

# HS-SPME-GC-MS-O结合电子鼻对坨坨猪肉主体风味评价分析

周慧敏<sup>1</sup>, 张顺亮<sup>1</sup>, 郝艳芳<sup>2</sup>, 陈松<sup>3</sup>, 潘晓倩<sup>1</sup>, 吴倩蓉<sup>1</sup>, 李素<sup>1</sup>, 朱宁<sup>1</sup>, 乔晓玲<sup>1</sup>, 赵冰<sup>1,\*</sup>

(1.中国肉类食品综合研究中心, 肉类加工技术北京市重点实验室, 北京 100068;

2.厦门海荃兴仪器股份有限公司, 福建 厦门 361000; 3.河南双汇投资发展股份有限公司, 河南 漯河 462000)

**摘要:** 利用电子鼻和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱-嗅闻 (headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry, HS-SPME-GC-MS-O) 联用技术对不同厂家市售的坨坨猪肉样品的挥发性风味成分分析, 并进一步对主体风味成分进行主成分分析 (principal component analysis, PCA)。结果表明: 电子鼻对挥发性成分从整体上进行分析, 发现线性判别分析是辨别坨坨猪肉中挥发性成分差异的有效方法。利用HS-SPME-GC-MS-O从坨坨猪肉样品中共测定出45种挥发性化合物, 主要由醛、醇、酮、烯烃类及杂环类化合物构成。基于气味活度值和嗅闻分析得到27种风味活性物质, 其中8种成分在4组中均检出, 分别为己醛、庚醛、辛醛、反-2-庚烯醛、壬醛、反-2-辛烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇, 对样品的总贡献度达到71.16%~93.12%, 是坨坨肉主体风味物质。源自调味料的左旋香芹酮、蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、右旋柠檬烯、反- $\beta$ -罗勒烯、柠檬醛、丙硫醇、桉树醇、芳樟醇的贡献度达到12.71%~28.58%, 构成坨坨肉的整体风味。基于27种主体风味成分, PCA显示各样品间分离良好, C组和D组在PC1上得分较高, A组和D组在PC2上得分较高。反,反-2,4-癸二烯醛在PC1上贡献较大, 芳樟醇在PC2上贡献最大, 其次是柠檬烯、1-辛烯-3-醇。因此, 反,反-2,4-癸二烯醛、芳樟醇、柠檬烯、1-辛烯-3-醇可作为区分坨坨肉的重要风味物质。

**关键词:** 坨坨肉; 挥发性风味物质; 气味活性值; 电子鼻; 主成分分析

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

ZHOU Huimin<sup>1</sup>, ZHANG Shunliang<sup>1</sup>, HAO Yanfang<sup>2</sup>, CHEN Song<sup>3</sup>, PAN Xiaoqian<sup>1</sup>, WU Qianrong<sup>1</sup>,

LI Su<sup>1</sup>, ZHU Ning<sup>1</sup>, QIAO Xiaoling<sup>1</sup>, ZHAO Bing<sup>1,\*</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Meat Processing Technology, China Meat Research Center, Beijing 100068, China;

2. Xiamen Sea Hongxing Instrument Co. Ltd., Xiamen 361000, China;

3. Henan Shuanghui Investment & Development Co. Ltd., Luohe 462000, China)

**Abstract:** The volatile flavor components of Tuotuo pork samples from four different producers were investigated by electronic nose (EN) and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (HS-SPME-GC-MS-O). Furthermore, principal component analysis (PCA) was carried out on the major flavor components. The results showed that EN combined with linear discriminant analysis (LDA) was an effective method to distinguish the difference in volatile components of different Tuotuo pork samples. By HS-SPME-GC-MS-O, a total of 45 volatile compounds were detected from the samples, mainly aldehydes, alcohols, ketones, olefin, and heterocyclic compounds. Through odor activity value (OAV) calculation and olfactometry, 27 flavor substances with OAV  $\geq 1$  were identified, eight of which were found in all four samples, including hexanal, heptanal, octanal, (*E*)-2-heptenal, nonanal, (*E*)-2-octenal, (*E,E*)-2,4-decadienal, and 1-octene-3-ol, together contributing to 71.16%~93.12% of the total flavor as the major flavor components. In addition, volatile compounds derived from the seasonings used, including *L*-carvone, pinene,  $\beta$ -pinene, *D*-limonene, (*E*)- $\beta$ -ocimene, citral, propyl mercaptan, eucalyptus alcohol, and linalool contributed to the remaining 12.71%~28.58%. Based on the 27 flavor components, PCA showed good separation among the samples. Samples C and D

收稿日期: 2019-10-24

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项 (2018YFD0400101)

第一作者简介: 周慧敏 (1990—) (ORCID: 0000-0003-2033-1491), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为肉类食品加工与安全。

E-mail: zhouhuimin7630@163.com

\*通信作者简介: 赵冰 (1986—) (ORCID: 0000-0001-9676-677X), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为肉类食品加工与安全。

E-mail: zhaobtg@163.com

scored higher on PC1, while samples A and D scored higher on PC2. The contribution of (*E,E*)-2,4-decadienal to the flavor of Tuotuo pork was bigger on PC1, whereas the contribution of linalool was the highest on PC2, followed by limonene and 1-octene-3-ol. Therefore, (*E,E*)-2,4-decadienal, linalool, limonene, and 1-octene-3-ol were the important flavor substances to discriminate among Tuotuo pork from different producers.

**Keywords:** Tuotuo pork; volatile flavor substance; odor activity value; electronic nose; principal component analysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191024-263

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2021)02-0218-09

引文格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191024-263. <http://www.spkx.net.cn>

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. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191024-263. <http://www.spkx.net.cn>

坨坨肉是凉山彝族地区肉食的基本制作方法, 是一道民族特色传统美食, 因其每一块肉的质量均在100~150 g左右, 成“坨”状, 故名。在制作上, 不论猪、牛、羊, 宰杀后均连骨带肉切成如拳头般大小的块状, 用清水煮至八成熟, 撒盐即食, 也可蘸木姜子根粉、辣椒粉、花椒粉、味精、蒜、葱等综合调料食之; 因具有肥肉不腻、瘦肉脆嫩、肉质香鲜可口、肉味浓郁、天然少污染的特点, 成为当地人喜爱的一种特色食品。特别是选用仔猪肉制作, 更是清脆可口。近年来由于生活节奏不断加快和消费需求的多元化发展, 民族特色食品的消费需求迅速提升, 市面上涌现出大量的坨坨肉加热即食产品, 产品之间风味存在一定差异。目前关于坨坨肉产品的特征风味及快速品质评价相关研究鲜见报道。

顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)技术是目前应用最普遍的一种挥发性物质富集技术之一, 操作简便、对痕量物质较敏感、耗时较短且灵敏度高。气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用法被广泛应用于农药、兽药、风味物质等痕量物质的分类鉴定<sup>[1-3]</sup>。人类的嗅觉能够有效识别空气中的风味物质, 嗅觉仪(olfactometry, O)是将人类的嗅觉与现代分离、检测技术结合, 从而更好地实现对挥发性风味物质的定性<sup>[4-5]</sup>。气味活性值(odor activity value, OAV)是以挥发性风味物质的定量分析为基础, 参考其在水中的觉察阈值, 计算得到可以表征挥发性风味物质贡献大小的指标, 该值越大, 对应组分对总体风味贡献越大<sup>[6]</sup>。电子鼻是仿照生物嗅觉系统, 利用气体传感器阵列的响应曲线识别气味的一种电子系统, 能够将不同气敏传感器的作用转化为方便计算的可测物理信号, 实现对样品中挥发成分的整体信息进行快速准确地综合分析, 也称“指纹”数据<sup>[7-9]</sup>。目前国内外基于GC-MS联用技术结合电子鼻研究挥发性成分的应用已十分广泛<sup>[10-12]</sup>。

本研究利用电子鼻对不同厂家市售坨坨猪肉样品中风味物质进行快速检测, 并对结果进行主成分分析(principal component analysis, PCA)和线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA), 以确定利用电子鼻检测并快速识别不同厂家市售坨坨猪肉样品间挥发性风味物质差异的可行性。进一步采用HS-SPME-GC-MS-O对不同厂家市售坨坨猪肉样品中挥发性风味物质进行定性及定量分析, 通过计算OAV确定坨坨猪肉产品的主体特征风味物质, 并对其进行PCA, 得到主体风味成分的载荷图, 旨在探究不同厂家坨坨猪肉样品间风味差异的机理, 为坨坨肉制品的风味品质改良和评价提供理论支持。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

选用来自四川省凉山彝族自治州西昌市售的源自4个厂家(分别为A~D组)当天生产的坨坨猪肉样品, 每种采样数量为10包, 产品制作时选用仔猪肉块制作, 每一块肉质量100~150 g左右, 用清水煮至八成熟, 一部分撒盐, 一部分添加木姜子根粉、辣椒粉、花椒粉、味精、蒜、葱等综合调料搅拌均匀, 真空包装, A组和D组为带调料的坨坨肉, B组和C组为仅添加盐的坨坨肉。

2-甲基-3-庚酮、C<sub>8</sub>~C<sub>20</sub>正构烷烃(均为分析纯)美国Sigma-Aldrich公司。

### 1.2 仪器与设备

50/30 μm二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷(divinylbenzene/carboxen/polydimethylsiloxane, DVB/CAR/PDMS)1 cm SPME萃取头 美国Supelco公司; ODP2嗅觉检测仪 德国Gerstal公司; TRACE1314-TSQ8000 GC-MS联用仪、TG-Wax MS极性柱 美国赛默飞世尔科技(中国)有限公司; PEN3便携式电子鼻传感器 德国Airsense公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 挥发性风味物质前处理及检测条件

将坨坨肉样品于室温下切碎混匀后,准确称取3.00 g装入样品瓶中,加入1  $\mu\text{L}$  0.816  $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的2-甲基-3-庚酮作为内标物,旋紧瓶盖。将样品瓶放入55  $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中平衡10 min后将SPME针头插入瓶中,纤维头处于顶空状态吸附挥发性风味化合物40 min后取出,插入GC进样口中,热解吸5 min<sup>[13]</sup>。

GC条件: TG-Wax MS极性柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25  $\mu\text{m}$ );载气为高纯氮气(纯度>99.99%);流速1.5 mL/min;采用不分流模式,保持2 min。升温程序:进样口温度250  $^{\circ}\text{C}$ ,柱温起始温度40  $^{\circ}\text{C}$ ,保持3 min,之后以5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 速率升温到200  $^{\circ}\text{C}$ ,保持1 min,再以8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 速率升温到230  $^{\circ}\text{C}$ ,保持10 min。

MS条件:传输线温度230  $^{\circ}\text{C}$ ,电子能量70 eV,电子电离源温度280  $^{\circ}\text{C}$ ,质量扫描范围40~600 u;采用全扫描模式<sup>[14-15]</sup>。

#### 1.3.2 嗅闻仪检测

嗅闻仪接口温度200  $^{\circ}\text{C}$ 。检测时为防止评价员鼻腔干燥,通入湿润水蒸气。用预处理后的样品及标准香气化合物对每位评价员反复培训后再进行样品实验,由3位评价员在嗅闻检测口处记录闻到香气的的时间、香味特性以辅助风味物质的鉴定,每种化合物的香气描述及时间至少由其中2名评价员评价一致才确定<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.3 挥发性风味成分鉴定

化合物的定性分析:通过检索NIST谱库,选择正反匹配度均大于750(最大值1000)的化合物。计算各挥发物的保留指数(retention index, RI),并与文献[17-18]中的RI进行比对。

半定量分析<sup>[15]</sup>:依据化合物峰面积比值与质量浓度呈正比的原理,计算每一种化合物相对于内标化合物的质量浓度。未知挥发性化合物含量按式(1)计算:

$$C_x = \frac{C_0 \times V_0 \times S_x}{S_0 \times m} \quad (1)$$

式中:  $C_x$ 为未知挥发性化合物含量/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$ ;  $C_0$ 为内标化合物质量浓度/ $(\mu\text{g}/\mu\text{L})$ ;  $V_0$ 为内标化合物进样体积/ $\mu\text{L}$ ;  $S_x$ 为未知挥发性化合物的峰面积/ $(\text{AU}\cdot\text{min})$ ;  $S_0$ 为添加的内标化合物峰面积/ $(\text{AU}\cdot\text{min})$ ;  $m$ 为样品质量/kg。

#### 1.3.4 OAV计算

OAV按照式(2)计算<sup>[19]</sup>:

$$\text{OAV} = \frac{C}{T} \quad (2)$$

式中:  $C$ 为样品中测得的风味物质含量/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$ ;  $T$ 为该风味物质在水中的觉察阈值/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$ ,该阈值通过查阅文献[20]获得。

#### 1.3.5 电子鼻分析

将待测坨坨肉样品切碎并准确称取2.00 g样品置于10 mL样品瓶中,运用PEN3型便携式电子鼻传感器对4组样品进行测定。传感器响应信号在60 s后趋于稳定,本研究选取70 s为信号采集时间。每组样品做4次平行重复测定<sup>[16]</sup>。电子鼻传感器性能见表1。

表1 PEN3型便携式电子鼻传感器性能描述  
Table 1 Performances of 10 sensors used in PEN3 portable electronic nose

阵列序号	传感器名称	性能描述
R1	W1C	芳香成分苯类
R2	W5S	灵敏度大,对氮氧化物很灵敏
R3	W3C	氨类,对芳香成分灵敏
R4	W6S	主要对氢化物有选择性
R5	W5C	短链烷烃芳香成分
R6	W1S	对甲基类灵敏
R7	W1W	对无机硫化物灵敏
R8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
R9	W2W	芳香成分,对有机硫化物灵敏
R10	W3S	对长链烷烃灵敏

### 1.4 数据处理

通过Microsoft Excel 2010软件对数据进行统计分析,并计算标准差;利用SPSS 17.0对数据进行显著性分析;利用UnscrambX 10.1对不同市售坨坨肉组中OAV $\geq$ 1的风味化合物进行PCA。电子鼻测定结果运用其配套的Winmuster软件对数据进行PCA和LDA。

