

酱卤鸭脖的特征风味物质剖面解析

于恒和^{1,2}, 马一凡^{1,2}, 韩东², 黄峰², 李侠², 郭德斌³, 张春晖^{1,2*}

(1. 宁夏大学食品与葡萄酒学院, 宁夏银川 750021)(2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)(3. 江西煌上煌集团食品股份有限公司, 江西南昌 330052)

摘要: 为构建酱卤鸭脖的特征风味指纹图谱, 该文利用电子鼻、电子舌、气相色谱-质谱联用技术 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) 和高效液相色谱技术 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 结合气味活性值 (Odor Activity Value, OAV)、滋味活性值 (Taste Activity Value, TAV) 和味精当量 (Equivalent Umami Concentration, EUC), 对 3 款市售酱卤鸭脖 (W 牌、J 牌、H 牌) 的特征风味进行剖面解析。结果表明, W 牌、J 牌和 H 牌中分别鉴定出 44、37、32 种挥发性风味物质。其中丁香酚、芳樟醇、肉桂酸乙酯、茴香脑等因具有较高 OAV 和特殊香气被划定为 3 种鸭脖共有的特征挥发性风味物质, 可贡献甜香、果香和脂香。电子鼻结果则表明 3 种鸭脖在含硫化合物和氮氧化合物上存在差异; 谷氨酸、丙氨酸、5'-肌苷酸、5'-鸟苷酸因 TAV>1 被确定为 3 种酱卤鸭脖的特征滋味物质, 对鲜味和甜味贡献突出。此外, H 牌的 EUC 值 (4.41 g MSG/100 g) 显著高于其他两组 ($P<0.05$), 说明其鲜味程度优于 J 牌和 W 牌鸭脖, 这也与电子舌检测结果保持一致。该研究可以为酱卤鸭脖特色风味保持及产品风味改善提供理论依据。

关键词: 酱卤鸭脖; 特征挥发性风味物质; 特征滋味物质; 剖面解析

文章编号: 1673-9078(2024)03-259-271

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.3.0312

Profile Analysis of the Characteristic Flavor Substances of Soy-marinated Duck Neck

YU Henghe^{1,2}, MA Yifan^{1,2}, HAN Dong², HUANG Feng², LI Xia², GUO Debin³, ZHANG Chunhui^{1,2*}

(1. School of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

(2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Comprehensive Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

(3. Jiangxi Huangshanghuang Group Food Co. Ltd., Nanchang 330052, China)

Abstract: To construct the characteristic flavor fingerprints of soy-marinated duck neck, three commercially available soy-marinated duck necks (H brand, W brand and J brand) were analyzed by electronic nose, electronic tongue, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and high-performance liquid chromatography (HPLC), combined with odor activity value (OAV), taste activity value (TAV), and EUC (equivalent umami concentration). The results show that 44, 37 and 32 volatile flavor substances were identified in the W brand, J brand and H brand, respectively. Among them, compounds

引文格式:

于恒和, 马一凡, 韩东, 等. 酱卤鸭脖的特征风味物质剖面解析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 259-271.

YU Henghe, MA Yifan, HAN Dong, et al. Profile analysis of the characteristic flavor substances of soy-marinated duck neck [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 259-271.

收稿日期: 2023-03-14

基金项目: 江西省重大科技研发专项“揭榜挂帅”项目 (20213AAF02024)

作者简介: 于恒和 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品科学, E-mail: YHH13156056998@163.com

通讯作者: 张春晖 (1971-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 肉品科学, E-mail: dr_zch@163.com

such as eugenol, linalool, ethyl cinnamate and anethole were identified as the common characteristic volatile flavor substances because of their high OAVs and special aromas, which contributed to sweet, fruity, and fat aromas of the three types of duck necks. The results of electronic nose showed that three kinds of duck necks differed in sulfur-containing compounds and nitrogen oxides; Glutamic acid, alanine acid, 5'-inosinic acid and 5'-guanylic acid were identified as the characteristic taste substances of soy-marinated duck necks owing to their TAVs higher than 1, which contributed significantly to umami and sweetness. In addition, the EUC value of H brand (4.41 g MSG/100 g) was significantly higher than those of the other two groups ($P<0.05$), indicating that the umami of H brand duck neck was better than J brand and W brand duck necks. This result is also consistent with the results of the electronic tongue test. This study provides a theoretical foundation for maintaining the characteristic flavor of soy-marinated duck neck and improving the flavor of the product.

