure 3 GC-IMS three-dimensional spectra and fingerprint spectra of the four types of fermented soybean paste

表3 4种臭酱的GC-IMS定性和相对定量结果<sup>†</sup>

Table 3 Qualitative and relative quantitative results of GC-IMS for the four types of fermented soybean paste

类别	VOCs 名称	保留 时间/s	迁移间 (RIPrel)	归一化后相对含量/%				气味特征
				CJ1	CJ2	CJ3	CJ4	
酯类	丙酸苜酯	1 871.471	1.385 14	1.999±0.022 <sup>b</sup>	3.211±0.307 <sup>a</sup>	2.252±0.040 <sup>b</sup>	2.302±0.062 <sup>b</sup>	茉莉花香
	丁二酸二乙酯	756.351	1.309 15	0.387±0.067 <sup>c</sup>	0.266±0.011 <sup>d</sup>	0.461±0.008 <sup>b</sup>	0.715±0.006 <sup>a</sup>	愉快的气味
	苯甲酸乙酯	756.130	1.721 87	0.077±0.013 <sup>b</sup>	0.046±0.004 <sup>c</sup>	0.083±0.000 <sup>b</sup>	0.216±0.008 <sup>a</sup>	冬青油及水果香
	γ-丁内酯	680.506	1.092 83	0.367±0.024 <sup>c</sup>	0.378±0.034 <sup>c</sup>	0.623±0.019 <sup>a</sup>	0.576±0.014 <sup>b</sup>	奶、奶油香
	甲酸香草酯	660.658	1.334 27	0.148±0.004 <sup>b</sup>	0.110±0.011 <sup>c</sup>	0.295±0.006 <sup>a</sup>	0.143±0.005 <sup>b</sup>	玫瑰及甜瓜香
	癸酸乙酯	650.041	1.626 17	0.056±0.006 <sup>c</sup>	0.040±0.001 <sup>d</sup>	0.168±0.002 <sup>a</sup>	0.068±0.007 <sup>b</sup>	葡萄酒香
	γ-戊内酯	581.268	1.394 27	8.468±0.266 <sup>a</sup>	2.269±0.261 <sup>c</sup>	2.774±0.087 <sup>b</sup>	2.206±0.086 <sup>c</sup>	可可、木材、甜香
	氨基甲酸乙酯	523.950	1.104 77	1.092±0.116 <sup>c</sup>	0.580±0.021 <sup>d</sup>	1.654±0.026 <sup>b</sup>	2.156±0.066 <sup>a</sup>	
	苯甲酸甲酯	499.130	1.210 61	0.189±0.022 <sup>d</sup>	0.279±0.015 <sup>c</sup>	0.752±0.030 <sup>a</sup>	0.542±0.032 <sup>b</sup>	芳香
	乙酸糠酯	457.217	1.619 46	1.708±0.203 <sup>a</sup>	1.073±0.107 <sup>b</sup>	0.467±0.011 <sup>c</sup>	0.381±0.061 <sup>c</sup>	果香
	乙酸二甲基苜基原酯	429.435	1.654 66	0.312±0.046 <sup>d</sup>	0.726±0.122 <sup>c</sup>	1.671±0.055 <sup>a</sup>	0.953±0.052 <sup>b</sup>	茉莉花香
	丙二酸二乙酯	413.786	1.264 20	2.501±0.137 <sup>d</sup>	2.935±0.097 <sup>c</sup>	4.996±0.029 <sup>b</sup>	6.592±0.212 <sup>a</sup>	甜香
	3-羟基丁酸乙酯	1 252.286	1.160 30	0.595±0.014 <sup>b</sup>	0.260±0.014 <sup>d</sup>	0.901±0.008 <sup>a</sup>	0.373±0.034 <sup>c</sup>	果、白酒香
	癸酸甲酯	411.287	1.568 59	2.564±0.077 <sup>d</sup>	0.864±0.117 <sup>c</sup>	0.589±0.017 <sup>b</sup>	0.142±0.005 <sup>a</sup>	
	2-糠酸甲酯	395.811	1.147 76	0.669±0.041 <sup>a</sup>	0.445±0.035 <sup>b</sup>	0.666±0.010 <sup>a</sup>	0.159±0.007 <sup>c</sup>	果香, 蘑菇、菌香
	3-甲硫苜基丙酸甲酯	355.595	1.597 74	0.079±0.004 <sup>d</sup>	0.247±0.005 <sup>c</sup>	0.557±0.010 <sup>b</sup>	0.883±0.076 <sup>a</sup>	菠萝香
2-羟基-4-甲基戊酸乙酯	337.955	1.314 19	0.348±0.014 <sup>c</sup>	0.478±0.016 <sup>b</sup>	0.474±0.012 <sup>b</sup>	0.533±0.017 <sup>a</sup>	黑莓香气	



