

# 标准化工艺条件下大河乌猪火腿发酵过程中的挥发性风味物质变化

李钰芳<sup>1</sup>, 施娅楠<sup>1</sup>, 魏光强<sup>1</sup>, 李祥<sup>2</sup>, 黄艾祥<sup>1\*</sup>

(1. 云南农业大学食品科学技术学院, 云南昆明 650201) (2. 云南东恒经贸集团有限公司, 云南曲靖 655000)

**摘要:** 该研究采用固相微萃取-气相色谱-质谱 (solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS) 技术结合偏最小二乘-判别分析 (PLS-DA) 和相对气味活度值 (relative odor activity value, ROAV) 对发酵 90 d、150 d、210 d、270 d、450 d 和 630 d 的大河乌猪火腿的挥发性风味物质进行分析。结果表明: 发酵过程中共鉴定到 137 种挥发性风味成分, 包括醛、醇、酸、烃、酮、酯、芳香族类及其他类化合物, 其中, 醛类 (51.63%~68.17%) 和醇类 (12.73%~23.64%) 的种类和含量最为丰富; 随着发酵时间的延长, 挥发性风味物质种类增加了 23 种, 但四个不同发酵期 (210 d、270 d、450 d、630 d) 的大河乌猪火腿中挥发性风味物质组成相似, 说明发酵至 210 d 时主体风味化合物已经形成; 发酵过程中关键风味物质有 1-庚醇、3-甲基-1-丁醇、3-甲基丁醛、2,3-辛二酮、苯乙醛、己醛、辛醛、壬醛等 16 种。标准化工艺条件下发酵时间对火腿挥发性风味物质的形成有一定的影响, 且大河乌猪火腿的加工期可定为 10~12 个月, 研究为大河乌猪火腿标准化加工技术提供理论依据。

**关键词:** 大河乌猪火腿; 挥发性风味成分; 偏最小二乘-判别分析; 相对气味活度值; 固相微萃取-气相色谱-质谱联用

文章编号: 1673-9078(2021)12-240-251

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.12.0333

## Changes of Volatile Flavor Substances in the Fermentation of Dahe Black Pig Ham under Standardized Technological Conditions

LI Yufang<sup>1</sup>, SHI Ya'nan<sup>1</sup>, WEI Guangqiang<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>2</sup>, HUANG Aixiang<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

(2. Yunnan Dongheng Economic and Trade Group Co. Ltd., Qujing 655000, China)

**Abstract:** Solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS) technology combined with partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) and relative odor activity value (ROAV) were used to analyze the volatile flavor compounds of Dahe black pig ham fermented for 90 d, 150 d, 210 d, 270 d, 450 d and 630 d. The results showed that a total of 137 volatile flavor components were identified during the fermentation process, including aldehydes, alcohols, acids, hydrocarbons, ketones, esters, aromatics, and other compounds. Among them, aldehydes (51.63% ~ 68.17%) and alcohols (12.73% ~ 23.64%) were the most abundant in type and content. The types of volatile flavor substances increased (by 23 types) with the extension of the fermentation time, but the compositions of volatile flavor substances in the Dahe black pig ham fermented for different time periods (210 d, 270 d, 450 d, 630 d) resembled. This result indicated that the principal flavor compounds were formed after fermentation for 210 days. The 16 key flavor substances were detected during the fermentation process, including 1-heptanol, 3-methyl-1-butanol, 3-methylbutanal, 2,3-octanedione, phenylacetaldehyde, hexanal, octanal, and other substances. The fermentation time under the standardized process conditions had a certain impact on the formation of volatile flavor compounds in ham, and the

引文格式:

李钰芳, 施娅楠, 魏光强, 等. 标准化工艺条件下大河乌猪火腿发酵过程中的挥发性风味物质变化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 240-251

LI Yufang, SHI Ya'nan, WEI Guangqiang, et al. Changes of volatile flavor substances in the fermentation of Dahe black pig ham under standardized technological conditions [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 240-251

收稿日期: 2021-03-27

基金项目: 云南省发改委云岭产业技术领军人才[云发改人事(2014)1782号]; 云南省专家基层科研工作站研发项目[云人社发(2017)38号]; 云南省万人计划“产业技术领军人才”专项(云发改人事(2019)274号)

作者简介: 李钰芳(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食物新资源开发与乳品科学, Email: yufangfangli@126.com

通讯作者: 黄艾祥(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食物新资源开发与乳品科学, Email: aixianghuang@126.com

processing period of Dahe black pig ham can be set to 10~12 months. The research provides a theoretical basis for standardized processing of Dahe black pig ham.

**Key words:** Dahe black pig ham; volatile flavor components; partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA); relative odor activity value (ROAV); solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS)

大河乌猪是由云南富源大河猪与“杜洛克”公猪杂交育成的国家级新品种,肌肉间脂肪含量高达5%,以肉质优良、营养丰富、风味独特而著称<sup>[1]</sup>,是生产优质火腿的理想材料。火腿风味是消费者判断其质量和可接受度的重要属性之一<sup>[2-3]</sup>,而发酵是火腿风味形成的关键阶段<sup>[4]</sup>,作为传统腌腊肉制品杰出代表的火腿,对其挥发性风味物质已经展开了大量研究。章建浩等<sup>[5]</sup>在传统工艺金华火腿中共检出78种挥发性风味物质,加工过程中醛和酮的相对含量逐渐降低,羧酸、酯、吡嗪和含硫化合物的相对含量逐渐增加;王媛婧等<sup>[6]</sup>发现传统工艺制作的宣威火腿随着发酵成熟时间的延长火腿的特征性风味物质含量增加,风味趋好;Giovannelli等<sup>[7]</sup>比较了帕尔马、圣丹尼和托斯卡诺火腿发酵过程中理化、形态和芳香特征的演变,发现随着加工时间延长,火腿风味物质更加丰富,香气进化明显;施娅楠等人<sup>[8]</sup>发现传统工艺条件下大河乌猪火腿随着发酵期的延长,风味成分的含量逐渐增加。

我国传统干腌火腿属于自然发酵肉制品,生产工艺复杂且标准化程度较低,其生产过程均在自然条件下进行,通常是按季节、气候控制生产时间,对环境温度、湿度、用盐量、腌制时间等因素的控制并不精准且生产者技术经验也存在较大差异,很大程度上限制了火腿的品质和统一性,这也是造成国内干腌火腿与国际干腌火腿存在差距的最重要原因之一<sup>[9]</sup>。西式火腿大多采用标准化工艺对火腿进行加工,通过控温、控湿等功能,保证火腿在加工过程中始终处于最佳环境中,减少火腿变质情况,缩短发酵时间<sup>[10]</sup>,能够保证火腿的品质。

标准化工艺条件即在低温高湿(3±1℃、RH=85%~90%)条件下对火腿进行冷凉后熟、修割整形、上盐腌制等加工,并在中温高湿(6±1℃、RH=70%~75%)脱水平衡,最后高温高湿(23±1℃、RH=65%)下发酵产香得到成熟火腿。本研究以标准化工艺条件生产的大河乌猪火腿为研究对象,研究发酵时间(90 d、150 d、210 d、270 d、450 d、630 d)对火腿挥发性风味物质的影响,以期为大河乌猪火腿的标准化、科学化生产奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