Key words: soy-marinated duckneck; characteristic volatile flavor substances; characteristic taste substances; profile analysis

我国的酱卤肉制品历史悠久且年消费量庞大, 现已在肉制品产业中位居第三位^[1]。鸭肉作为主要的肉制品之一, 营养价值高, 是不饱和脂肪酸和必需氨基酸的良好来源^[2]。随着鸭类卤制产品由整鸭加工向单一品类转型, 不同鸭肉部位制成的酱卤产品极大的丰富了市场^[3]。酱卤鸭脖作为其中热销产品之一, 因口感紧实、酱香味浓郁、方便即食等特点广受消费者青睐。目前有关酱卤鸭脖的研究主要集中在工艺优化、卤汤中香辛料主效成分检测及迁移规律解析、产品保质保鲜等方面。如刘书东^[4]通过优化真空低温卤制鸭脖的工艺参数, 减少了热处理过程中鸭脖的营养组分流失并有效提高了产品出品率。王宏勋等^[5]采用 HPLC 技术探究了辣椒主效成分在鸭脖卤制过程中的迁移规律, 结果也证实可以采用辣椒提取液卤制鸭脖产品, 以辣椒素和二氢辣椒素的含量变化来控制卤制过程。Li 等^[6]发现利用电子束辐照结合气调包装的方式对酱卤鸭脖进行处理, 可有效抑制冷藏期间鸭脖中总挥发性碱性氮和脂质氧化的增加。而有关酱卤鸭脖的风味研究只集中在如武汉精武鸭脖^[7]、周黑鸭酱卤鸭脖^[8]等地方特色产品上, 对于常见市售酱卤鸭脖的研究较少, 缺乏不同鸭脖品牌间的风味差异比较, 因此可开展不同市售酱卤鸭脖香气及滋味的研究, 以推进酱卤鸭脖产品风味品质的提升。

鸭脖经卤煮过程中数十种香辛料、调味料的调味被赋予独特的酱卤风味, 生肉固有的“鸭腥味”也得到改善^[9]，“酱香味”也成为影响消费者行为的重要因素, 因此风味是评价酱卤鸭脖品质优劣的重要指标^[10]。OAV、TAV 指香气物质、滋味物质与自身阈值(水中)的比值^[11]。一般认为比值大于 1 的物质对整体风味具有贡献^[12]。酱卤肉制品的特征风味体系构成复杂, 一般是气味和滋味共同作用的结

果^[13], 但通常仅有小部分风味化合物对其品质具有重要贡献。目前大量研究对酱卤牛肉^[10,14]、酱卤鸡腿^[15]、酱卤猪肉^[16]等常见酱卤肉制品的特征风味构成进行了表征, 如孙圳等^[17]通过计算气味活性值, 对定量卤制过程中鸡肉的气味物质进行剖面分析, 鉴定出 8 种关键香气物质, 其中起主体作用的反-2-癸烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛、正辛醛、1-辛烯-3-醇等多来自脂肪氧化和氨基酸的 Strecker 降解。李娟等^[10]根据 OAV 确定壬醛、芳樟醇、桉叶油醇、茴香脑、草蒿脑是 4 款酱卤牛肉的关键香气物质, 酯类、酮类物质可对香气起修饰作用; 游离氨基酸、核苷酸和小分子肽作为肉品中的主要呈味物质^[18], 除贡献鲜甜苦味外, 还可通过美拉德反应产生香气化合物^[19]。此外, 姜薇等^[14]、Zhou 等^[20]和 Wang 等^[21]表示白芷、小茴香、辣椒、姜黄等常见香辛料也能增强肉品的风味, 或是掩盖异味(肉腥味、粪便味等)^[9]。目前, 对于酱卤鸭脖风味物质构成的研究较少, 尚未见滋味物质方面的研究, 亟需开展风味解析方面的相关试验, 为酱卤鸭脖特色风味保持及科学调控提供理论支持。