## 2 结果与分析

### 2.1 电子鼻传感器对市售坨坨猪肉风味的响应

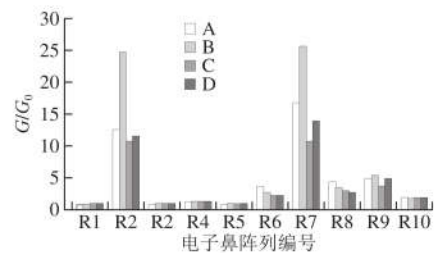


图1 电子鼻传感器对不同厂家市售坨坨猪肉风味的响应值  
Fig. 1 Responses of different electronic nose sensors to volatile components of Tuotuo pork from different manufacturers

由图1可知,4种市售坨坨猪肉产品中R7(无机硫化物)、R2(氮氧化物)的传感器响应值最强,均在10以上,其次为R8(醇醛酮类)、R9(有机硫化物)、R6(甲基类)的传感器响应值为4左右,说明无机硫化物、氮氧化物、醇醛酮类、有机硫化物、甲基类是坨坨肉产品中主要且稳定存在的挥发性物质。而R1(芳香苯类)、R3(氨类)、R4(氢化物)、R5(短链烷烃芳香成分)、R10(长链烷烃)传感器响应值较低,均在1

左右,说明坨坨肉中氨类、氢化物和烷烃类物质含量较低;因此,无机硫化物、氮氧化物、醇醛酮类、有机硫化物、甲基类是坨坨猪肉产品中主要的风味物质。

2.2 对市售坨坨猪肉样品电子鼻风味检测数据进行PCA和LDA

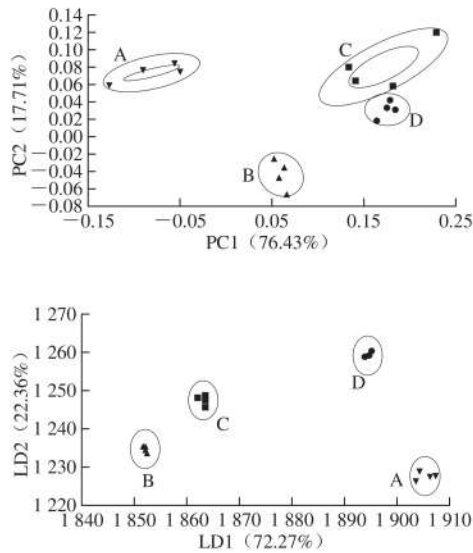


图2 坨坨猪肉样品的PCA和LDA图

Fig. 2 PCA and LDA plots of Tuotuo pork samples

PCA可以将主要信息保留在不相关的PC中,PC的累计贡献率越大,则可以更好地反映各个指标的信息。LDA是利用所有传感器的信号研究样品所属类别的一种统计方法<sup>[8-9]</sup>。因此采用PCA法和LDA法建立4组产品的响应模型。由图2可知,PC1和PC2的贡献率分别为76.43%和17.71%,总贡献率为94.14%,表明2个PC能够反映原始数据的信息。4组产品之间没有重叠,表明其在挥发性成分上有一定差异,但添加香辛料组和未添加组之间不能进行良好判断。因此,需要运用LDA方法进一步分析。在LDA中,线性判别函数LD1和LD2的贡献率分别为72.27%和22.36%,总贡献率为94.63%。4组产品没有重叠,不同样品在LDA图中的分布呈现明显的变化趋势,可以达到区分是否添加香辛料的目的。在LD1上A/D与B/C距离较远,说明随着LD1的增加,挥发性物质丰度逐渐增加。因此通过电子鼻对不同厂家坨坨肉样品中挥发性成分进行分析,发现PCA和LDA均能很好地对其区分。但利用PCA不能很好地区分添加香辛料样品之间的挥发性成分,LDA则能进行明显区分,说明LDA是辨别坨坨猪肉中挥发性成分差异的有效分析方法。由图1可知,4组产品所含的风味物质种类大体一致,但挥发性风味物质的含量有一定差异,因此利用PCA和LDA可将其区分开。