续表 3

类别	VOCs 名称	保留 时间/s	迁移间 (RIPrel)	归一化后相对含量/%				气味特征
				CJ1	CJ2	CJ3	CJ4	
酯类	3,7-二甲基-6-辛烯醇 丁酸酯	341.419	1.523 29	0.009±0.001 <sup>d</sup>	0.133±0.016 <sup>a</sup>	0.065±0.005 <sup>c</sup>	0.086±0.006 <sup>b</sup>	
	乙酸异丁香酚酯	554.172	1.420 40	2.272±0.080 <sup>a</sup>	0.209±0.017 <sup>d</sup>	1.128±0.013 <sup>c</sup>	1.359±0.054 <sup>b</sup>	火烧味
	乙酸薄荷酯	457.891	1.245 03	1.273±0.075 <sup>a</sup>	0.914±0.061 <sup>b</sup>	0.235±0.014 <sup>c</sup>	0.250±0.016 <sup>c</sup>	薄荷香
醇类	L-薄荷醇	689.608	1.241 34	1.449±0.088 <sup>c</sup>	1.019±0.008 <sup>d</sup>	1.837±0.019 <sup>b</sup>	2.102±0.089 <sup>a</sup>	薄荷香
	乙二醇	505.687	1.170 01	0.515±0.013 <sup>a</sup>	0.168±0.009 <sup>d</sup>	0.225±0.013 <sup>c</sup>	0.249±0.010 <sup>b</sup>	甜香
	糠醇	487.016	1.359 91	0.306±0.028 <sup>b</sup>	0.373±0.011 <sup>a</sup>	0.179±0.017 <sup>c</sup>	0.122±0.030 <sup>d</sup>	焦糖、烤面包香
	4-萜烯醇	487.258	1.727 41	0.441±0.043 <sup>a</sup>	0.222±0.009 <sup>b</sup>	0.170±0.004 <sup>c</sup>	0.166±0.007 <sup>c</sup>	木质香
	2,3-丁二醇	499.372	1.355 31	0.219±0.027 <sup>ab</sup>	0.269±0.075 <sup>a</sup>	0.157±0.006 <sup>bc</sup>	0.082±0.004 <sup>c</sup>	奶香
	顺式 5-辛烯-1-醇(单体)	444.375	1.266 12	0.636±0.054 <sup>d</sup>	0.739±0.062 <sup>c</sup>	1.179±0.034 <sup>a</sup>	0.921±0.057 <sup>b</sup>	甜瓜、西瓜香
	顺式 5-辛烯-1-醇(二 聚体)	445.205	1.654 66	0.206±0.032 <sup>c</sup>	0.238±0.033 <sup>c</sup>	0.636±0.005 <sup>a</sup>	0.326±0.033 <sup>b</sup>	甜瓜、西瓜香
	1,3-丁二醇	421.286	1.113 51	1.340±0.076 <sup>a</sup>	0.976±0.049 <sup>c</sup>	1.131±0.009 <sup>b</sup>	1.087±0.053 <sup>b</sup>	苦甜香
	异胡薄荷醇	410.974	1.387 76	1.263±0.070 <sup>c</sup>	1.096±0.018 <sup>d</sup>	1.687±0.032 <sup>b</sup>	1.804±0.029 <sup>a</sup>	樟脑、薄荷气味
	1,2-丙二醇	366.845	1.131 53	0.476±0.044 <sup>c</sup>	0.631±0.046 <sup>b</sup>	0.495±0.014 <sup>c</sup>	1.251±0.078 <sup>a</sup>	
	橙花叔醇	346.781	1.483 03	0.655±0.145 <sup>d</sup>	4.329±0.104 <sup>a</sup>	1.828±0.046 <sup>c</sup>	3.209±0.055 <sup>b</sup>	玫瑰花、苹果香
	1-辛醇	330.626	1.456 14	0.176±0.019 <sup>d</sup>	0.407±0.049 <sup>c</sup>	0.534±0.002 <sup>b</sup>	1.053±0.027 <sup>a</sup>	油脂气味
	沉香醇	292.715	1.248 68	2.495±0.066 <sup>d</sup>	2.897±0.074 <sup>c</sup>	3.510±0.032 <sup>b</sup>	4.794±0.098 <sup>a</sup>	兰花香
	2-乙基-1-己醇	297.632	1.403 33	0.656±0.083 <sup>b</sup>	0.569±0.029 <sup>b</sup>	1.023±0.022 <sup>a</sup>	0.559±0.043 <sup>b</sup>	刺激性芳香
	2-甲基异冰片	474.418	1.263 44	0.720±0.179 <sup>a</sup>	0.444±0.071 <sup>b</sup>	0.644±0.043 <sup>ab</sup>	0.453±0.072 <sup>b</sup>	薄荷香
	百里香酚	382.604	1.275 52	0.314±0.021 <sup>c</sup>	0.263±0.015 <sup>d</sup>	0.454±0.008 <sup>a</sup>	0.397±0.008 <sup>b</sup>	百里油香