因此, 本研究以酱卤鸭脖为研究对象, 选取原则基于《2022 年中国卤味熟食行业发展研究报告》中的数据支持, 选择综合评分位居前三的酱卤鸭脖品牌, 利用电子鼻、电子舌、GC-MS、HPLC 并结合 OAV、TAV、EUC 对鸭脖中的风味物质进行剖面解析, 筛选出具有显著贡献的特征风味成分, 构建酱卤鸭脖制品的风味指纹图谱, 为鸭脖产品风味的进一步研究和优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

选取 3 种市售的五香味酱卤鸭脖, 生产日期前后相差不超过 2 d, 购买后根据产品储藏条件暂存

待用。产品基本条件如表 1 所示；2-甲基-3-庚酮、邻二氯苯和 C₇-C₄₀ 正构烷烃，美国 Sigma-Aldrich 公司；AccQ·Tag 氨基酸试剂包，美国 Waters 公司；氨基酸标准品、核苷酸标准品，北京萃锋科技有限公司；三氯乙酸、高氯酸、氢氧化钠、氢氧化钾均为分析纯，磷酸二氢钾、乙腈均为色谱纯。

表 1 3种酱卤鸭脖的产品信息

Table 1 The product information of three kinds of soy-marinated duck neck

品牌简称	类型	包装类型	保质期/d	贮藏条件/℃
W牌	五香味	袋装	5	4
J牌	五香味	袋装	5	4
H牌	五香味	盒装	10	4

1.2 仪器与设备

PEN3 便携式电子鼻，德国 Airsense 公司；ASTREE 电子舌，法国 Alpha MOS 公司；高效液相色谱系统 (HPLC)，美国安捷伦科技公司；GC-MS-QP2010 Plus 气相色谱质谱联用仪，日本岛津公司；BSA423S 电子天平，赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司；Microfuge 20R Centrifuge 离心机，美国贝克曼库尔特有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

随机挑选 J 牌、W 牌、H 牌酱卤鸭脖各 3 袋共 9 份，将鸭脖去掉筋膜，剔骨后得到鸭肉并用粉碎机打成细小颗粒，放入真空袋中于 -80 ℃ 条件下冷冻备用。

1.3.2 GC-MS测定

参照强宇等^[22]的方法，并做适当调整。每个样本精确称量 3.0 g 酱卤鸭脖样品，转移到顶空瓶中。随后添加内标物 1.68 mg/mL 2-甲基-3-庚酮和 3.265 mg/mL 邻二氯苯各 1 mL，在 55 ℃ 下平衡样品 40 min。

GC 条件：使用日本岛津 GC-MS-QP2010 Plus 分析和鉴定香气物质，该仪器配备 DB-WAX 柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm)。挥发性物质在 250 ℃ 下解吸 4 min，使用无分流模式，载气氦气保持在 1.4 mL/min 的恒定流速。升温程序如下：初始温度保持在 40 ℃ 下 4 min，再以 4 ℃/min 的速率升至 100 ℃，然后增加 8 ℃/min 至 230 ℃，并恒定 8 min，传输线温度 250 ℃；MS 条件：EI 源，电子能量 70 eV，离子源温度为 250 ℃，45~550 u 的 m/z