2.3 不同厂家市售坨坨猪肉挥发性风味物质的种类及含量

表2 市售坨坨猪肉中挥发性风味成分的GC-MS分析结果

Table 2 GC-MS analysis of volatile compounds from Tuotuo pork samples

挥发性风味成分	含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )			
	A	B	C	D
丁二醛	3.53±2.85 <sup>a</sup>	2.02±0.02 <sup>a</sup>	—	4.96±3.23 <sup>a</sup>
戊醛	4.51±0.01 <sup>a</sup>	76.97±31.63 <sup>b</sup>	10.31±4.75 <sup>a</sup>	37.93±18.67 <sup>a</sup>
己醛	165.46±102.81 <sup>f</sup>	616.11±71.23 <sup>g</sup>	342.5±34.64 <sup>f</sup>	920.34±245.15 <sup>f</sup>
庚醛	14.62±3.83 <sup>a</sup>	30.47±6.9 <sup>a</sup>	33.03±7.07 <sup>a</sup>	34.22±0.65 <sup>a</sup>
反,反-2,4-壬二烯醛	—	4.04±0.13 <sup>a</sup>	—	—
2-己烯醛	—	—	9.11±1.62 <sup>a</sup>	—
辛醛	22.29±8.02 <sup>b</sup>	38.8±1.78 <sup>ab</sup>	37.11±9.01 <sup>ab</sup>	53.07±0.55 <sup>a</sup>
反-2-庚烯醛	11.01±0.25 <sup>a</sup>	34.19±3.19 <sup>b</sup>	102.39±62.34 <sup>f</sup>	33.2±0.47 <sup>b</sup>
壬醛	70.25±2.41 <sup>a</sup>	94.68±0.34 <sup>a</sup>	92.22±34.18 <sup>a</sup>	120.08±0.13 <sup>a</sup>
顺-6-壬烯醛	—	—	1.1±0.68 <sup>a</sup>	—
4-甲基环己-3-烯甲醛	—	11.66±1.66 <sup>b</sup>	17.01±2.01 <sup>a</sup>	—
反-2-辛烯醛	7.51±0.94 <sup>a</sup>	36.48±12.12 <sup>f</sup>	52.98±31.95 <sup>f</sup>	27.94±2.78 <sup>a</sup>
香茅醛	37.29±6.58 <sup>a</sup>	—	—	—
反,反-2,4-庚二烯醛	—	—	25.91±16.11 <sup>a</sup>	—
顺-2-癸醛	—	16.01±1.01 <sup>a</sup>	30.17±16.7 <sup>a</sup>	—
反-2-癸烯醛	9.00±3.57 <sup>b</sup>	3.59±1.39 <sup>b</sup>	—	27.52±4.72 <sup>a</sup>
顺-3,7-二甲基辛-2,6-二烯醛	38.74±10.19 <sup>a</sup>	—	—	—
柠檬醛	51.45±13.34 <sup>a</sup>	—	—	39.67±8.87 <sup>a</sup>
顺-2-十一碳烯醛	—	—	20.52±13.3 <sup>a</sup>	23.12±3.75 <sup>a</sup>
反,反-2,4-癸二烯醛	22.76±3.76 <sup>a</sup>	11.87±0.13 <sup>a</sup>	83.76±53.5 <sup>f</sup>	60.4±3.52 <sup>a</sup>
醛类	458.42±83.65 <sup>d</sup>	976.9±98.65 <sup>g</sup>	858.12±289.82 <sup>d</sup>	1382.46±285.82 <sup>d</sup>
丙硫醇	0.79±0.07 <sup>a</sup>	—	—	—
桉树醇	—	—	—	99.93±14.86
戊醇	15.47±0.00 <sup>b</sup>	58.6±9.63 <sup>a</sup>	30.52±8.87 <sup>b</sup>	23.04±1.04 <sup>b</sup>
己醇	7.36±5.76 <sup>a</sup>	13.92±3.48 <sup>a</sup>	7.00±2.00 <sup>a</sup>	—
1-辛烯-3-醇	86.44±0.34 <sup>a</sup>	211.52±2.66 <sup>d</sup>	151.62±16.86 <sup>b</sup>	172.41±10.42 <sup>b</sup>
庚醇	—	8.83±1.8 <sup>ab</sup>	14.31±4.77 <sup>b</sup>	—
芳樟醇	2256.91±140.94 <sup>a</sup>	67.2±19.49 <sup>b</sup>	—	1056.27±19.95 <sup>b</sup>
1-壬醇	—	—	23.33±7.55 <sup>a</sup>	—
4-萜烯醇	7.26±0.00 <sup>b</sup>	—	21.5±6.85 <sup>a</sup>	—
异薄荷醇	—	—	—	2.37±0.07 <sup>a</sup>
反-2-辛烯-1-醇	—	21.91±2.87 <sup>a</sup>	26.44±9.99 <sup>a</sup>	—
糠醇	8.29±0.09 <sup>a</sup>	—	—	6.09±0.59 <sup>b</sup>
$\alpha$ -松油醇	30.13±2.05 <sup>a</sup>	—	16.26±5.59 <sup>b</sup>	—
2-茨醇	18.89±0.08 <sup>a</sup>	—	—	—
醇类	2431.53±144.58 <sup>f</sup>	381.98±39.94 <sup>d</sup>	290.98±58.49 <sup>e</sup>	1360.11±15.12 <sup>b</sup>
2,5-二甲基-3-己酮	442.21±0.00 <sup>a</sup>	—	—	—
2,3-辛二酮	5.50±0.50 <sup>a</sup>	128.09±78.09 <sup>d</sup>	54.31±1.31 <sup>a</sup>	113.44±3.44 <sup>a</sup>
甲基庚烯酮	20.59±2.65 <sup>a</sup>	—	—	—
2-甲基-3-辛酮	—	2.39±1.39 <sup>a</sup>	—	—
左旋香芹酮	—	—	—	36.64±6.57 <sup>a</sup>
酮类	468.3±2.15 <sup>a</sup>	130.48±79.48 <sup>b</sup>	54.31±1.31 <sup>b</sup>	150.08±3.13 <sup>b</sup>
己酸乙酯	31.93±0.00 <sup>a</sup>	60.55±5.55 <sup>a</sup>	35.91±3.91 <sup>b</sup>	125.82±5.82 <sup>a</sup>
2-乙基丁酸烯丙酯	—	2.57±0.37 <sup>b</sup>	17.04±1.04 <sup>a</sup>	—
乙酸松油酯	37.82±1.99 <sup>b</sup>	—	—	118.85±4.06 <sup>a</sup>
酯类	69.75±1.99 <sup>b</sup>	63.12±5.92 <sup>bc</sup>	52.95±2.87 <sup>a</sup>	244.68±1.77 <sup>a</sup>
丁酸	2.28±0.63 <sup>a</sup>	—	—	—
酸类	2.28±0.63 <sup>a</sup>	—	—	—
蒎烯	13.83±0.83 <sup>a</sup>	—	—	4.99±0.01 <sup>b</sup>
$\alpha$ -蒎烯	11.66±5.93 <sup>a</sup>	—	1.61±0.39 <sup>a</sup>	—
蒎烯	24.84±7.75	—	—	—
$\beta$ -蒎烯	61.58±0.00 <sup>b</sup>	—	—	374.99±55.81 <sup>a</sup>
S(-)-柠檬烯	97.3±4.74 <sup>a</sup>	7.74±2.24 <sup>b</sup>	—	—

续表2

挥发性 风味成分	含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )			
	A	B	C	D
右旋柠檬烯	193.37 $\pm$ 0 <sup>a</sup>	—	—	1349.06 $\pm$ 177.3 <sup>a</sup>
反- $\beta$ -罗勒烯	21.54 $\pm$ 0.54 <sup>b</sup>	—	—	107.79 $\pm$ 10.32 <sup>a</sup>
罗勒烯异构体混合物	30.46 $\pm$ 5.39 <sup>a</sup>	—	1.51 $\pm$ 0.41 <sup>b</sup>	—
萜品油烯	1.50 $\pm$ 0.50 <sup>a</sup>	—	1.02 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	—
2,4-二甲基-1-庚烯	—	31.98 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	—	—
二烯丙基二硫醚	—	—	58.26 $\pm$ 1.52 <sup>a</sup>	—
1-石竹烯	25.49 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	—	—	—
姜烯	192.03 $\pm$ 86.08 <sup>a</sup>	—	2.00 $\pm$ 0.00 <sup>b</sup>	—
甜没药烯	13.8 $\pm$ 5.27 <sup>a</sup>	—	—	—
烯炔类	687.39 $\pm$ 68.41 <sup>b</sup>	39.73 $\pm$ 2.26 <sup>c</sup>	64.39 $\pm$ 1.50 <sup>c</sup>	1836.83 $\pm$ 131.82 <sup>a</sup>
2-戊基呋喃	—	33.44 $\pm$ 1.52 <sup>b</sup>	54.41 $\pm$ 8.68 <sup>a</sup>	—
苯	4.43 $\pm$ 3.65 <sup>a</sup>	1.09 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	3.20 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>	2.38 $\pm$ 0.38 <sup>a</sup>
甲苯	10.25 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	6.41 $\pm$ 0.17 <sup>b</sup>	12.73 $\pm$ 1.73 <sup>a</sup>	—
邻异丙基苯	14.54 $\pm$ 3.10 <sup>a</sup>	—	5.73 $\pm$ 0.73 <sup>bc</sup>	9.78 $\pm$ 0.78 <sup>ab</sup>
十四烷	12.56 $\pm$ 0.56 <sup>a</sup>	—	—	0.55 $\pm$ 0.35 <sup>b</sup>
异丁香酚甲醛	3.03 $\pm$ 0.83 <sup>a</sup>	—	—	—
其他	44.82 $\pm$ 1.95 <sup>b</sup>	40.94 $\pm$ 1.6 <sup>b</sup>	76.07 $\pm$ 6.01 <sup>a</sup>	12.71 $\pm$ 0.75 <sup>c</sup>
共计	4162.5 $\pm$ 157.4 <sup>a</sup>	1633.14 $\pm$ 131.61 <sup>b</sup>	1396.83 $\pm$ 354.26 <sup>b</sup>	4986.86 $\pm$ 396.88 <sup>a</sup>