	酸类	正戊酸(单体)	1 385.116	1.221 04	2.977±0.283 <sup>c</sup>	13.383±0.953 <sup>a</sup>	5.382±0.438 <sup>b</sup>	4.062±0.709 <sup>c</sup>
正戊酸(二聚体)		1 385.116	1.491 31	1.524±0.112 <sup>c</sup>	2.756±0.100 <sup>a</sup>	1.761±0.051 <sup>b</sup>	1.803±0.086 <sup>b</sup>	脂香、椰子香
正丁酸		804.647	1.165 88	0.560±0.089 <sup>a</sup>	0.402±0.018 <sup>b</sup>	0.345±0.021 <sup>b</sup>	0.076±0.010 <sup>c</sup>	刺激性难闻气味
丙酸		498.887	1.095 76	0.341±0.061 <sup>a</sup>	0.410±0.043 <sup>a</sup>	0.347±0.002 <sup>a</sup>	0.199±0.023 <sup>b</sup>	酸败、辛辣气味
2-甲基丙酸		314.096	1.162 26	6.775±0.309 <sup>b</sup>	5.565±0.091 <sup>c</sup>	7.115±0.051 <sup>b</sup>	8.226±0.188 <sup>a</sup>	刺激性气味
乙酸(单体)		235.609	1.056 44	1.060±0.043 <sup>a</sup>	0.801±0.036 <sup>b</sup>	0.946±0.024 <sup>a</sup>	1.042±0.104 <sup>a</sup>	酸香
乙酸(二聚体)		237.350	1.146 73	1.733±0.302 <sup>bc</sup>	1.592±0.093 <sup>c</sup>	1.950±0.083 <sup>b</sup>	2.293±0.097 <sup>a</sup>	酸香
醛类	柠檬醛	1 253.516	1.064 29	7.580±0.261 <sup>a</sup>	5.592±0.156 <sup>c</sup>	6.413±0.039 <sup>b</sup>	6.885±0.457 <sup>b</sup>	柠檬香
	N-甲基-2-吡咯甲醛 (单体)	861.547	1.119 26	0.107±0.005 <sup>d</sup>	0.973±0.025 <sup>a</sup>	0.548±0.011 <sup>b</sup>	0.184±0.007 <sup>c</sup>	
	N-甲基-2-吡咯甲醛(二 聚体)	863.208	1.497 44	0.077±0.002 <sup>c</sup>	0.225±0.007 <sup>a</sup>	0.096±0.003 <sup>b</sup>	0.095±0.003 <sup>b</sup>	
	反,反-2,4-壬二烯醛	806.309	1.339 43	0.131±0.011 <sup>c</sup>	0.186±0.016 <sup>b</sup>	0.330±0.003 <sup>a</sup>	0.067±0.005 <sup>d</sup>	油脂气味
	苯乙醛	649.840	1.265 44	0.182±0.013 <sup>b</sup>	0.097±0.010 <sup>c</sup>	0.446±0.005 <sup>a</sup>	0.107±0.003 <sup>c</sup>	水果甜香
	1-乙基-1H-吡咯-2-甲醛	570.961	1.184 72	0.865±0.037 <sup>a</sup>	0.323±0.034 <sup>c</sup>	0.406±0.019 <sup>b</sup>	0.343±0.005 <sup>c</sup>	
	β-环柠檬醛	595.733	1.322 58	0.183±0.006 <sup>b</sup>	0.068±0.002 <sup>d</sup>	0.466±0.020 <sup>a</sup>	0.120±0.002 <sup>c</sup>	薄荷香
	5-甲基呋喃醛	506.304	1.132 48	0.423±0.050 <sup>a</sup>	0.149±0.009 <sup>b</sup>	0.189±0.006 <sup>b</sup>	0.173±0.007 <sup>b</sup>	青草香
	反式-2-壬烯醛	486.047	1.398 95	0.697±0.022 <sup>a</sup>	0.474±0.020 <sup>b</sup>	0.164±0.015 <sup>c</sup>	0.084±0.024 <sup>d</sup>	腊香、脂肪香
	苯甲醛	380.803	1.131 53	0.432±0.011 <sup>a</sup>	0.151±0.013 <sup>c</sup>	0.226±0.001 <sup>b</sup>	0.243±0.007 <sup>b</sup>	坚果香
	(Z)-4-癸烯醛	378.551	1.337 41	0.113±0.007 <sup>b</sup>	0.048±0.002 <sup>c</sup>	0.050±0.002 <sup>c</sup>	0.174±0.001 <sup>a</sup>	脂肪香
呋喃甲醛	223.560	1.091 78	0.421±0.059 <sup>c</sup>	0.812±0.089 <sup>a</sup>	0.593±0.023 <sup>b</sup>	0.601±0.055 <sup>b</sup>		