扫描范围。

定性分析：通过使用正构烷烃混合物 (C₇-C₄₀) 计算线性保留指数 (LRI)，计算公式如下：

$$B=100 \times \frac{n+(T_x-T_n)}{T_{n+1}-T_n} \quad (1)$$

式中：

B——线性保留指数 (LRI)；

T_x——待测定气味化合物的保留时间；

T_n——烷烃 n 的保留时间；

T_{n+1}——烷烃 n+1 的保留时间 (T_n<T_x<T_{n+1})。

定量分析：采用内标法测定气味物质的含量。计算公式如下：

$$C=\frac{A_x \times C_0 \times V \times 1000}{A_0 \times m} \quad (2)$$

式中：

C——测定物质的含量，mg/kg；

A_x——测定物质的峰面积，mAu·s；

C₀——内标物质量浓度，mg/mL；

V——内物进样体积，mL；

A₀——添加的内标物峰面积，mAu·s；

m——测定样品质量，g。

1.3.3 电子鼻测定

参照杜晓兰等^[23]的方法，称取 2.0 g 样品于 20 mL 顶空瓶内，密封后备用。所有样品先于室温平衡 30 min，随后插入电子鼻探头吸取顶端气体。检测前传感器先置于干燥空气中平衡 180 s，检测时间为 60 s，并最终选取 48~52 s 时稳定的检测数据用以结果分析。每个处理组做 4 次平行重复。PEN3 电子鼻标准传感器阵列及其性能描述如表 2 所示。

表 2 电子鼻传感器名称及性能描述

Table 2 Sensory name and main properties of electronic nose

编号	传感器名称	性能描述
R1	W1C	对芳香性化合物敏感
R2	W5S	灵敏度大，对氮氧化物敏感
R3	W3C	对氨类和芳香性化合物敏感
R4	W6S	主要对氢化物有选择性
R5	W5C	对烯烃和芳香性化合物敏感
R6	W1S	对萜烯类化合物物质敏感
R7	W1W	对含硫化合物敏感
R8	W2S	对醇类、醛酮类敏感
R9	W2W	对芳香化合物和有机硫化物敏感
R10	W3S	对长链烷烃敏感

1.3.4 游离氨基酸含量测定

参考田欢^[24]的方法并做适当修改,称取 5.0 g 粉碎的酱卤鸭脖样品于离心管中,加入 20 mL 超纯水,在冰浴中 12 000 r/min 速率下匀浆,随后加入 20 mL 5% (V/V) 三氯乙酸溶液,振匀后于 4 °C 下放置 12 h;使用定性滤纸进行过滤,滤液用 4 mol/L KOH 调 pH 值至 6.0,超纯水定容至 50 mL 后,过 0.45 μm 水系微孔滤膜备用。取 10 μL 样品至棕色色谱瓶中,并加入 70 μL AccQ-Fluor Buffer 和 20 μL AccQ-Fluor,涡旋混合 10 s 并静置 1 min,放入烘箱 (55 °C) 加热 10 min,取出后置于液相的样品盘中,准备进样。

色谱条件:色谱柱 Nova-PakTM C18 柱,检测波长: 248 nm,柱温: 37 °C,流动相 A 为 AccQ-Tag Eluent A 和超纯水 (体积比 1:10),流动相 B 为乙腈 (色谱纯),流动相 C 为超纯水,流速 1.0 mL/min,进样量 10 μL。

1.3.5 呈味核苷酸含量测定

参照刘天天等^[25]的方法,并稍加修改。取 5.0 g 样品置于 50 mL 离心管中,加入 15 mL 为 5% (V/V) 的高氯酸溶液 (4 °C 下储存),12 000 r/min 均质 3 次后在 6 000 r/min 离心 5 min,收集上清液,滤渣加入 10 mL 5% 高氯酸振荡 5 min,再次离心后合并上清液。用 1 mol/L NaOH 调 pH 值至 6.5,过滤至 50 mL 容量瓶中定容摇匀后,取 1 mL 过 0.45 μm 的水系微孔滤膜。

色谱条件:色谱柱 Intersil ODS-3 (250 mm×4.6 mm, 5 μm),检测波长: 260 nm,柱温 30 °C,流动相为 0.02 mol/L 磷酸二氢钾溶液 (pH 值为 3.8),流速 1 mL/min,进样量 10 μL,平行测量三次。