大河乌猪火腿 10±1 kg,云南东恒经贸集团有限公司提供。

### 1.2 仪器与设备

火腿标准化生产车间,云南东恒经贸集团有限公司;固相微萃取装置及SPME萃取头(50/30 μm DVB/CAR/PDMS),美国supelco公司;7890A-5975C气相色谱-质谱联用仪,美国agilent公司;JJ-2BS组织捣碎机,常州崢嵘仪器有限公司;超低温冰箱,艾本德(上海)国际贸易有限公司;20 mL透明顶空萃取瓶,上海安谱科学仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 大河乌猪火腿的标准化生产工艺

172只新鲜后腿→冷凉后熟18 h(3±1℃、RH=85~90%)→修割整形→上盐腌制24 d(腌制方法:采用上盐堆码干腌制,按每只鲜腿重的5.5%称取食盐,再按食盐总重50%、30%、20%比例,分别在第1、3、5 d搓揉上盐并翻堆后堆码腌制;腌制条件:3±1℃、RH=85~90%)→中温脱水平衡60 d(6±1℃、RH=70%~75%)→高温发酵产香90 d-630 d(23±1℃、RH=65%)→成熟火腿

#### 1.3.2 火腿采样

从发酵时间为(90 d、150 d、210 d、270 d、450 d、630 d)的6个组中分别随机抽取4只火腿,共计24只火腿,将半膜肌和股二头肌按1:1的比例混合,组织捣碎机搅碎后真空包装并保存在-20℃备用,每个发酵周期结束后立即对样品进行测定。

#### 1.3.3 挥发性风味物质萃取及GC-MS条件

顶空固相微萃取条件:参照Huan等<sup>[11]</sup>的方法,称取肉样5.00 g于20 mL顶空瓶中;将老化后的50/30 μm萃取头插入顶空瓶上部,于50℃吸附40 min,吸附后的萃取头取出后插入GC进样口,于210℃解析5 min,同时启动仪器采集数据。

GC-MS参数参考郇延军等<sup>[12]</sup>和Petričevića等<sup>[3]</sup>的方法并稍作修改。GC条件:色谱柱:DB-5 MS毛细色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);升温程序:40℃保持5 min,以5℃/min升至90℃,再以12℃/min升至250℃并保持7 min;载气He(纯度≥99.999%);

流速 1.0 mL/min; 进样口温度 250 °C; 进样量 0.5 μL; 分流比 1:30。

MS 条件: 传输线温度 280 °C, 离子源 EI, 离子源温度 230 °C, 四极杆温度 150 °C, 电子能量 70 eV, 质量扫描范围 50~450 *m/z*。

### 1.3.4 挥发性风味物质的鉴定

参照王勇勤等<sup>[13]</sup>和高韶婷等<sup>[14]</sup>的方法对挥发性物质进行定性和定量分析。

挥发性物质的定性: 将测得各挥发物的谱图与 NIST 2008 和 Wiley 9 谱库中标准物质的谱图进行比对, 仅报道正反匹配度均大于 800 (最大值为 1000) 的结果; 同时计算各挥发物的保留指数 (retention index, RI) 并与文献中的 RI 进行比对, RI 的计算公式如下式:

$$RI = \left( \frac{Rt_{(x)} - Rt_{(n)}}{Rt_{(n+1)} - Rt_{(n)}} + n \right) \times 100$$

式中:

$Rt_{(x)}$ —待测挥发性成分的保留时间, min;

$Rt_{(n)}$ —含  $n$  个碳原子正构烷烃的保留时间, min;

$Rt_{(n+1)}$ — $n+1$  个碳原子正构烷烃的保留时间, min。

挥发性物质的定量: 采用峰面积归一化法。

### 1.3.5 关键挥发性物质评定方法<sup>[15]</sup>

采用相对香气活度值法 (relative odor activity value, ROAV),

$$ROAV_i \approx 100 \times \frac{C_i}{T_i} \times \frac{T_{stan}}{C_{stan}}$$

式中:

$ROAV_i$ —某挥发性风味物质的相对气味活度值;

$C_i$ —某挥发性风味物质的相对含量;

$T_{stan}$ —气味贡献最大挥发性风味物质的阈值;

$C_{stan}$ —气味贡献最大挥发性风味物质的相对含量;

$T_i$ —某挥发性风味物质的阈值。

## 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 以峰面积归一化法, 计算各挥发性化合物的相对含量, 结果输出形式以  $x \pm s$  计。SIMCA 14.1 进行偏最小二乘—判别分析 (PLS-DA) 分析。

## 2 结果分析

### 2.1 大河乌猪火腿发酵过程中挥发性化合物的变化

大河乌猪火腿在发酵过程中挥发性风味成分变化

见表 1 和表 2, 发酵过程中共鉴定到 137 种挥发性化合物, 发酵的 6 个时期 (90 d、150 d、210 d、270 d、450 d 和 630 d) 挥发性风味成分种类分别为 45、31、62、54、72、68 种, 主要以醛类 (51.63%~68.17%)、醇类 (12.73%~23.64%) 和烃类 (1.50%~15.50%) 为主, 它们的变化初步反映了火腿风味的形成过程。

火腿中已鉴定出的醛类包括直链醛、二醛、烯醛、支链醛和芳香醛 5 种类型, 不论猪肉或羊肉火腿, 醛类物质是被分离鉴定出的含量最丰富、种类最多的挥发性风味物质<sup>[16-17]</sup>。醛类是大河乌猪火腿每个发酵阶段都占优势的 1 种挥发性风味成分, 6 个发酵期醛类物质含量都超过挥发性风味成分总量的一半以上, Sabio 等<sup>[18]</sup>研究发现, Bayonne、Corsican、Iberian、Parma 和 Serna 火腿中的醛类物质在挥发性风味成分中占比最多, 其含量达 50% 以上, 要萍等<sup>[19]</sup>研究发现以传统方法加工的宣威火腿中最丰富的挥发性风味物质为醛类物质, 与本研究结果类似。在大河乌猪火腿 6 个发酵期中醛类含量最丰富的是己醛 (13.01%~40.15%), 其次是壬醛 (1.01%~15.17%), 壬醛是油酸的氧化产物<sup>[20]</sup>, 能够带来高度愉快的甜味或果香风味特征, 己醛是亚油酸的氧化产物<sup>[21]</sup>, 呈现清香的青草气味, 此研究结果与伊斯特拉火腿和宣威火腿的风味物质相似<sup>[22-23]</sup>。发酵至 210 d 时, 火腿中的醛类物质有 18 种, 在 6 个发酵期中种类最丰富, 比发酵 90 d 时新增 7 种醛类物质, 该结果与碛碛火腿<sup>[24]</sup>的发酵过程相似, 碛碛火腿发酵至 225 d 时比发酵初期新增加 7 种醛类物质, 说明发酵时间对醛类物质的产生有一定的影响。

醇类物质大多数来源于脂质氧化分解, 因为原料肉中醇含量不高<sup>[25]</sup>, 在火腿的整个发酵过程中, 发酵至 210 d 时醇类物质的相对含量最丰富, 其相对含量达到 23.64%, 从发酵 90 d 至 450 d, 醇类物质种类增加 8 种但相对含量减少 2.58%, 该结果与李诚<sup>[24]</sup>研究的碛碛火腿发酵过程中醇类物质相对含量从 10.0% 下降到 2.45% 的结果类似, 这可能是由于腌制时用盐量过多造成<sup>[26]</sup>, 在大河乌猪火腿发酵 210 d、270 d、450 d、630 d 四个时期含量最丰富是 1-辛烯-3-醇, 1-辛烯-3-醇阈值很低且能赋予食品蘑菇的香气, 是金华火腿中最重要的风味成分之一, 对火腿风味有非常重要的作用<sup>[27]</sup>。