续表 3

类别	VOCs 名称	保留 时间/s	迁移间 (RIPrel)	归一化后相对含量/%				气味特征
				CJ1	CJ2	CJ3	CJ4	
醛类	反,反-2,4-庚二烯醛	253.305	1.195 99	0.717±0.010 <sup>d</sup>	0.768±0.015 <sup>c</sup>	1.210±0.023 <sup>a</sup>	0.896±0.019 <sup>b</sup>	青香
	香茅醛	207.362	1.357 02	1.533±0.075 <sup>a</sup>	0.099±0.009 <sup>b</sup>	0.122±0.004 <sup>b</sup>	0.123±0.005 <sup>b</sup>	蜂花香
	反式-2-十一烯醛	338.093	1.563 76	0.324±0.037 <sup>d</sup>	1.381±0.172 <sup>b</sup>	1.857±0.058 <sup>a</sup>	1.176±0.081 <sup>c</sup>	辛辣、腐臭气味
酮类	2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮(单体)	701.961	1.340 35	0.833±0.152 <sup>a</sup>	0.102±0.007 <sup>b</sup>	0.109±0.007 <sup>b</sup>	0.146±0.004 <sup>b</sup>	果香、花香
	2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮(二聚体)	701.961	1.824 79	1.048±0.117 <sup>a</sup>	0.493±0.020 <sup>c</sup>	0.824±0.040 <sup>b</sup>	1.081±0.033 <sup>a</sup>	果香、花香
	3-甲基环戊烷-1,2-二酮	252.286	1.160 30	5.847±0.518 <sup>a</sup>	5.936±0.235 <sup>a</sup>	2.846±0.155 <sup>b</sup>	2.538±0.012 <sup>b</sup>	焦糖香
	苯乙酮(单体)	551.072	1.187 48	1.714±0.060 <sup>a</sup>	0.530±0.046 <sup>c</sup>	1.492±0.005 <sup>b</sup>	1.413±0.036 <sup>b</sup>	山楂气味
	苯乙酮(二聚体)	551.433	1.573 48	0.297±0.026 <sup>c</sup>	0.105±0.003 <sup>d</sup>	0.369±0.008 <sup>b</sup>	0.583±0.056 <sup>a</sup>	山楂气味
	四氢噻吩酮	385.005	1.185 86	0.510±0.040 <sup>b</sup>	0.405±0.063 <sup>c</sup>	0.472±0.006 <sup>bc</sup>	0.973±0.044 <sup>a</sup>	臭味
	异佛尔酮	430.265	1.249 23	0.668±0.068 <sup>d</sup>	1.034±0.066 <sup>c</sup>	1.563±0.014 <sup>a</sup>	1.233±0.021 <sup>b</sup>	薄荷气味
	反式-壬-3-烯-2-酮	288.864	1.367 82	0.340±0.032 <sup>a</sup>	0.255±0.014 <sup>b</sup>	0.112±0.016 <sup>c</sup>	0.094±0.003 <sup>c</sup>	辛辣,甘草气味
	4-甲氧基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	337.590	1.198 36	0.248±0.026 <sup>b</sup>	0.155±0.015 <sup>c</sup>	0.348±0.005 <sup>a</sup>	0.257±0.025 <sup>b</sup>	
	3-甲基-2-环戊烯-1-酮	276.810	1.101 34	0.436±0.013 <sup>c</sup>	0.339±0.012 <sup>d</sup>	0.495±0.006 <sup>b</sup>	0.527±0.012 <sup>a</sup>	薄荷香
	乙酰氧基-2-丙酮	209.280	1.190 41	0.822±0.034 <sup>a</sup>	0.061±0.015 <sup>b</sup>	0.091±0.008 <sup>b</sup>	0.058±0.005 <sup>b</sup>	刺激性气味
	6-甲基香豆素	347.436	1.275 44	0.510±0.014 <sup>b</sup>	0.264±0.034 <sup>d</sup>	0.442±0.017 <sup>c</sup>	0.732±0.047 <sup>a</sup>	草药香、大枣香
	醚硫类	二丙基三硫醚	357.539	1.332 84	0.241±0.025 <sup>c</sup>	0.222±0.029 <sup>c</sup>	0.336±0.019 <sup>b</sup>	0.560±0.016 <sup>a</sup>
肉豆蔻醚		280.586	1.340 98	3.340±0.164 <sup>c</sup>	3.487±0.054 <sup>c</sup>	3.957±0.051 <sup>b</sup>	4.164±0.051 <sup>a</sup>	辛香
杂环类	2-乙酰基吡啶	458.070	1.122 53	0.680±0.055 <sup>b</sup>	0.474±0.021 <sup>c</sup>	0.353±0.009 <sup>c</sup>	1.366±0.172 <sup>a</sup>	米香
	2-戊基吡啶	395.661	1.324 83	1.573±0.022 <sup>c</sup>	1.331±0.039 <sup>d</sup>	2.532±0.002 <sup>a</sup>	2.453±0.053 <sup>b</sup>	小牛肉气味
	2-甲氧基-3-仲丁基吡啶	331.345	1.261 99	0.199±0.026 <sup>d</sup>	0.395±0.015 <sup>b</sup>	0.306±0.005 <sup>c</sup>	0.764±0.058 <sup>a</sup>	清香
	2,3,5,6-四甲基吡啶	241.991	1.204 93	0.495±0.050 <sup>b</sup>	0.421±0.024 <sup>c</sup>	0.479±0.018 <sup>bc</sup>	0.605±0.042 <sup>a</sup>	牛肉和猪脂加热香
	2,3-二乙基-5-甲基吡啶	242.240	1.281 52	0.300±0.033 <sup>b</sup>	0.243±0.018 <sup>b</sup>	0.250±0.011 <sup>b</sup>	0.376±0.053 <sup>a</sup>	咖啡和果仁香
	2-甲氧基-3-异丁基吡啶	287.557	1.298 80	0.076±0.009 <sup>d</sup>	0.192±0.010 <sup>c</sup>	0.214±0.003 <sup>b</sup>	0.259±0.003 <sup>a</sup>	芹菜气味
	2-乙酰基吡啶	523.314	1.210 12	0.462±0.039 <sup>c</sup>	0.162±0.019 <sup>d</sup>	0.925±0.034 <sup>b</sup>	1.546±0.115 <sup>a</sup>	爆米花香
	5-甲基-2-乙酰基呋喃	486.532	1.171 56	1.175±0.099 <sup>a</sup>	0.878±0.013 <sup>b</sup>	0.837±0.019 <sup>b</sup>	0.596±0.005 <sup>c</sup>	发霉气味
	2-乙酰基呋喃	246.165	1.118 60	3.548±0.124 <sup>a</sup>	2.830±0.010 <sup>b</sup>	3.671±0.021 <sup>a</sup>	2.730±0.058 <sup>b</sup>	果香
	2-乙酰基噻唑	688.308	1.488 87	0.879±0.012 <sup>c</sup>	0.514±0.010 <sup>d</sup>	0.943±0.011 <sup>b</sup>	1.181±0.022 <sup>a</sup>	面包香
2-乙酰基-2-噻唑啉	1 888.536	1.153 47	2.002±0.213 <sup>c</sup>	8.820±0.642 <sup>a</sup>	3.228±0.110 <sup>b</sup>	1.443±0.039 <sup>c</sup>	草药、草香	
烯萜类	1-石竹烯	392.809	1.424 34	0.363±0.022 <sup>d</sup>	0.595±0.045 <sup>c</sup>	0.884±0.025 <sup>a</sup>	0.826±0.008 <sup>b</sup>	丁香香
	长叶烯	356.642	1.433 76	1.728±0.153 <sup>a</sup>	0.518±0.121 <sup>b</sup>	0.272±0.027 <sup>c</sup>	0.229±0.008 <sup>c</sup>	木香
	樟脑	299.984	1.344 20	1.874±0.120 <sup>b</sup>	1.684±0.058 <sup>c</sup>	2.405±0.050 <sup>a</sup>	1.927±0.056 <sup>b</sup>	刺激性芳香
其他	茶香螺烷	285.524	1.410 00	0.384±0.028 <sup>a</sup>	0.095±0.005 <sup>b</sup>	0.098±0.004 <sup>b</sup>	0.120±0.002 <sup>b</sup>	红茶芳香
	三乙烯二胺	250.827	1.157 91	1.030±0.008 <sup>b</sup>	0.904±0.004 <sup>c</sup>	1.213±0.022 <sup>a</sup>	0.896±0.019 <sup>c</sup>	氨味
	1,4-二氯苯	222.515	1.127 13	0.044±0.013 <sup>d</sup>	0.145±0.018 <sup>b</sup>	0.424±0.021 <sup>a</sup>	0.087±0.008 <sup>c</sup>	樟脑气味
	茛	204.676	1.122 92	0.600±0.007 <sup>a</sup>	0.049±0.003 <sup>bc</sup>	0.048±0.001 <sup>c</sup>	0.055±0.001 <sup>b</sup>	芳香气味