注：同行肩标不同小写字母表示差异显著， $P<0.05$ ；—未检出。下同。

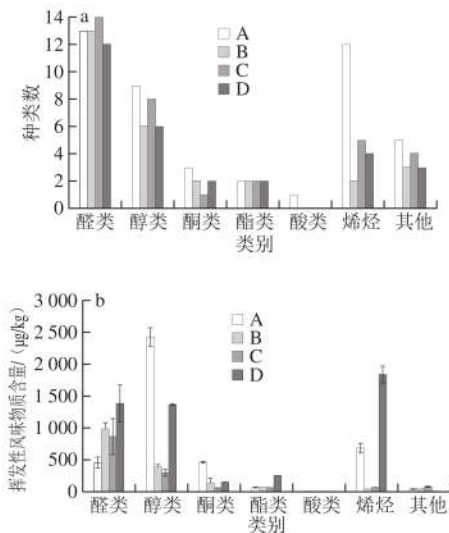


图3 4组坨坨猪肉中挥发性风味物质种类 (a) 及含量 (b)

Fig. 3 Kinds (a) and contents (b) of volatile compounds identified in four Tuotuo pork samples

由表2和图3可知，在A、B、C、D四组坨坨肉样品中分别检测出45、28、34、29种挥发性风味化合物，其中共有成分13种。挥发性风味物质的总含量分别为4162.5、1633.14、1396.83、4986.86  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。可见，A、D组样品中挥发性风味物质含量更加丰富，这与产品工艺有直接关联，A、D组样品表面涂抹有香辛料粉，香辛料可赋予坨坨肉更丰富的香气，增进食欲。

### 2.3.1 醛类物质分析

由表2和图3可知，从种类和含量分析，A、B、C、D四组坨坨肉样品中醛类种类最多，分别检出13、13、14、12种，总含量分别为458.42、976.9、858.12、

1382.46  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；占比分别为11.01%、59.82%、61.43%、27.72%。有研究报道生猪肉中醛类化合物含量约为200~400  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[15]</sup>。A组坨坨肉产品中醛类物质含量稍高于文献报道，其他3组远高于文献报道，说明煮制工艺可促进坨坨肉中醛类物质的生成。B、C两组产品中醛类物质含量相当，而D组中醛类物质是这两组的1.4~1.6倍左右，这可能由于D组坨坨肉原料肉脂肪含量较高或煮制时间更长导致，另外经检测坨坨肉的调味料中也含有部分的醛类。醛类由于觉察阈值较低，是构成肉品特征风味的重要物质，一般由脂肪酸降解及氧化产生<sup>[21]</sup>。坨坨肉产品制作过程较简单，经过较短的煮制工艺，在此过程中发生脂肪降解反应及进一步的氧化反应。4组样品中均存在的醛类为5~9个碳原子直链醛，是主要的醛类，具有清香、坚果香和脂香<sup>[22]</sup>。其中，己醛的含量最高，其次是壬醛、辛醛、庚醛。辛醛、壬醛主要来自油酸氧化<sup>[23]</sup>，此外姜也是辛醛的重要来源；己醛、庚醛主要来源于n-6多不饱和脂肪酸氧化的产物<sup>[23-24]</sup>。烯炔类在4组产品之间存在显著差异，如反,反-2,4-壬二烯醛、2-己烯醛、反-2-庚烯醛、顺-6-壬烯醛、4-甲基环己-3-烯甲醛在B、C组样品中特有或含量显著高于其他两组。这可能由于A、D组样品中涂抹的香辛料具有抗氧化能力<sup>[25-26]</sup>，抑制脂肪氧化源风味物质的生成。同时顺-3,7-二甲基辛-2,6-二烯醛、柠檬醛、香茅醛在A、D组样品中特有，推测他们来自香辛料。因此坨坨猪肉中挥发性醛类主要是短链饱和醛、烯炔，如戊醛、己醛、庚醛、辛醛、反-2-庚烯醛、壬醛、反-2-辛烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛这8种醛类在4组样品中均检出，是构成坨坨猪肉产品中主要的醛类物质。相似的研究成果也有报道<sup>[27-28]</sup>。

### 2.3.2 醇类物质分析

醇类化合物对肉香气的贡献虽不如醛类明显，但在肉类整体风味的形成中也发挥着关键作用<sup>[22]</sup>。A、B、C、D四组坨坨肉样品中醇类种类数次之，分别检出9、6、8、6种，总含量分别为2431.53、381.98、290.98、1360.11  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；占比分别为58.42%、23.39%、20.83%、27.27%，在4组样品之间差异显著，A样品中醇类含量显著高于D样品，而D样品高于显著B、C样品；这主要取决于芳樟醇，其在A和D组样品中分别高达2256.91  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和1056.27  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，是辣椒、花椒、姜等香料中常见的风味物质，贡献花香气味<sup>[27]</sup>。1-辛烯-3-醇具有蘑菇香味，增加肉的鲜味，是典型的肉香型化合物，来源于脂质 $\beta$ -氧化<sup>[24]</sup>，在4组产品差异显著，含量分别为86.44、211.52、151.62、172.41  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，其在A组中含量最低。丙硫醇、桉树醇、异蒲勒醇、糠醇、 $\alpha$ -松油醇、2-茨醇仅在A、D组样品中检出，这与针对坨坨肉调味料风味检测结果相吻合。反-2-辛烯-1-醇、1-壬醇、正戊醇、正庚醇在B、C组样品中显著高于另两组。不饱和脂肪酸氧化裂

解反应除产生醛类物质外,还伴随着醇类物质的产生。研究报道猪肉中主要的醇类化合物是1-辛烯-3-醇、1-辛醇、戊醇和己醇<sup>[21]</sup>,其含量和种类均存在一定差异,这可能与猪肉的品种、烹饪方式、年龄和部位有关。

### 2.3.3 酮类物质分析

猪肉中的酮类化合物也是由不饱和脂肪酸热氧化或降解以及氨基酸降解而产生的<sup>[22,28]</sup>。一部分酮类化合物有甜的花香和果香,而二酮一般有肉香和奶油香,随着碳链的增长,呈现出更强的花香特征<sup>[22-23]</sup>。A、B、C、D四组坨坨肉样品中酮类种类较少,分别检出3、2、1、2种,总含量分别为468.30、130.48、54.31、150.08  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;占比分别为11.25%、7.99%、3.89%、3.01%,在4组样品之间差异显著,A组样品中酮类含量显著高于其他3组样品( $P<0.05$ ),而其他3组之间差异不显著;这主要由于A组中含有大量的2,5-二甲基-3-己酮,在其他几组中未检测到,该成分可能源自香辛料。另外甲基庚烯酮和左旋香芹酮分别仅在A、D组样品中检出,具有柠檬草和薄荷般的香气<sup>[29]</sup>。2,3-辛二酮为在4组样品中共有的组分,具有甜的奶油香,它是亚油酸经脂氧合酶氧化的产物<sup>[21]</sup>。研究报道猪肉中主要的风味酮类化合物为2,3-辛二酮、2-丁酮和2-庚酮<sup>[21]</sup>。而本研究中未检出2-丁酮和2-庚酮这两种酮类,这也是坨坨猪肉风味与普通熟猪肉风味差异的重要原因。