大河乌猪火腿不同发酵期共鉴定得到 30 种烃类物质, 相对含量在 1.50%~15.50% 间波动, 发酵至 150 d 时, 能检测到的烃类物质只有 2,4-二甲基庚烷, 发酵至 630 d 时烃类物质种类最丰富, 共检测出 20 种烃类物质, 其相对含量为 14.66%。郑璞等<sup>[28]</sup>在传统工艺

加工的盘县火腿中共检测出 2 种烃类物质, 含量在 0.61 μg/kg 至 5.73 μg/kg 之间变化; 高韶婷等<sup>[14]</sup>在金华火腿中共检测到 6 种烃类物质, 相对含量在 0.01%~

0.02%之间; 与盘县火腿和金华火腿相比, 大河乌猪火腿中的烃类物质较多, 但由于烃类物质的阈值较大, 一般认为对腌腊制品的风味贡献不大<sup>[29-30]</sup>。

表 1 发酵过程中火腿挥发性风味成分

Table 1 Volatile flavor components of ham in the process of ham fermentation

化合物种类	编号	保留时间/min	化合物	相对含量/%					
				90 d	150 d	210 d	270 d	450 d	630 d
醛类	A1	3.67	3-甲基-丁醛	-	11.08±0.88	0.99±0.01	1.86±0.01	5.28±0.03	5.78±0.02
	A2	4.76	缬草醛	-	4.54±1.19	0.76±0.20	0.30±0.44	0.69±0.06	-
	A3	7.13	己醛	20.57±3.16	40.15±5.00	25.36±4.28	15.91±4.10	22.95±0.95	13.01±0.29
	A4	9.90	庚醛	6.22±0.67	5.36±0.02	3.26±0.28	3.72±1.15	3.96±1.64	6.28±0.12
	A5	12.9	辛醛	8.44±1.25	1.19±0.80	5.17±2.32	9.45±1.87	7.03±1.48	7.51±0.03
	A6	13.77	(E)-2-庚烯醛	-	-	0.27±0.14	-	-	-
	A7	14.01	2-乙-2-己烯醛	-	-	0.35±0.18	-	-	-
	A8	15.33	壬醛	13.03±0.96	1.01±0.05	9.34±3.54	10.59±1.31	15.17±5.32	10.98±0.93
	A9	15.99	2-辛烯醛	0.40±0.06	0.09±0.04	0.56±0.10	0.71±0.42	0.19±0.06	0.47±0.30
	A10	17.08	3-甲硫基丙醛	-	-	-	0.18±0.30	-	-
	A11	17.48	癸醛	1.28±0.22	-	-	-	1.66±0.56	3.46±0.01
	A12	17.54	苯甲醛	0.95±0.14	0.72±0.00	1.16±0.37	2.97±0.01	1.19±0.02	3.15±0.01
	A13	17.76	(E)-2-壬烯醛	0.27±0.00	0.04±0.00	0.25±0.09	-	-	-
	A14	19.22	苯乙醛	-	-	0.48±0.48	-	0.58±0.86	1.13±0.15
	A15	19.74	(E)-2-癸烯醛	-	-	-	2.45±0.01	-	-
	A16	20.65	2-十一烯醛	0.51±0.01	-	0.14±0.04	-	-	-
	A17	21.34	2,4-癸二烯醛	-	-	0.08±0.01	-	-	-
	A18	21.96	(E,E)-2,4-癸二烯醛	-	-	-	0.14±0.14	-	-
	A19	23.66	癸醛	0.33±0.17	-	0.01±0.00	-	0.30±0.27	0.70±0.50
	A20	23.66	正十五碳醛	-	-	-	0.08±0.08	-	-
	A21	24.70	十八醛	3.18±0.04	4.01±0.81	0.46±0.00	4.73±0.09	0.97±0.26	1.26±0.73
	A22	25.32	十六醛	-	-	2.84±0.02	2.57±0.03	0.89±0.02	-
	A23	26.64	桃醛	-	-	-	1.62±0.74	0.06±0.07	-
醇类	B1	4.65	乙醇	3.55±0.77	-	0.94±0.44	0.07±0.02	-	-
	B2	9.09	1-丁醇	-	-	0.07±0.01	-	0.07±0.07	-
	B3	9.67	1-戊-3-醇	-	0.68±0.03	0.16±0.17	-	0.17±0.01	-
	B4	10.98	桉树醇	0.72±0.01	-	-	-	0.14±0.01	-
	B5	11.23	3-甲基-1-丁醇	0.68±0.21	1.27±0.58	1.12±0.07	0.12±0.01	0.11±0.05	-
	B6	12.41	1-戊醇	2.54±1.87	7.09±0.02	4.98±2.39	1.13±0.15	2.65±0.57	1.59±0.94
	B7	14.94	1-己醇	1.37±0.84	2.01±0.01	5.02±4.47	0.98±0.16	1.50±0.656	1.32±0.36
	B8	15.60	2-丁基-1-辛醇	0.21±0.04	-	-	-	-	-
	B9	17.03	1-辛烯-3-醇	6.54±0.40	2.72±0.81	6.85±0.36	6.45±0.76	4.36±0.56	4.93±0.86
	B10	17.14	1-庚醇	1.2±0.14	1.05±0.53	1.73±0.39	1.06±0.65	1.16±0.20	1.21±0.59
	B11	17.61	异辛醇	-	-	-	-	0.06±0.05	-
	B12	17.70	2-乙基己醇	-	-	0.27±0.02	0.09±0.01	0.05±0.00	-
	B13	18.02	3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇	-	0.36±0.02	0.95±0.06	-	-	-
	B14	18.11	1-辛醇	1.18±0.29	-	-	-	1.69±0.57	2.31±1.14
	B15	18.24	芳樟醇	2.25±0.08	-	-	-	0.94±0.03	-