† 同行字母不同表示差异性( $P<0.05$ )。

表 4 4 种臭酱样品中各类挥发性化合物占挥发性化合物总量的比例

Table 4 Relative content values of total volatile compounds in samples of the four types of fermented soybean paste

类别	数量(种)	占比/%			
		CJ1	CJ2	CJ3	CJ4
酯类	20	25.113	15.463	20.811	20.635
醇类	16	11.867	14.640	15.689	18.575
酸类	7	14.970	24.909	17.846	17.701
醛类	15	13.785	11.346	13.116	11.271
酮类	12	13.273	9.679	9.163	9.635
醚硫类	2	3.581	3.709	4.293	4.724
杂环类	11	11.389	16.260	13.738	13.319
烯萜类	3	3.965	2.797	3.561	2.982
其他类	4	2.058	1.193	1.783	1.158

酯类挥发性化合物是形成大酱气味的主体成分,大部分酯类化合物的气味阈值较低,对臭酱的挥发性风味影响很大<sup>[15-16]</sup>。豆酱中的酯类化合物主要是由酱发酵过程中产生的酸与醇经酯化反应形成<sup>[17]</sup>,多数具有果香和花香,形成嗅觉上的层次感。酯类挥发物在 CJ1 样品中相对含量最高,其次为 CJ3,相对含量较低的是 CJ4 和 CJ2,表明 CJ1 中的酯类气味更醇厚。

醇类挥发物在豆酱中相对含量较高,但多数醇类挥发物的阈值高,对豆酱的气味影响不大,主要作为合成酯类的前体物质而影响豆酱的香气<sup>[18]</sup>,赋予臭酱柔和的花香、果香余韵,部分不饱和醇具有蘑菇和金属气味。醇类挥发物在 CJ4 中相对含量为 18.575%,其次是 CJ3,在 CJ2 和 CJ1 中的相对含量较低。

酸类物质是大酱挥发性风味的重要组成部分,阈值较低,对大酱风味影响较大。一般情况下,酸类挥发物具有刺激性气味,会对食品的气味品质产生负面影响<sup>[19-20]</sup>。但臭酱除外,酸类挥发物使大酱呈现出发酵的特殊酸腐气味,且与酯类一起构成臭酱异香并伴有微臭的独特气味,同时还具有果味、芝士味、脂肪味。酸类挥发物在 CJ2 中相对含量最高,在 CJ1 中相对含量最低,在 CJ3 和 CJ4 中相对含量接近,因而 CJ2 在酸臭气味上表现较突出。

大多数醛类挥发物阈值较低,对臭酱的挥发性风味品质影响较大,主要呈现青草、果实、坚果、脂肪及花香气味,香气浓郁<sup>[21]</sup>。醛类化合物在 4 种臭酱中的相对含量差异不大。大多数酮类化合物由不饱和和脂肪酸氧化或降解、氨基酸降解或微生物氧化产生,其性质稳定,具有水果香、奶香等令人愉快的气味<sup>[22]</sup>。酮类化合物在 CJ1 中

相对含量最高,在其他 3 种臭酱中相对含量接近。

烷烃和烯烃类化合物多数由脂肪酸的自氧化生成,通常认为不具有气味活性,故对臭酱整体风味贡献不大<sup>[23]</sup>。多数烯烃类化合物阈值较低,带有果香味,因而能丰富臭酱的挥发性风味,增加其层次感。

臭酱中的杂环类挥发物是由大豆经高温蒸煮产生,阈值较低,一般认为其在食品的风味中有重要贡献作用<sup>[24]</sup>;吡嗪类、呋喃类和吡咯类等杂环类呈现烘烤香、坚果香和甜香<sup>[25]</sup>。杂环类挥发物在 CJ1 中含量最低,整体上与 CJ3 和 CJ4 相差较小;CJ2 中杂环类挥发物相对含量较其他 3 种臭酱相对含量最高。

2.3.3 4 种臭酱挥发物的 OPLS-DA 分析 OPLS-DA 模型是一种有监督的分析统计方法,被广泛应用于代谢组学或化学代谢物中的特征性变量筛选<sup>[26]</sup>。建立 4 种市售臭酱样品中的挥发物 OPLS-DA 模型, $R^2X=0.949$ , $R^2Y=0.998$ , $Q^2=0.995$ ,表明该模型拟合程度高。由图 4(a)可知,4 种臭酱样品分别分布在不同象限,样品组间均有明显差异,表明 4 种臭酱在挥发性风味上具有差异性。