### 2.3.4 烯炔类物质分析

烯炔类主要来自脂肪酸烷基自由基的均裂,其觉察阈值一般较高,对肉类风味的直接贡献不大,某些烯炔类物质对提高猪肉整体风味有重要作用<sup>[22-23]</sup>。A、B、C、D四组坨坨肉样品中烯炔类种类差异最大,分别检出12、2、5、4种,总含量分别为687.39、39.73、64.39、1 836.83  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;占比分别为16.51%、2.43%、4.61%、36.83%,在4组样品之间差异显著,A、D样品组中的含量极显著高于B、C样品组( $P<0.01$ );烯炔类物质多来源于香辛料,如花椒、橘皮、辣椒、八角茴香<sup>[23-25,28]</sup>。其中蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、右旋柠檬烯和反- $\beta$ -罗勒烯4种物质对A、D组样品具有香气贡献,赋予松脂味、柑橘、薄荷甜味。B、C组样品中虽然也检出一些烯炔类物质,但含量较低,对终产品的贡献可忽略不计。

### 2.3.5 其他风味物质分析

坨坨肉样品中也产生少量的酯类、酸类和杂环类物质。猪肉中的酯类化合物是由肌肉组织中脂质氧化所产生的醇和游离酸相互作用所产生的,其中,4组样品中共有的物质为己酸乙酯,具有果香、甜味<sup>[22-23]</sup>。通过与潘见等<sup>[30]</sup>研究结果对比发现猪肉中检测出的酯类物质种类不一,没有普遍存在的、能体现猪肉特征风味的酯类化合物。酸类主要来自脂肪的水解和脂肪氧化过程产生的小分子脂肪酸<sup>[22]</sup>,觉察阈值一般较高,对肉类风味的直

接贡献不大。而除2-戊基呋喃,其他杂环化合物的OAV小于1,对整体风味影响不大。2-戊基呋喃具有青豆、黄油味,被认为是肉制品重要的风味物质,主要源自脂肪氧化;其他研究人员也有相似的结果<sup>[31-32]</sup>。2-戊基呋喃仅在B、C组样品中检出,分别为33.44、54.41  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,而在A、D组样品中未检出,这可能是由于香辛料抑制了脂肪氧化。

## 2.4 挥发性风味成分OAV分析

挥发性风味物质对产品总体风味特征的贡献度是由风味体系中挥发性物质的浓度与觉察阈值共同决定的。一般认为,OAV $\geq 1$ 的挥发性风味物质为样品的气味活性化合物,对整体风味有直接影响,且OAV越大该化合物对整体香气的贡献就越大<sup>[5,28]</sup>,因此OAV的计算是必要的。

由表3可知,不同厂家市售坨坨猪肉样品中OAV $\geq 1$ 的风味物质共有27种,包括醛类14种、醇类6种、酮类1种、烯炔类4种、硫醚类1种、呋喃类1种,它们之间存在差异,A、B、C、D组样品分别有15、16、16、18种。其中4组样品共有化合物为8种,分别为己醛、庚醛、辛醛、反-2-庚烯醛、壬醛、反-2-辛烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇,它们均为脂肪族醛类和醇类,源自脂肪氧化,主要贡献油脂、清香、坚果和蘑菇的香味,对样品的总贡献度达到71.16%、92.23%、93.12%、86.28%,因此这8种化合物是坨坨肉的主体风味物质。其中反,反-2,4-癸二烯醛在4组样品中的OAV均最高,有脂肪的味道,贡献度分别达到55.58%、41.73%、81.65%、67.93%;文献报道猪肉香气的特有成分为(E,E)-2,4-癸二烯醛,它是亚油酸氧化的主要产物之一,具有油炸食品的脂香,对猪肉风味贡献较大<sup>[22]</sup>。其次是1-辛烯-3-醇,有蘑菇味,贡献度分别达到5.70%、20.07%、3.99%、5.24%;然后是壬醛、辛醛、己醛在4个样品中贡献度之和分别达到9.15%、27.23%、5.83%、12.16%,有脂肪、柑橘和青草的味道,这些化合物构成了坨坨猪肉的基本风味。与B、C组样品比较,在A和D组样品中检出源自香辛料的香气化合物,如左旋香芹酮、蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、右旋柠檬烯、反- $\beta$ -罗勒烯,柠檬醛、丙硫醇、桉树醇、芳樟醇,它们的贡献度分别达到12.71%~28.58%,赋予产品薄荷味、松脂味、柑橘味、甜味、柠檬味、花香及药草味。这与产品工艺有直接关联,因为A、D组样品表面涂抹有香辛料粉。以上9种的香辛料源香气物质和共有的8种脂肪氧化源物质总贡献度达到99%左右,构成了坨坨猪肉的整体风味。A和D组样品之间仍然存在一定的差异,芳樟醇在A组样品中贡献率比在D组样品高19.45%,而右旋柠檬烯在D组样品中贡献率比在A组样品高2.82%,说明A组样品中的花香味更浓郁,D组样品中的薄荷味更突出。而在B、C组样品

表3 不同厂家制作的坨坨猪肉样品中挥发性风味物质的OAV  
Table 3 OAVs of volatile compounds in Tuotuo pork from different manufacturers