续表 1

化合物种类	编号	保留时间/min	化合物	相对含量/%					
				90 d	150 d	210 d	270 d	450 d	630 d
	B16	18.49	4-乙基环己醇	-	-	-	-	0.16±0.18	-
	B17	18.77	4-萜烯醇	0.37±0.10	-	0.16±0.01	-	0.18±0.08	-
	B18	18.96	2,3-丁二醇	-	1.71±0.05	0.58±0.07	0.33±0.02	0.82±0.07	0.46±0.05
	B19	19.29	二甲基硅烷二醇	-	1.55±0.02	-	3.18±1.22	2.82±0.28	-
	B20	19.32	(Z)-2-辛烯-1-醇	-	-	-	-	-	0.46±0.05
	B21	19.39	(E)-2-辛烯-1-醇	0.44±0.01	-	0.57±0.03	1.57±0.45	0.45±0.06	0.29±0.09
	B22	20.26	2-(2-甲基丙烯)环己醇	-	-	-	-	0.09±0.01	-
	B23	20.61	$\alpha$ -松油醇	-	-	-	-	0.04±0.01	-
	B24	22.46	苯乙醇	-	-	0.18±0.08	-	-	-
	B25	22.68	苯甲醇	-	-	-	0.17±0.00	-	0.15±0.08
	B26	24.35	4-戊基丁四醇	-	-	-	-	0.04±0.01	-
烃类	C1	2.69	2,4-二甲基庚烷	1.98±0.83	2.41±0.09	0.77±0.04	-	-	-
	C2	2.74	辛烷	-	-	-	-	3.30±0.91	1.24±0.35
	C3	2.98	3-亚甲基庚烷	-	-	-	-	-	0.06±0.02
	C4	4.79	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	9.49±0.08	-	-	-	-	1.90±0.08
	C5	5.17	7-甲基-十三烷	-	-	-	-	0.20±0.01	-
	C6	5.18	3-甲基壬烷	-	-	-	-	-	1.68±0.15
	C7	5.59	2,2,7,7-四甲基辛烷	-	-	-	-	-	0.11±0.13
	C8	5.91	2,5,9-三甲基癸烷	1.00±0.02	-	-	-	-	-
	C9	5.97	2,6,8-三甲基癸烷	-	-	-	-	-	0.89±0.02
	C10	6.66	2,6-二甲基辛烷	0.39±0.03	-	-	-	-	0.31±0.02
	C11	6.71	1-癸烯	-	-	-	-	0.26±0.01	0.67±0.02
	C12	6.98	(Z)-5-三癸烷	-	-	-	-	-	0.12±0.01
	C13	6.98	5-乙基癸烷	-	-	-	-	-	0.35±0.02
	C14	7.24	十四烷	-	-	-	-	1.99±0.78	1.75±0.37
	C15	7.6	2,6,7-三甲基癸烷	-	-	-	-	0.52±0.02	-
	C16	8.18	十一烷	-	-	-	-	3.60±0.17	0.32±0.52
	C17	8.94	4-乙基-辛烷	-	-	-	-	0.18±0.05	0.20±0.15
	C18	9.53	2,3-二甲基十一烷	-	-	-	-	-	1.60±0.19
	C19	9.56	3-甲基十一烷	0.53±0.02	-	-	-	-	1.23±0.04
	C20	10.79	十二烷	1.08±0.12	-	-	-	0.06±0.01	-
	C21	12.43	苯乙烯	-	-	-	-	-	0.43±0.04
	C22	12.81	对伞花烃	-	-	-	1.85±0.90	-	0.39±0.04
	C23	15.26	3-甲基-十三烷	0.21±0.03	-	-	-	0.32±0.02	0.02±0.01
	C24	15.91	6-甲基-十八烷	0.52±0.01	-	-	-	-	-
	C25	16.42	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	-	-	-	0.13±0.13	-	-
	C26	17.33	十六烷	-	-	0.37±0.15	-	0.35±0.04	0.41±0.03
	C27	17.87	1,1,3,3-四乙氧基丙烷	-	-	0.26±0.03	9.85±0.62	-	0.99±0.15
	C28	17.93	十九烷	0.31±0.06	-	-	-	0.10±0.01	-
	C29	18.27	(3E,5E)-3,5-辛二烯	-	-	0.11±0.00	-	0.02±0.00	-
	C30	24.28	1,2-环氧十六烷	-	-	-	-	0.03±0.01	-

续表 1

化合物种类	编号	保留时间/min	化合物	相对含量/%					
				90 d	150 d	210 d	270 d	450 d	630 d
酯类	D1	6.78	苯乙酸异戊酯	-	-	-	-	0.33±0.03	-
	D2	9.19	丙烯酸-2-乙基己酯	-	-	-	0.21±0.05	-	-
	D3	10.98	癸酸乙酯	0.16±0.13	-	-	-	-	-
	D4	11.23	己酸乙酯	1.10±0.01	0.06±0.02	0.51±0.25	0.04±0.07	0.78±0.30	4.44±0.65
	D5	12.41	乙酸烯丙酯	-	-	1.70±0.27	-	-	-
	D6	14.94	辛酸乙酯	0.20±0.11	-	-	0.07±0.12	0.26±0.05	0.25±0.28
	D7	16.73	甲酸辛酯	0	0.26±0.04	1.57±0.17	2.00±0.01	-	-
	D8	17.14	肉桂酸甲酯	-	-	-	-	-	0.10±0.11
	D9	19.5	$\gamma$ -己内酯	-	-	0.20±0.01	-	0.16±0.11	-
	D10	19.71	$\gamma$ -丁内酯	-	-	-	-	0.09±0.01	-
	D11	19.84	$\gamma$ -壬内酯	-	-	0.06±0.00	-	0.07±0.04	0.16±0.01
	D12	21.45	乳酸乙酯	-	-	-	-	-	1.77±0.68
	D13	22.46	$\gamma$ -十二内酯	-	-	0.17±0.02	-	-	-
酮类	E1	2.57	丙酮	-	-	7.59±0.20	-	-	-
	E2	3.87	2-丁酮	-	-	-	-	0.47±0.00	0.22±0.03
	E3	9.95	5-甲基-2-庚酮	-	-	1.66±0.84	-	-	-
	E4	12.71	3-羟基-2-丁酮	-	4.93±1.07	0.94±0.13	-	0.36±0.00	0.14±0.01
	E5	13.22	3-辛烯-2-酮	0.19±0.01	-	-	0.16±0.00	-	-
	E6	13.83	2,3-辛二酮	3.18±0.64	1.36±0.42	2.67±0.46	2.69±0.02	2.61±0.95	2.73±0.18
	E7	14.12	6-甲基-5-庚烯-2-酮	1.26±0.04	-	0.57±0.09	0.76±0.06	0.35±0.28	-
	E8	14.85	甲基庚烯酮	-	-	-	-	-	0.82±0.08
	E9	15.25	2-壬酮	-	-	-	-	0.15±0.07	0.24±0.18
	E10	18.64	异佛尔酮	-	-	0.64±0.06	-	-	-
	E11	22.12	香叶基丙酮	0.16±0.01	-	-	-	-	-
酸类	F1	17.20	醋酸	-	0.52±0.14	0.52±0.03	-	0.18±0.12	-
	F2	18.84	异丁酸	-	-	-	0.17±0.10	-	-
	F3	19.05	丁酸	0.28±0.16	1.40±0.80	0.48±0.38	0.65±0.17	-	0.45±0.08
	F4	19.60	3-甲基丁酸	0.34±0.12	0.43±0.00	0.60±0.16	0.74±0.08	0.18±0.13	-
	F5	20.44	戊酸	-	0.14±0.07	-	-	-	0.67±0.99
	F6	21.67	己酸	1.45±0.03	1.62±0.93	1.56±0.63	1.43±0.34	0.69±0.57	0.88±0.05
	F7	23.93	辛酸	-	0.17±0.08	0.18±0.09	0.56±0.18	0.12±0.02	0.39±0.25
	F8	25.86	苯甲酸	-	-	-	0.07±0.03	-	-
	F9	25.94	癸酸	-	-	0.08±0.06	0.44±0.19	0.19±0.20	0.22±0.02
	F10	26.95	棕榈酸	-	-	-	0.82±0.51	-	-
	F11	27.49	油酸	-	-	-	0.13±0.03	-	-
芳香族化合物	G1	6.52	甲苯	-	-	-	2.49±1.57	-	1.03±0.82
	G2	17.88	六氢间-4-二甲酚	-	-	-	-	-	0.26±0.09
	G3	20.30	苯甲酚	0.13±0.00	-	0.27±0.08	-	-	-
	G4	22.49	愈创木酚	-	-	-	-	0.03±0.00	-
	G5	24.15	4-甲基苯酚	-	-	0.08±0.00	0.13±0.08	0.06±0.01	0.14±0.01
	G6	25.01	丁香酚	0.43±0.04	-	0.27±0.10	-	0.03±0.01	-