经 200 次响应的置换检验验证 OPLS-DA 模型的质量,结果见图 4(b), $R^2=0.273$ , $Q^2=-1.14$ ,截距为负值,未出现拟合现象,表明该模型稳定,有较好的预测能力。

通过计算变量重要性因子(variable important for the projection, VIP),并量化每个变量对分类的贡献值,共筛选出 21 种关键特征变量挥发物(VIP>1),如图 4(c)所示。其中酯类 6 种、醇类 4 种、醛类 6 种、酮类 2 种、杂环类 2 种及 1,4-二氯苯。上述 21 种特征变量 VOCs 可作为区分 4 组市售臭酱样品的关键挥发物。

2.3.4 4 种臭酱特征性挥发物的聚类分析 以 21 种特征 VOCs 的相对含量绘制动态聚类热图,如图 5 所示。4 种臭酱中的关键特征 VOCs 呈现出较好的类聚;CJ1 中苯乙酮(单体)VOCs 的浓度显著高于其他 3 种臭酱,呈现出较浓郁的酸腐、酸臭等刺激性气味,并伴有一定的山楂气味。CJ2 中橙花叔醇等 7 种 VOCs 浓度较高,除呈现出较浓郁的酸腐、酸臭等刺激性气味外,还有丰富的玫瑰花、苹果香、茉莉香。CJ4 中 2-甲氧基-3-仲丁基吡嗪等 3 种 VOCs 浓度较高,呈现出较浓的酸腐、酸香和令人愉悦的芳香,同时伴有脂肪香和花果香,整体气味更为协调、丰富。CJ3 中的 4-甲氧基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮等 10 种 VOCs 浓度显著高于其他 3 种臭酱,但刺激性气味稍轻,伴有辛香、瓜果香、刺激性芳香及奶香。

聚类分析结果表明,4 种臭酱中刺激性的酸香、酸腐香是构成臭酱“闻着臭”的核心气味。CJ1 的刺激性“臭味”更突出,层次感强;CJ2 除具有较强的刺激性“臭味”

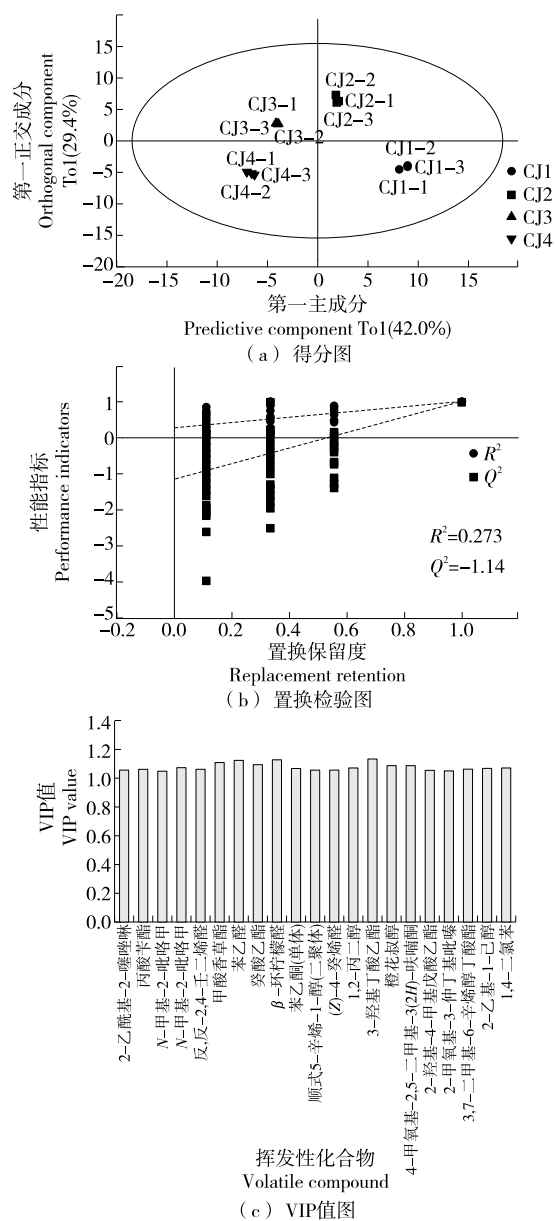


图4 OPLS-DA得分图、置换检验图和VIP值图  
Figure 4 OPLS-DA score plot, permutation test plot, and VIP value plot

外,还具有较强的清凉薄荷、脂香和花果香等刺激性气味,整体更丰富、全面和协调;CJ3的刺激性臭味较轻,清香和芳香味重且柔和。CJ4的刺激性“臭味”也较轻,伴有一定程度的花果香、豆香、芳香、清香,气味较融合。

### 3 结论

东北臭酱的典型风味特征为“闻着臭,吃着香”。通过感官剖面分析结合电子鼻和气相色谱—离子迁移谱法检测分析,可全面揭示东北臭酱的挥发性风味特征及构成,3种分析方法结果能够相互印证。4种市售臭酱均具