挥发性物质	RI/文献RI <sup>[18]</sup>	觉察阈值/ ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) <sup>[3-6,15-16,19-20]</sup>	气味描述 <sup>[18,24-25]</sup>	鉴定方式	OAV			
					A	B	C	D
戊醛	960/935	5	杏仁、麦芽、辛辣	MS、RI	0.9	15.39	2.06	7.59
己醛	1 091/1 084	4.5	青草、脂肪	MS、RI、O	36.77	136.91	76.11	204.52
庚醛	1 195/1 188	3	脂肪、柑橘、酸败	MS、RI、O	4.87	10.16	11.01	11.41
反,反-2,4-壬二烯醛	1 700/1 709	0.1	脂肪、蜡、青草	MS、RI、O	—	40.43	—	—
辛醛	1 303/1 280	0.7	脂肪、肥皂、柠檬、青草	MS、RI、O	31.84	55.42	53.02	75.82
反-2-庚烯醛	1 232/1 236	3	肥皂、脂肪、杏仁	MS、RI、O	3.67	11.4	34.13	11.07
壬醛	1 407/1 392	1	脂肪、柑橘、绿色	MS、RI、O	70.25	94.68	92.22	120.08
顺-6-壬烯醛	1 450/N	0.005	坚果、脂肪	MS、O	—	—	219.62	—
反-2-辛烯醛	1 441 /1 345	3	青草、坚果、脂肪	MS、RI、O	2.5	12.16	17.66	9.31
顺-2-癸醛	1 599/1 601	3.1	动物油脂	MS、RI	—	5.16	9.73	—
反-2-癸烯醛	1 664/1 590	3	动物油脂	MS、RI	3	1.2	—	9.17
柠檬醛	1 599/1 602	40	柠檬	MS、RI、O	1.29	—	—	0.99
顺-2-十一碳烯醛	1 752/1 760	1.4	肥皂、脂肪、青草	MS、RI、O	—	—	14.65	16.51
反,反-2,4-癸二烯醛	1 824/1 710	0.027	油炸、蜡、脂肪	MS、RI、O	843.09	439.77	3 102.2	2 237
丙硫醇	820/N	0.04	臭	MS、O	19.64	—	—	—
桉树醇	1 220/1 213	3	薄荷、甜	MS、RI、O	—	—	—	33.31
1-辛烯-3-醇	1 452/1 445	1	蘑菇	MS、RI、O	86.44	211.52	151.62	172.41
庚醇	1 460/1 467	5.4	化学、绿色	MS、RI、O	—	1.64	2.65	—
芳樟醇	1 549/1 537	6	花、薰衣草	MS、RI、O	376.15	11.2	—	176.04
反-2-辛烯-1-醇	1 620/1 610	20	肥皂、塑料	MS、RI、O	—	1.1	1.32	—
左旋香芹酮	1 755/1 751	7	薄荷	MS、RI、O	—	—	—	5.23
蒎烯	969/N	2.2	松木、针叶	MS、O	6.29	—	—	2.27
$\beta$ -蒎烯	1 150/1 116	6	松树味、松脂味、松节油味	MS、RI、O	10.26	—	—	62.5
右旋柠檬烯	1 210/1 201	10	柑橘、薄荷	MS、RI、O	19.34	—	—	134.91
反- $\beta$ -罗勒烯	1 235/1 242	34	甜的、药草	MS、RI、O	0.63	—	—	3.17
二烯丙基二硫醚	1 486/N	30	大蒜	MS、O	—	—	1.94	—
2-戊基呋喃	1 235/1 240	5.8	青豆、黄油	MS、RI、O	—	5.77	9.38	—

注: N.未查到; RI.保留指数; O.嗅闻; MS.质谱。觉察阈值数据以水为介质。

中检测到更多脂肪氧化源的香气化合物,如反,反-2,4-壬二烯醛、顺-6-壬烯醛、顺-2-癸醛、庚醇、2-戊基呋喃,它们赋予产品更多的油脂味和青草味,B、C组样品几乎没有添加香辛料粉,但B和C组样品之间仍然存在一定的差异,少量的芳樟醇在B组样品中检测到,具有薰衣草香味,而二烯丙基二硫醚仅在C组样品中检测到,具有大蒜的味道。这些具有不同气味化合物的差异导致这4种产品之间存在一定差异,这也可以解释利用PCA和LDA可将电子鼻检测结果区分开。

## 2.5 基于主体风味活性物质的PCA结果

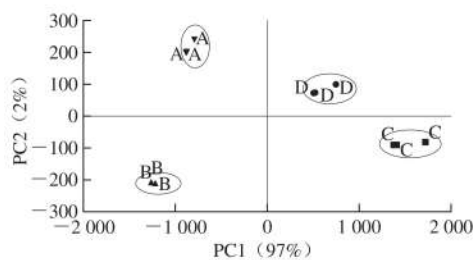
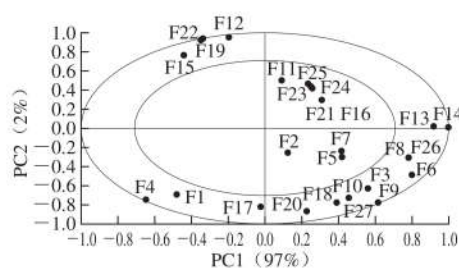


图4 PCA得分图  
Fig. 4 PCA score plot



F1.戊醛; F2.己醛; F3.庚醛; F4.反,反-2,4-壬二烯醛; F5.辛醛; F6.反式-2-辛烯醛; F7.壬醛; F8.顺-6-壬烯醛; F9.反-2-辛烯醛; F10.顺-2-癸醛; F11.反-2-癸烯醛; F12.柠檬醛; F13.顺-2-十一碳烯醛; F14.反,反-2,4-癸二烯醛; F15.丙硫醇; F16.桉树醇; F17.1-辛烯-3-醇; F18.庚醇; F19.芳樟醇; F20.反-2-辛烯-1-醇; F21.左旋香芹酮; F22.蒎烯; F23. $\beta$ -蒎烯; F24.右旋柠檬烯; F25.反- $\beta$ -罗勒烯; F26.二烯丙基二硫醚; F27.2-戊基呋喃。

图5 PCA载荷图  
Fig. 5 PCA loading plot

基于筛选出的主体风味成分,采用PCA法对4组坨坨肉样品进行分析,得到不同厂家坨坨肉中主体风味成分的得分图(图4)和载荷图(图5)。由图4可知,PC1贡献率为97%,PC2贡献率为2%,总贡献率为99%,表明第1和第2主成分能够较好地反映样品特征。4个样品分布于4个象限,各组之间差异较为明显,该结果与电子

鼻的PCA结果一致。不同样品在PCA图中的分布呈现明显的变化趋势, C组和D组在PC1上得分较大, 说明随着PC1的增加, 脂肪氧化源主体风味物质的含量增加。A组和D组在PC2上得分较大, 说明随着PC2的增加, 香辛料源主体风味物质的含量逐渐增加。由图5可知, 反,反-2,4-癸二烯醛(F14)在PC1上贡献较高, 芳樟醇(F19)在PC2上贡献最高, 其次是柠檬烯(F24)、1-辛烯-3-醇(F17)。因此, 反,反-2,4-癸二烯醛、芳樟醇、柠檬烯、1-辛烯-3-醇可以作为区分坨坨猪肉的重要风味物质, 同时也说明在PC1上得分较高的坨坨肉样品含有较高的脂肪氧化源风味, 而在PC2上得分较高的坨坨肉样品含有较高的香辛料源风味。该结果与GC-MS分析结果一致。

### 3 结论

电子鼻检测结果与GC-MS的结果互相印证, 不同厂家制作的坨坨猪肉样品中挥发性成分存在差异, LDA是辨别坨坨猪肉中挥发性成分差异的快速有效检测方法。

基于HS-SPME-GC-MS-O联用技术, 市售坨坨肉样品中共测定出45种挥发性化合物, 其中共有12种风味, 主要由醛、醇、酮、烯炔类及杂环类化合物构成; OAV $\geq$ 1的风味物质共有27种, 包括醛类14种、醇类6种、酮类1种、烯炔类4种、硫醚类1种、呋喃类1种。共有的化合物为8种, 分别为己醛、庚醛、辛醛、反-2-庚烯醛、壬醛、反-2-辛烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇, 这8种脂肪族化合物是坨坨肉的主要风味物质, 对样品的总贡献度分别达到71.16%、92.23%、93.12%、86.28%, 其中, 反,反-2,4-癸二烯醛在4组样品中的贡献度最大。另外, 在A和D组样品中检测到源自香辛料的香气化合物, 如左旋香芹酮、蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、右旋柠檬烯、反- $\beta$ -罗勒烯, 柠檬醛、丙硫醇、桉树醇、芳樟醇, 它们的贡献度分别达到12.71%~28.58%, 以芳樟醇和右旋柠檬烯为主, 以上9种香辛料源香气物质和共有的8种脂肪氧化源物质贡献度达到99%左右, 构成了坨坨肉的整体风味。