续表 1

化合物种类	编号	保留时间/min	化合物	相对含量/%					
				90 d	150 d	210 d	270 d	450 d	630 d
	H1	4.57	亚硝基甲烷	-	-	-	-	2.57±0.17	-
	H2	10.65	1,1-二氟-十二烷	-	-	-	-	-	0.16±0.02
	H3	11.22	2-戊基咪喃	-	-	0.07±0.00	-	-	0.27±0.13
	H4	12.88	2-甲基吡嗪	-	-	-	-	-	0.13±0.01
	H5	13.63	氟化正戊烷	-	-	-	-	-	0.11±0.01
	H6	14.27	十二甲基-环六硅氧烷	0.12±0.08	-	-	0.12±0.01	-	-
	H7	14.72	2,6-二甲基吡嗪	-	-	-	0.83±0.01	0.23±0.01	1.60±0.14
	H8	14.84	2,3-二甲基吡嗪	-	-	-	-	-	0.25±0.02
其他	H9	16.78	3-乙氧基-1,1,1,7,7,7-六甲基-3,5,5-三硅氧烷	-	-	0.58±0.06	-	-	-
	H10	16.86	川芎嗪	-	0.10±0.01	0.07±0.01	0.16±0.01	0.42±0.05	-
	H11	17.5	4-甲基吡嗪	-	-	-	-	0.17±0.09	0.30±0.03
	H12	19.27	十六烷基环八硅氧烷	-	-	-	0.07±0.00	-	-
	H13	20.04	2-乙基四氢-5-甲基咪喃	-	-	-	-	-	-
	H14	20.13	3-(1-环戊烯基)咪喃	-	-	-	-	-	-
	H15	21.46	六甲基环三硅氮烷	-	-	-	0.33±0.01	0.05±0.00	1.09±0.02
	H16	22.20	八甲基环四硅氧烷	-	-	-	0.26±0.01	-	-
	H17	22.40	十甲基环五硅氧烷	-	-	0.21±0.01	0.45±0.01	0.13±0.01	0.12±0.01

注: -表示未检出该物质; 相对含量计算方法(峰面积归一化法): 每只火腿所测得所有成分的峰面积相加得到总面积, 用单个成分的峰面积除以总面积, 即得到各成分的相对含量。

表 2 火腿发酵过程中挥发性风味成分的种类及相对含量

Table 2 Variety and relative content of volatile flavor components during ham fermentation

种类	90 d		150 d		210 d		270 d		450 d		630 d	
	种类数量	相对含量/%	种类数量	相对含量/%	种类数量	相对含量/%	种类数量	相对含量/%	种类数量	相对含量/%	种类数量	相对含量/%
醛类	11	56.21±1.43	10	68.17±2.77	18	51.63±2.34	15	56.27±1.45	14	60.93±2.39	12	53.69±0.92
醇类	12	20.06±0.50	9	18.44±0.87	14	23.64±1.16	11	16.13±0.35	20	17.48±0.58	9	12.73±0.31
烃类	9	15.50±0.29	1	2.41±0.00	4	1.50±0.19	3	12.31±2.05	13	10.92±0.62	20	14.66±0.50
酯类	3	1.46±0.33	2	0.32±0.01	6	4.20±0.45	4	2.32±0.52	6	1.70±0.12	5	6.71±2.51
酮类	4	4.04±0.26	2	6.29±1.32	6	14.06±0.96	3	3.62±0.61	5	3.93±0.66	5	4.14±0.56
酸类	3	2.06±0.41	6	4.27±0.35	6	3.92±0.24	9	5.01±0.17	5	1.36±0.17	5	2.60±0.27
芳香族化合物	2	0.56±0.02	0	0.00±0.00	2	0.35±0.01	2	2.62±0.00	3	0.11±0.01	3	1.43±0.04
其他	1	0.12±0.08	1	0.09±0.00	5	0.79±0.02	7	2.05±0.04	6	3.57±0.04	9	4.04±0.37
合计	45	100.01	31	99.99	62	100.09	54	100.33	72	100	68	100

注: 相对含量计算方法(峰面积归一化法): 每只火腿所测得所有成分的峰面积相加得到总面积, 用单个成分的峰面积除以总面积, 即得到各成分的相对含量。

酯类由游离脂肪酸和肌肉组织内脂类氧化产生的醇反应生成, 代表成熟肉制品的风味, 对火腿风味特征有较大贡献。大河乌猪火腿中共检测出 13 种酯类物质, 发酵至 210 d 酯类物质种类最多, 乔发东等<sup>[31]</sup>研究发现随着宣威火腿加工时间的延长, 酯类物质种类

增加, 与本研究结果类似, 发酵时间可能对酯类物质的形成有一定的影响。其次, 内酯类物质对火腿的风味具有非常重要的作用, 赵冰等<sup>[32]</sup>检测出  $\gamma$ -己内酯、 $\gamma$ -丁内酯为特级金华火腿中的特征风味物质, 在大河乌猪火腿中共检测出 4 种内酯类物质 ( $\gamma$ -丁内酯、 $\gamma$ -

己内酯、 $\gamma$ -十二内酯、 $\gamma$ -壬内酯)，且都是发酵至 210 d 才开始被检出，推测内酯类物质可能受发酵时间影响较大。

酮类物质具有青香气味或奶油味、果香味，其中不饱和酮是动物特征味和植物油脂味的来源，是干腌火腿风味的重要组成部分<sup>[33]</sup>。大河乌猪火腿发酵的 6 个阶段，酮类物质相对含量和种类不断变化，发酵至 210 d 时酮类物质相对含量和种类最丰富，共检测到 6 种酮类物质，相对含量为 14.06%。酮类物质作为一种羰基化合物，它的相对含量比醛类少，阈值也比同分子异构体的醛类物质高<sup>[30]</sup>，因此对于干腌火腿风味的贡献小于醛类，但有增强风味的作用。

酸类化合物主要可能来自于火腿中磷脂和总三酯酰甘油的降解，其阈值较高，对食品风味没有直接的影响<sup>[34]</sup>，大河乌猪火腿发酵成熟的六个时期酸类物质一直存在，相对含量在 1.36%~5.01% 间变化，种类呈先上升后下降的趋势，要萍等人<sup>[19]</sup>在宣威火腿中只有检测到一种酸类物质；章建浩等人<sup>[5]</sup>的研究发现，传统工艺金华火腿中酸类物质随着发酵的进行，酸类物质种类和相对含量都增加，与本研究结果不同，可能是由于工艺和猪肉品种引起的差异。

大河乌猪火腿中共检测到 6 种芳香族化合物，苯类物质同烷烃类一样具有较高的阈值，对火腿风味贡献较小<sup>[29]</sup>。其他类共检测出 17 种，包括呋喃、吡嗪和一些杂环化合物，且这些物质种类和含量都是随着发酵期的延长逐渐增加，吡嗪类化合物共检测到 4 种，主要来自于美拉德反应，是干腌火腿中重要的挥发性风味物质，通常赋予肉品坚果及烘烤香味<sup>[14]</sup>。

## 2.2 PLS-DA 分析发酵时间对大河乌猪火腿挥发性风味物质的影响

PLS-DA 结果（见图 1），累计  $R^2X=0.866$ ， $R^2Y=0.948$ ， $Q^2=0.807$ ，Hotelling 图显示（见图 2）所有样品均处于 95% Hotelling  $T^2$  置信区间内，没有发现“离群样本点”，说明该模型有较好的预测能力。从样本的聚集、离散程度看来，发酵至 210 d、270 d、450 d、630 d 的样本聚集在一起，说明这四个时期挥发性风味物质的组成相似，主体风味成分在发酵至 210 d 就已基本形成，传统工艺发酵的大河乌猪火腿在发酵至 210 d 时主体风味成分已基本形成，与本实验结果类似<sup>[8]</sup>。PLS-DA 是基于降维的多维向量分析方法，与 PCA 不同的是，PLS-DA 为有监督的分析，可以预设分类，弥补了 PCA 方法的不足，强化组间的差异，同时可以量化特征化合物造成组分差异的程度<sup>[35-36]</sup>。