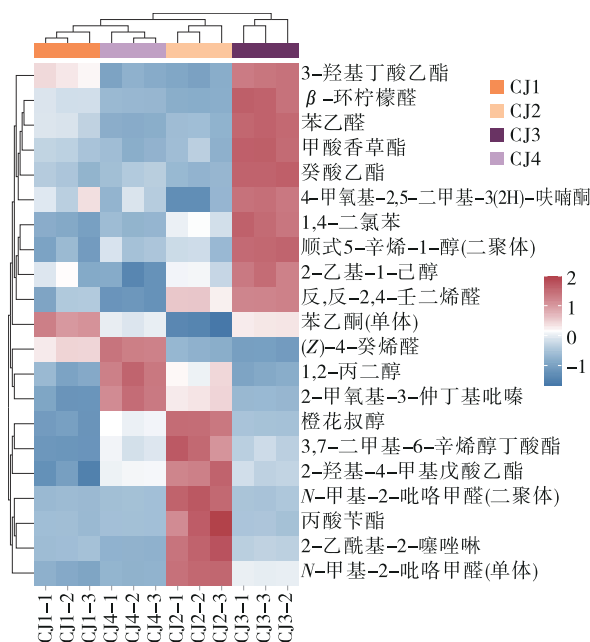


图5 4种臭酱关键差异性特征挥发物分布的聚类热图  
Figure 5 Cluster heat map of volatile compounds distribution of key differential characteristics in the four types of fermented soybean paste

有独特的风味品质,其中酸腐、酸败、氨臭是构成臭酱“臭香”的核心气味;利用气相色谱—离子迁移谱法共检测出90种挥发性有机化合物,建立质量稳定、预测能力较高的OPLS-DA模型,筛选关键特征性变量挥发性有机化合物并经聚类分析,可全面、有效地判别4种市售臭酱的差异性挥发物及气味特征。感官分析具有不可替代的人类体验维度,智能感官具有客观性和精准量化的特点,该研究将二者结合,相较于利用单一方法对酱制品进行风味研究,具有一定的真实性、全面性和科学性;该研究因重点分析比较不同市售臭酱风味特征,因此未对各样品中的挥发物进行精确的定性定量分析研究。同时,由于东北臭酱的风味形成受多种因素的影响,其中,发酵过程中微生物群落的多样性及其代谢活动与风味物质形成之间的内在关联机制,是深入理解其风味形成机理的关键。因此,采用多组学分析技术系统解析东北臭酱发酵过程中微生物群落结构与功能演替规律,以及关键风味物质的生物合成途径,将有助于从分子水平阐明东北臭酱的风味形成机制,为其标准化加工工艺的建立、风味品质的定向调控以及产业化生产的提质增效提供理论依据。

### 参考文献

[1] 郝宇,孙波,张宇,等. 高效液相色谱法测定东北农家酱中的5种生物胺[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 343-349.



- HAO Y, SUN B, ZHANG Y, et al. Determination of five biogenic amines in Northeast Farmhouse soybean paste by high performance liquid chromatography[J]. Food Science, 2019, 40(16): 343-349.
- [2] 桑梓晴, 谢强, 裴志亮, 等. 甜面酱发酵过程中微生物多样性及其与风味形成关系的研究进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(2): 192-198.
- SANG Z Q, XIE Q, PEI Z L, et al. Research progress on microbial diversity and its relationship with flavor formation during fermentation of sweet noodle soybean paste[J]. China Condiment, 2024, 49(2): 192-198.
- [3] 廖一漠, 敖晓琳, 康海燕, 等. 传统发酵食品中乳酸菌与酵母菌相互作用机制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(3): 340-346.
- LIAO Y M, AO X L, KANG H Y, et al. Research progress on the interaction mechanism between lactic acid bacteria and yeast in traditional fermented foods[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(3): 340-346.
- [4] 续丹丹, 王文平, 王鹏, 等. 黑豆酱与黄豆酱品质分析及挥发性风味化合物比较[J]. 中国酿造, 2018, 37(11): 30-35.
- XU D D, WANG W P, WANG P, et al. Comparison and analysis of quality and volatile compounds of black bean paste and soybean paste[J]. China Brewing, 2018, 37(11): 30-35.
- [5] 李传凤, 杨安琦, 王明成. 传统豆酱自然发酵的过程中微生物多样性及理化性质分析[J]. 中国调味品, 2022, 47(9): 50-52, 62.
- LI C F, YANG A Q, WANG M C. Analysis of microbial diversity and physicochemical properties during natural fermentation of traditional soybean paste[J]. China Condiment, 2022, 47(9): 50-52, 62.
- [6] 金仓, 黄小强. 黄豆酱挥发性成分形成特征及活性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(5): 175-178.
- JIN C, HUANG X Q. Study on the formation characteristics and activity of volatile components in soybean paste[J]. China Condiment, 2023, 48(5): 175-178.
- [7] 金曼芹, 罗丹, 薛文通. 豆酱的风味物质及微生物多样性的研究进展[J]. 中国酿造, 2023, 42(11): 1-8.
- JIN M Q, LUO D, XUE W T. Research progress of flavor components and microbial diversity in soybean paste[J]. China Brewing, 2023, 42(11): 1-8.
- [8] 安飞宇, 姜静, 武俊瑞, 等. 自然发酵豆酱的滋味特性与微生物多样性分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(7): 207-215.
- AN F Y, JIANG J, WU J R, et al. Analysis of taste characteristics and microbial diversity of naturally fermented soybean paste[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(7): 207-215.
- [9] 谢成城, 陈佳敏, 曹仲文. 基于感官剖面分析法、熵权法和灰色关联度法的扬州兰花干品质评价[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 198-203.
- XIE C C, CHEN J M, CAO Z W. Quality evaluation of different varieties of Yangzhou orchid dry based on sensory profile analysis, entropy weight method and grey interconnect degree analysis[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 198-203.
- [10] 朱艳, 胡腾飞, 黄甜, 等. 茯砖茶感官特征定量描述与风味轮构建[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(9): 1-9.
- ZHU Y, HU T F, HUANG T, et al. Sensory characteristics of Fu brick tea by quantitative descriptive analysis and construction of flavor wheel[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(9): 1-9.
- [11] 祁雅楠, 葛谦, 李雅善, 等. 阳光玫瑰葡萄感官特征解析与感官轮建立[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 47-55.
- QI Y N, GE Q, LI Y S, et al. Analysis of sensory characteristics of Shine Muscat grape and establishment of sensory wheel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 47-55.
- [12] 曹楚楚, 高海燕, 赵镭, 等. 襄阳牛肉面质地感官与仪器分析的相关性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(8): 64-72.
- CAO C C, GAO H Y, ZHAO L, et al. Correlation between texture sensory and instrumental measurement of Xiangyang beef noodles[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(8): 64-72.
- [13] 蒋涵, 李大鹏, 文韬, 等. 基于电子鼻的茶油掺伪定性和定量检测[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 65-70.
- JIANG H, LI D P, WEN T, et al. Qualitative and quantitative detection of camellia oil adulteration based on electronic nose [J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 65-70.
- [14] 陈俊宇, 凌建刚, 杜丽慧, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同干燥方式花菇的挥发性风味成分差异[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 43-52.
- CHEN J Y, LING J G, DU L H, et al. Differences in volatile components between different drying methods of *Lentinus edoeds* analyzed by GC-IMS[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 43-52.
- [15] 邓威, 韩篷慧, 王美淇, 等. 传统豆酱微生物群落演替及风味物质变化的研究进展[J]. 中国调味品, 2023, 48(2): 213-220.
- DENG W, HAN P H, WANG M Q, et al. Research progress of microbial community succession and flavor substance changes of traditional soybean paste[J]. China Condiment, 2023, 48(2): 213-220.
- [16] 邹金浩, 沈虹斌, 龙正玉, 等. 乳酸菌接种发酵对牛肉黄豆复合酱品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 93-101.
- ZOU J H, SHEN H Y, LONG Z Y, et al. Effect of inoculated fermentation with lactic acid bacteria on the quality of fermented beef-soybean paste[J]. Food Science, 2024, 45(23):