基于27种主体风味化合物, 不同样品在PCA图中的分布呈现明显的变化趋势, 且分离良好, 反,反-2,4-癸二烯醛在PC1上载荷较高, 芳樟醇在PC2上载荷最高, 其次是柠檬烯、1-辛烯-3-醇。因此, 反,反-2,4-癸二烯醛、芳樟醇、柠檬烯、1-辛烯-3-醇作为区分坨坨肉的重要风味物质。

### 参考文献:

[1] 白雪, 杨爽, 孟鑫. 电子鼻结合顶空固相微萃取-气质联用法分析微生物脂肪酶对猪肉风味的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 246-252. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.22.048.

[2] ZHANG D Y, SHI Z, SONG Y L, et al. Analysis of volatile components during potherb mustard (*Brassica juncea*, Coss.) pickle fermentation using SPME-GC-MS[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(3): 439-447. DOI:10.1016/j.lwt.2005.12.002.

[3] CHOI H S, MIN K C. Aroma-active compounds of *Elsholtzia splendens* using AEDA and HS-SPME-GC-O dilution analysis[J]. Flavour & Fragrance Journal, 2010, 23(1): 58-64. DOI:10.1002/ffj.1856.

[4] 臧明伍, 张凯华, 王守伟, 等. 基于SPME-GC-O-MS的清真酱牛肉加工过程中挥发性风味成分变化分析[J]. 食品科学, 2016, 37(12): 117-121. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201612020.

[5] 庞雪莉, 胡小松, 廖小军, 等. FD-GC-O和OAV方法鉴定哈密瓜香气活性成分研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(6): 174-182.

[6] PANG X L, GUO X F, QIN Z H, et al. Identification of aroma-active compounds in Jiashi muskmelon juice by GC-O-MS and OAV calculation[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2012, 60(60): 4179-4185. DOI:10.1021/jf300149m.

[7] HAI Z, WANG J. Detection of adulteration in camellia seed oil and sesame oil using an electronic nose[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2006, 108: 116-124. DOI:10.1002/ejlt.200501224.

[8] 柴春祥, 杜利农. 电子鼻检测猪肉新鲜度的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(4): 444-447. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2008.09.102.

[9] ANTHUS H G, WANG J, HU G, et al. Monitoring storage shelf life of tomato using electronic nose technique[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(4): 625-631. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2007.06.039.

[10] ZHOU J J, FENG T, YE R. Differentiation of eight commercial mushrooms by electronic nose and gas chromatography mass spectrometry[J]. Journal of Sensors, 2015: 1-14. DOI:10.1155/2015/374013.

[11] NURJULIANA M, MAN Y B C, HASHIM D M, et al. Rapid identification of pork for halal authentication using the electronic nose and gas chromatography mass spectrometer with headspace analyzer[J]. Meat Science, 2011, 88(4): 638-644. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.02.022.

[12] 王炳蔚, 杨璐, 郑丽敏, 等. 基于统计空间映射和电子鼻的猪肉风味物质检测[J]. 食品科学, 2016, 37(8): 102-107. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201608018.

[13] 田梦云, 谢定源, 任婧楠, 等. 固相微萃取条件优化及扣肉风味物质分析[J]. 食品科技, 2019, 44(8): 304-310.

[14] 周慧敏, 张顺亮, 成晓瑜, 等. 食盐用量对风干猪肉挥发性风味物质的影响[J]. 肉类研究, 2017, 31(4): 23-28. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201704005.

[15] 周慧敏, 张顺亮, 赵冰, 等. 吹扫/捕集-热脱附-气质联用比较分析长白山黑猪和瘦肉型猪肉的挥发性风味物质[J]. 肉类研究, 2017, 31(3): 45-50. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201703009.

[16] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201822006.

[17] VANDENDOOL H, KRATZ P D. A generalization of the retention index system including linear temperature programmed gas-liquid partition chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 1963, 11(C): 463-471. DOI:10.1016/S0021-9673(01)80947-X.

[18] Flavornet[DB/OL]. <http://www.flavornet.org/flavornet.html>. 2004.

[19] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: "ROAV"法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370-374.

[20] VAN GEMERT L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. 2th ed. Zeist: Oliemans Punter & Partners BV, 2011: 242-342.



- [21] DASHMAA D, CHO B W, ODKHUU G, et al. Meat quality and volatile flavor traits of Duroc, Berkshire and Yorksire breeds[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2011, 31(6): 807-816. DOI:10.5851/kosfa.2011.31.6.807.
- [22] WANG Y, SONG H L, ZHANG Y, et al. Determination of aroma compounds in pork broth produced by different processing methods[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2016, 31(4): 319-328. DOI:10.1002/ffj.3320.
- [23] OLIVARES A, NAVARRO J L, FLORES M. Effect of fat content aroma generation during processing of dry fermented sausages[J]. Meat Science, 2011, 87(3): 264-273. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.10.021.
- [24] ADAB S E, HASSOUNA M. Proteolysis, lipolysis and sensory characteristics of a tunisian dry fermented poultry meat sausage with oregano and thyme essential oils[J]. Journal of Food Safety, 2016, 36(1): 19-32. DOI:10.1111/jfs.12209.
- [25] AN K, ZHAO D, WANG Z, et al. Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure[J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt B): 1292-1300. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.11.033.
- [26] YANG X G. Aroma constituents and alkylamides of red and green huajiao (*Zanthoxylum bungeanum* and *Zanthoxylum schinifolium*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(5): 1689-1696. DOI:10.1021/jf0728101.
- [27] BILLER E, BOSELLI E, OBIEDZINSKI M, et al. The profile of volatile compounds in the outer and inner parts of broiled pork neck is strongly influenced by the acetic-acid marination conditions[J]. Meat Science, 2016, 121: 292-301. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.06.029.
- [28] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 微波复热时间对预制猪肉饼过熟味、脂肪氧化和水分布特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 50-56. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190816-173.
- [29] ARN H, ACREE T E. Flavornet: a database of aroma compounds based on odor potency in natural products[J]. Developments in Food Science, 1998, 40(98): 27. DOI:10.1016/S0167-4501(98)80029-0.
- [30] 潘见, 杨俊杰, 邹英子. 不同涂层SPME与GC-MS联用比较分析两种猪肉挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2012, 33(12): 169-172.
- [31] 张哲奇, 臧明伍, 张凯华, 等. 蒸制时间对粉蒸肉挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(12): 205-211. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201812032.
- [32] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 水浴复热时间对猪肉糜制品挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 186-191. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180727-325.