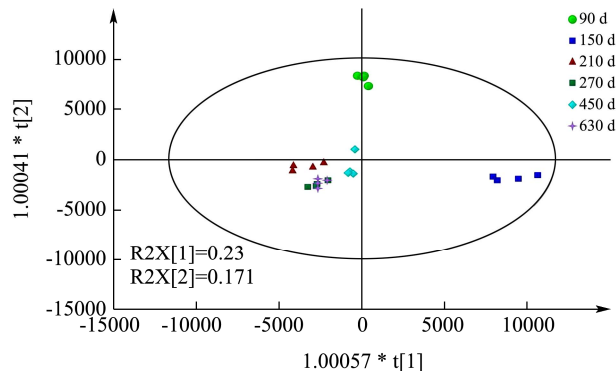


图 1 发酵过程中挥发性风味成分 PLS-DA 得分图

Fig.1 PLS-DA score map of volatile flavor components during fermentation

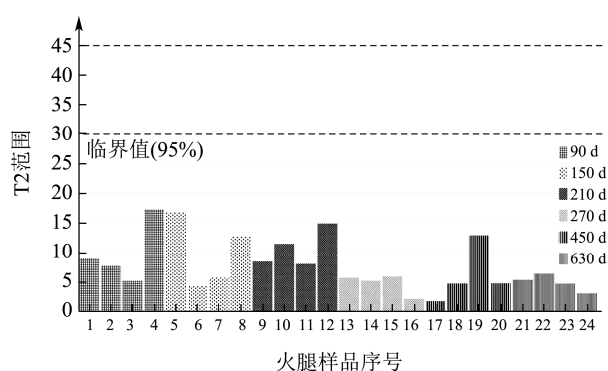


图 2 发酵过程中挥发性风味成分 Hotelling  $T^2$  分布图

Fig.2 Distribution of Hotelling  $T^2$  of volatile flavor component during fermentation

## 2.3 ROAV 分析发酵时间对大河乌猪火腿关键风味物质的影响

如表 3 所示，大河乌猪火腿的关键风味化合物（ $ROAV \geq 1$ ）有 16 种：1-庚醇、3-甲基-1-丁醇、3-甲基丁醛、桉树醇、2,3-辛二酮、2,4-癸二烯醛、苯乙醛、己醛、辛醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛、1-辛烯-3-醇、2-辛烯醛、芳樟醇、庚醛、2-戊基呋喃，与金华火腿和伊比利亚火腿的关键风味化合物类似<sup>[37-38]</sup>，与唐静等人<sup>[9]</sup>研究的强化高温火腿中的 11 种特征关键风味化合物相似。在发酵的六个时期火腿的关键风味化合物（ $ROAV \geq 1$ ）种类分别为：11 种、9 种、13 种、9 种、12 种、11 种，其中，1-庚醇、2,3-辛二酮、庚醛、己醛、辛醛、壬醛、2-辛烯醛存在于大河乌猪火腿发酵的六个时期，除了未查到阈值的化合物，在大河乌猪火腿成熟的六个发酵时期中， $ROAV$  值最大的均为醛类，已有研究证明，醛具有较低的气味阈值，存在于较高的数量，对于干腌火腿的整体风味起着重要的作用<sup>[39-40]</sup>。

由表 3 可知，发酵至 90 d，火腿中  $ROAV$  值较大的是壬醛、辛醛和芳樟醇，分别为 316.76、293.25、



248.29; 发酵至 150 d, 火腿中 ROAV 值较大的是 3-甲基丁醛、己醛和庚醛, 分别为 689.76、100、22.26; 发酵 210 d, 火腿中 ROAV 值较大的是壬醛、辛醛、己醛, 分别为 184.26、145.76、100.00; 发酵 270 d、450 d、630 d, 火腿中 ROAV 值较大物质均为 3-甲基丁醛、辛

醛和壬醛, 是大河乌猪火腿的特征性风味物质, 3-甲基丁醛几乎是所以干腌火腿中的关键风味化合物, 而辛醛和壬醛是金华火腿的主体风味成分, 己醛则是如皋火腿的主体风味物质<sup>[41]</sup>, 说明大河乌猪火腿的主体风味物质与金华火腿和如皋火腿有相似之处。

表 3 火腿发酵过程中挥发性成分气味贡献表

Table 3 Odor contribution of volatile components during ham fermentation

序号	保留时间/min	化合物名称	阈值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )*	ROAV					
				90 d	150 d	210 d	270 d	450 d	630 d
1	17.14	1-庚醇	3.00	9.89	4.36	11.39	11.15	8.38	15.49
2	11.23	3-甲基-1-丁醇	4.00	4.12	3.94	5.51	0.91	0.57	-
3	10.98	桉树醇	1.10	15.96	-	-	-	2.83	-
4	13.83	2,3-辛二酮	2.52	30.64	6.71	20.89	33.59	22.56	41.55
5	21.96	2,4-癸二烯醛	0.07	-	-	22.26	-	-	-
6	19.22	苯乙醛	4.00	-	-	2.38	-	3.18	10.88
7	9.90	庚醛	3.00	50.39	22.26	21.42	38.97	28.76	80.37
8	3.67	3-甲基丁醛	0.20	-	689.76	98.01	292.91	574.68	1108.80
9	7.13	己醛	5.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
10	12.90	辛醛	0.70	293.25	21.21	145.76	424.23	218.57	411.70
11	15.33	壬醛	1.00	316.76	12.54	184.26	332.85	330.25	421.75
12	15.99	2-辛烯醛	3.00	3.24	0.36	3.68	7.46	1.40	5.95
13	17.76	(E)-2-壬烯醛	0.10	66.12	5.54	49.30	-	-	-
14	18.24	芳樟醇	0.22	248.29	-	-	-	92.50	-
15	17.03	1-辛烯-3-醇	1.00	-	-	80.18	202.65	94.83	189.47
16	11.22	2-戊基呋喃	5.80	-	-	0.25	-	-	1.76
17	12.71	3-羟基-2-丁酮	55.00	-	1.12	0.34	-	0.14	0.10
18	14.85	甲基庚烯酮	68.00	-	-	-	-	-	0.46
19	11.23	己酸乙酯	3000.00	0.01	-	-	-	0.01	0.06
20	12.43	苯乙烯	65.00	-	-	-	-	-	0.25
21	19.74	(E)-2-庚烯醛	13.00	-	-	0.41	-	-	-
22	17.54	苯甲醛	350.00	0.07	0.03	0.07	0.27	0.07	0.34
23	22.49	愈创木酚	0.84	-	-	-	-	0.75	-
24	6.52	甲苯	200.00	-	-	-	0.39	-	0.20
25	19.60	3-甲基丁酸	130.00	0.06	0.04	0.09	0.18	0.03	-
26	12.41	1-戊醇	4000.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
27	14.72	2,6-二甲基吡嗪	200.00	-	-	-	0.13	0.03	0.31
28	19.32	(Z)-2-辛烯-1-醇	40.00	-	-	-	-	-	0.44
29	18.11	1-辛醇	110.00	0.26	-	-	-	0.33	0.81
30	14.94	1-己醇	250.00	0.13	0.10	0.40	0.12	0.13	0.20