- 93-101.
- [17] 蒋四强, 陈功, 李雄波, 等. 红曲霉强化发酵对黄豆酱风味物质及菌群结构的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(9): 93-101.  
JIANG S Q, CHEN G, LI X B, et al. Effect of co-fermentation with *Monascus* and *Aspergillus oryzae* on flavor substances and microfloral structure of soybean paste[J]. Food Science, 2024, 45(9): 93-101.
- [18] 赵建新, 顾小红, 刘杨岷, 等. 传统豆酱挥发性风味化合物的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 684-687.  
ZHAO J X, GU X H, LIU Y M, et al. Study on the volatile flavor compounds of the traditional Chinese soybean paste[J]. Food Science, 2006, 27(12): 684-687.
- [19] 李智, 解双瑜, 孙波, 等. 盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中挥发性风味物质及理化指标的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 214-227.  
LI Z, XIE S Y, SUN B, et al. Effect of salinity on volatile flavor compounds and physicochemical properties in red cabbage sauerkraut during fermentation[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(4): 214-227.
- [20] 郭丽平, 闫文, 戴志远. 贻贝豆酱发酵工艺对其挥发性风味物质及抗氧化性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 154-163.  
GUO L P, YAN W, DAI Z Y. Effects of fermentation technology of mussel bean paste on its volatile compounds and antioxidant activity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 154-163.
- [21] 陈淑钧, 刘亚楠, 翁佩芳, 等. 乳酸菌接种发酵对腌制雪菜挥发性风味的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(11): 310-324.  
CHEN S J, LIU Y N, WENG P F, et al. Effects of lactic acid bacteria inoculation and fermentation on volatile flavor of pickled potherb mustard[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(11): 310-324.
- [22] 于海燕, 敖婷, 廖晗雪, 等. 不同乳酸菌对发酵芸豆乳风味特征的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(22): 180-188.  
YU H Y, AO T, LIAO H X, et al. Effects of different lactic acid bacteria on flavor characteristics of fermented kidney bean milk[J]. Food Science, 2024, 45(22): 180-188.
- [23] 王宇, 淑英, 王慧婷, 等. 小尾寒羊不同部位风味物质与风味前体物的相关性分析[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 263-277.  
WANG Y, SHU Y, WANG H T, et al. Analysis of the correlation between flavor substances and flavor precursors in different parts of small tailed Han sheep[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 263-277.
- [24] 王蓓, 韩兆盛, 杨智杰, 等. 6类常见食品中含硫化物风味特征及形成机理研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(6): 13-25.  
WANG B, HAN Z S, YANG Z J, et al. Research progress on flavor characteristics and formation mechanism of sulfur compounds in six common foods[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(6): 13-25.
- [25] 郭瑞, 张晓莉, 李盼盼, 等. 基于挥发性风味物质分析的小麦储藏年份鉴别方法研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 303-312.  
GUO R, ZANG X L, LI P P, et al. Identification method of wheat storage year based on volatile flavor compounds[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(24): 303-312.
- [26] 刘俊霞, 赵萍, 万小辉, 等. 大鲵肝茶叶水提液脱腥过程中挥发性有机物的动态变化[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 8-17.  
LIU J X, ZHAO P, WAN X H, et al. Dynamic changes of volatile organic compounds in giant salamander liver during the deodorization with tea water extract[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 8-17.