注:\*气味阈值来自文献<sup>[42-43]</sup>; -表示未检出该物质; 仅列出 ROAV $\geq$ 0.1 的物质。

### 3 结论

标准化工艺条件下的大河乌猪火腿在发酵过程中共鉴定到 137 种挥发性风味成分, 包括醛、醇、酸、烃、酮、酯、芳香族类及其他类化合物。发酵 210 d、

270 d、450 d、630 d 的大河乌猪火腿中挥发性风味物质组成相似, 说明 210 d 的发酵期火腿的主体风味物质已基本形成, 大河乌猪火腿的加工期可定为 10~12 个月; 发酵过程中关键风味物质有 1-庚醇、3-甲基-1-丁醇、3-甲基丁醛、桉树醇、2,3-辛二酮、2,4-癸二烯

醛、苯乙醛、己醛、辛醛、壬醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛、1-辛烯-3-醇、2-辛烯醛、芳樟醇、庚醛、2-戊基呋喃等 16 种, 其中对风味贡献较大的三种物质为 3-甲基丁醛、辛醛和壬醛, 是大河乌猪火腿的特征性风味物质。研究为大河乌猪火腿标准化加工技术提供理论依据。

### 参考文献

- [1] 朱静静,吕志华,黄艾祥,等.大河乌猪火腿加工过程中的质量变化[J].肉类工业,2019,2:21-24  
ZHU Jingjing, LYU Zhihua, HUANG Aixiang, et al. Quality changes during the processing of Dahe black pig ham [J]. Meat Industry, 2019, 2: 21-24
- [2] 赵改名,柳艳霞,田玮,等.金华火腿中挥发性风味物质形成过程及变化规律研究[J].食品与发酵工业,2007,33(5):120-125  
ZHAO Gaiming, LIU Yanxia, TIAN Wei, et al. Study on the formation process and change law of volatile flavor compounds in Jinhua ham [J]. Food and Fermentation Industries, 2007, 33(5): 120-125
- [3] Petričević Sandra, Marušić Radovčić, Nives, et al. Differentiation of dry-cured hams from different processing methods by means of volatile compounds, physico-chemical and sensory analysis [J]. Meat Science, 2018, 137: 217-227
- [4] Sánchez-peña Carolina M, Luna Guadalupe, Aparicio Ramón, et al. Characterization of French and Spanish dry-cured hams: influence of the volatiles from the muscles and the subcutaneous fat quantified by SPME-GC [J]. Meat Science, 2005, 69(4): 635-645
- [5] 章建浩,朱健辉,王莉,等.金华火腿传统工艺过程挥发性风味物质的分析研究[J].食品科学,2004,25(11):221-226  
ZHANG Jianhao, ZHU Jianhui, WANG Li, et al. Analysis of volatile flavor substances in Jinhua ham's traditional process [J]. Food Science, 2004, 25(11): 221-226
- [6] 王媛嫻.不同成熟时期宣威火腿品质及营养的研究[D].大连:大连工业大学,2016  
WANG Aidi. Study on the quality and nutrition of Xuanwei ham in different maturity periods [D]. Dalian: University of Technology, 2016
- [7] Giovanelli, Gabriella, Buratti, et al. Evolution of physicochemical, morphological and aromatic characteristics of Italian PDO dry-cured hams during processing [J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(7): 1117-1127
- [8] SHI Yanan, LI Xiang, HUANG Ai-xiang. A metabolomics-based approach investigates volatile flavor formation and characteristic compounds of the Dahe black pig dry-cured ham [J]. Meat Science, 2019, 158: 107904
- [9] 唐静,张迎阳,章建浩,等.顶空吹扫捕集-气相色谱-质谱法分离鉴定强化高温火腿中的挥发性风味物质[J].食品科学,2014,35(8):115-120  
TANG Jing, ZHANG Yingyang, ZHANG Jianhao, et al. Separation and identification of volatile flavor compounds in fortified high-temperature ham by headspace purge and trap-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2014, 35(8): 115-120
- [10] 范子超,杨延辰,丁有河,等.我国干腌火腿生产技术现状及展望[J].肉类工业,2019,1:48-57  
FAN Zichao, YANG Yanchen, DING Youhe, et al. Current status and prospects of dry-cured ham production technology in my country [J]. Meat Industry, 2019, 1: 48-57
- [11] HUAN Yanjun, ZHOU Guanghong, ZHAO Gaiming, et al. Changes in flavor compounds of dry-cured Chinese Jinhua ham during processing [J]. Meat Science, 2005, 71(2): 291-299
- [12] 郇延军,周光宏,徐幸莲,等.不同等级金华火腿风味特点研究[J].食品科学,2006,27(6):39-45  
HUAN Yanjun, ZHOU Guanghong, XU Xinglian, et al. Study on the flavor characteristics of different grades of Jinhua ham [J]. Food Science, 2006, 27(6): 39-45
- [13] 王勇勤,郭新,黄笠原,等.基于电子鼻和气相色谱-质谱联用技术分析不同贮藏时间羊肉火腿香气成分[J].食品科学,2019,40(2):215-221  
WANG Yongqin, GUO Xin, HUANG Liyuan, et al. Analysis of aroma components of mutton ham at different storage times based on electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry technology [J]. Food Science, 2019, 40(2): 215-221
- [14] 高韶婷,宋雪,陈乐,等.基于固相萃取整体捕集剂-气相色谱-质谱金华火腿挥发性风味物质分析[J].食品科学,2015,36(22):113-116  
GAO Shaoting, SONG Xue, CHEN Le, et al. Analysis of volatile flavor compounds of Jinhua ham based on solid phase extraction as a whole collector-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2015, 36(22): 113-116
- [15] 谭椰子.我国三大干腌火腿脂肪挥发性风味及其吸附研究[D].南京:南京农业大学,2018  
TAN Yezi. Study on the fat volatile flavor and adsorption of three major dry-cured hams in my country [D]. Nanjing:

- Nanjing Agricultural University, 2018
- [16] 陈旭. 金华火腿晾挂发酵阶段抗氧化活性及风味的研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015  
CHEN Xu. Study on antioxidant activity and flavor of Jinhua ham during drying and fermentation stage [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2015
- [17] 郭黎洋. 山羊腿干腌发酵成熟工艺及脂质分解氧化、风味变化规律研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008  
GUO Liyang. Study on dry pickled fermentation and maturation technology of goat leg, lipid decomposition and oxidation, and flavor changes [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008
- [18] Sabio E, Vidal-aragon M C, Bernalte M J, et al. Volatile compounds present in six types of dry-cured ham from south European countries [J]. Food Chemistry, 1998, 61(4): 493-503
- [19] 要萍, 乔发东, 闫红, 等. 宣威火腿挥发性风味成分的分离与鉴定[J]. 食品科学, 2004, 2: 146-150  
YAO Ping, QIAO Fadong, YAN Hong, et al. Isolation and identification of volatile flavor components of Xuanwei ham [J]. Food Science, 2004, 2: 146-150
- [20] 郇延军. 金华火腿加工过程中脂类物质及风成分变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005  
HUAN Yanjun. Study on the changes of lipids and wind components during the processing of Jinhua ham [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005
- [21] 贝雷. 油脂化学与工艺学[M]. 徐生庚, 裘爱泳, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 2001  
BEI Lei. Oleochemistry and Technology [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001
- [22] Marušić Nives, Vidaček Sanja, Janči Tibor, et al. Determination of volatile compounds and quality parameters of traditional Istrian dry-cured ham [J]. Meat Science, 2014, 96(4): 1409-1416
- [23] WANG Wenli, FENG Xi, ZHANG Danni, et al. Analysis of volatile compounds in Chinese dry-cured hams by comprehensive two-dimensional gas chromatography with high-resolution time-of-flight mass spectrometry [J]. Meat Science, 2018, 140: 14-25
- [24] 李诚, 张静, 付刚. 晓碛火腿发酵过程中挥发性风味成分的变化[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 405-409  
LI Cheng, ZHANG Jing, FU Gang. Changes of volatile flavor components in moraine ham during fermentation [J]. Food Science, 2010, 31(24): 405-409
- [25] 文志勇, 孙宝国, 梁梦兰, 等. 脂质氧化产生香味物质[J]. 中国油脂, 2004, 29(9): 41-44  
WEN Zhiyong, SUN Baoguo, LIANG Menglan, et al. Lipid oxidation produces aroma substances [J]. China Oils and Fats, 2004, 29(9): 41-44
- [26] WANG Jiamei, JIN Guofeng, ZHANG Wangang, et al. Effect of curing salt content on lipid oxidation and volatile flavour compounds of dry-cured turkey ham [J]. LWT - Food Science and Technology, 2012, 48(1): 102-106
- [27] 夏博能. 传统工艺与现代工艺金华火腿的品质比较研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016  
XIA Boneng. A comparative study on the quality of traditional and modern Jinhua ham [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016
- [28] 郑璞, 苏伟, 母雨, 等. 盘县火腿自然发酵过程中理化和风味特征[J]. 肉类研究, 2020, 34(9): 59-67  
ZHENG Pu, SU Wei, MU Yu, et al. Physical, chemical and flavor characteristics of ham during natural fermentation in Panxian county [J]. Meat Research, 2020, 34(9): 59-67
- [29] 陈旭. 金华火腿晾挂发酵阶段抗氧化活性及风味的研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015  
CHEN Xu. Study on the antioxidant activity and flavor of Jinhua ham during drying and fermentation [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2015
- [30] Toldra F. Proteolysis and lipolysis in flavour development of drycured meat products [J]. Meat Science, 1998, 49(1): 101-110
- [31] 乔发东, 马长伟. 宣威火腿加工过程中挥发性风味化合物分析[J]. 食品研究与开发, 2006, 3: 24-29  
QIAO Fadong, MA Changwei. Analysis of volatile flavor compounds in Xuanwei ham processing [J]. Food Research and Development, 2006, 3: 24-29
- [32] 赵冰, 张顺亮, 李素, 等. 不同等级金华火腿挥发性风味物质分析[J]. 肉类研究, 2014, 28(9): 7-10  
ZHAO Bing, ZHANG Shunliang, LI Su, et al. Analysis of volatile flavor compounds in different grades of Jinhua ham [J]. Meat Research, 2014, 28(9): 7-10
- [33] 朱丹实, 吴晓菲, 王立娜, 等. 电子鼻结合气相色谱-质谱联用技术分析冷藏真鲷挥发性风味物质变化[J]. 中国食品学报, 2016, 16(12): 227-234  
ZHU Danshi, WU Xiaofei, WANG Lina. Studies on volatile compounds of red sea bream at cold storage by electronic nose coupled with and HS-SPME/GC-MS [J]. Journal of Chinese Institute of Science and Technology, 2016, 16(12): 227-234
- [34] 郭新, 卢士玲, 王斌, 等. 中国传统火腿风味分析研究进展[J].

- 粮食与油脂,2019,32(3):18-21  
GUO Xin, LU Shiling, WANG Bin, et al. Research progress in the analysis of traditional Chinese ham flavor [J]. Food and Fats, 2019, 32(3): 18-21
- [35] 刘盼盼,郑鹏程,龚自明,等.不同产地珠形绿茶色泽与滋味成分的差异分析[J].食品与发酵工业,2019,45(20):267-274  
LIU Panpan, ZHENG Pengcheng, GONG Ziming, et al. Analysis of the difference in color and taste of pearl-shaped green tea from different producing areas [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(20): 267-274
- [36] 尹洪旭,杨艳芹,姚月凤,等.基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析对不同栗香特征绿茶判别分析[J].食品科学,2019,40(4):192-198  
YIN Hongxu, YANG Yanqin, YAO Yuefeng, et al. Discriminant analysis of green tea with different chestnut fragrance characteristics based on gas chromatography-mass spectrometry technology and multivariate statistical analysis [J]. Food Science, 2019, 40(4): 192-198
- [37] Carrapiso Ana I, García Carmen. Iberian ham headspace: odorants of intermuscular fat and differences with lean [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2004, 84(15): 2047-2051
- [38] 刘笑生,杨政茂,杜闪,等.金华火腿皮下脂肪中气味活性化合物研究[J].中国食品学报,2014,14(9):239-246  
LIU Xiaosheng, YANG Zhengmao, DU Shan, et al. Study on odorant active compounds in subcutaneous fat of Jinhua ham [J]. Chinese Journal of Food Science, 2014, 14(9): 239-246
- [39] Ramírez R, Cava R. The crossbreeding of different Duroc lines with the Iberian pig affects colour and oxidative stability of meat during storage [J]. Meat Sci, 2007, 77: 339-47
- [40] 谭椰子,周光宏,徐幸莲,等.3个品牌干腌火腿皮下脂肪挥发性风味比较分析[J].食品科学,2019,40(16):185-192  
TAN Yezi, ZHOU Guanghong, XU Xinglian, et al. Comparative analysis of the volatile flavor of subcutaneous fat in three brands of dry-cured ham [J]. Food Science, 2019, 40(16): 185-192
- [41] 母雨,苏伟,母应春.直投式发酵剂的优化及其对火腿风味的影响[J].现代食品科技,2019,35(11):212-222  
MU Yu, SU Wei, MU Yingchun. Optimization of direct starter and its effect on ham flavor [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(11): 212-222
- [42] 冉渺,何腊平,朱秋劲.西式熏煮火腿在不同贮藏温度下细菌多样性和挥发性风味化合物分析[J].食品科学,2021,42(9):169-176  
RAN Miao, HE Laping, ZHU Qiujing. Analysis of bacterial diversity and volatile flavor compounds of western smoked-boiled ham at different storage temperatures [J]. Food Science, 2021, 42(9): 169-176
- [43] 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,2008,7:370-374  
LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. A new method to determine the key flavor compounds of food: "ROAV" method [J]. Food Science, 2008, 7: 370-374

---

(上接第 264 页)

- [40] Ho C, Zheng X, Li S. Tea aroma formation [J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9-27
- [41] Chen Q, Zhu Y, Dai W, et al. Aroma formation and dynamic changes during white tea processing [J]. Food Chemistry, 2019, 274: 915-924
- [42] Yang C, Hu Z, Lu M, et al. Application of metabolomics profiling in the analysis of metabolites and taste quality in different subtypes of white tea [J]. Food Research International, 2018, 106: 909-919
- [43] KANG Suyoung,朱荫,郑新强,等.不同季节绿茶香气成分的判别与聚类分析[J].食品科学,2018,39(14):268-275  
KANG Suyoung, ZHU Yin, ZHENG Xinqiang, et al. Multivariate statistical analysis of volatiles compounds in green teas from different harvesting seasons [J]. Food Science, 2018, 39(14): 268-275
- [44] 何丽梅.白茶色泽及香气的指纹图谱分析[D].福州:福建农林大学,2014  
HE Limei. The fingerprint analysis of white tea color and aroma [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture & Forestry University, 2014