1.3.6 电子舌测定

参照陶正清等^[14]和姜薇等^[18]的方法,并略加修改。将 3 组粉碎的酱卤鸭脖样品各称取 20.0 g 放于 250 mL 的锥形瓶中,每组样品加入 200 mL 超纯水后,在 50 °C 下水浴 20 min,随后以 10 000 r/min 离心 10 min,离心温度为 4 °C,取上清液抽滤,将滤液过 0.45 μm 的水系微孔滤膜后得到电子舌检测液。电子舌经过活化和校准后,取 100 mL 电子舌检测液加入到 125 mL 检测杯。单次采样时间 120 s,样品间采用超纯水清洗 10 s,采集周期为每秒 1 次,搅拌速率 3 r/s,室温下采集数据。每份酱卤鸭脖样品重复检测 7 次,并取后 4 次稳定的检测结果用于数据分析。ASTREE 电子舌标准传感器阵列及其性

能描述如表 3 所示。

表 3 电子舌传感器名称及性能描述

Table 3 Sensory name and main properties of electronic tongue

编号	传感器名称	性能描述
R1	AHS	对酸味敏感
R2	PKS	通用传感器
R3	CTS	对咸味敏感
R4	NMS	对鲜味敏感
R5	CPS	通用传感器
R6	ANS	对甜味敏感
R7	SCS	对苦味敏感

1.3.7 味精当量

参考李海^[15]的方法,味精当量 (EUC) 是表示呈味核苷酸 (5'-腺苷酸、5'-肌苷酸、5'-鸟苷酸) 与鲜味氨基酸 (天冬氨酸、谷氨酸) 混合时,所具有的协同作用能使鲜味增强,这种协同作用用 EUC 表示,计算公式如下:

$$Y = \sum a_i b_i + 1218 (\sum a_i b_i) (\sum a_j b_j) \quad (3)$$

式中:

Y ——样品的 EUC 值, g MSG/100 g;

1218——协同作用系数;

a_i ——天冬氨酸、谷氨酸的含量, g/100 g;

b_i ——天冬氨酸、谷氨酸相对于 MSG 的相对鲜度系数 (其中谷氨酸为 1, 天冬氨酸为 0.077);

a_j ——5'-肌苷酸、5'-鸟苷酸、5'-腺苷酸的含量, g/100 g;

b_j ——5'-肌苷酸、5'-鸟苷酸、5'-腺苷酸相对于 5'-肌苷酸的相对鲜度系数 (其中 5'-肌苷酸为 1, 5'-鸟苷酸为 2.3, 5'-腺苷酸为 0.18)。

1.4 数据分析

利用电子鼻、电子舌自带软件进行数据采集,使用 Origin 2021 软件绘制雷达图,并利用 Metaboanalyst 进行主成分分析。挥发性风味化合物和滋味化合物的相对含量采用 Microsoft Excel 2021 软件计算平均值和标准差,并借助 SPSS 27.0 统计分析软件进行方差分析和显著性分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 挥发性风味物质检测结果

2.1.1 挥发性风味物质分析

本研究利用 GC-MS 对 3 种酱卤鸭脖样品挥发性风味成分进行了定性分析,共检出 56 种挥发性化合物,包括醇类 12 种,萜烯类 9 种,酯类 10 种,

醛类 7 种, 酸类 5 种, 酚类 5 种, 酮类 4 种, 醚类 2 种, 杂环化合物类 2 种。由图 1a 可知, W 牌中共检测到 44 种挥发性风味物质, J 牌共 37 种, H 牌共 32 种。其中醇类化合物和萜烯类化合物的种类数量占比最高, 两者总量在 3 组鸭脖中分别达到 40.91%、37.83% 和 31.25%, 其次是酯类、酚类、酸类、醛类、酮类、醚类, 杂环化合物的种类最少 (占 0~4.55%)。由图 1b 可知, 酚类化合物总含量占据首位, 其次是萜烯类和醇类化合物, 酮类化合物含量位居第四位, 以上 4 类香气化合物是酱卤鸭脖的主要挥发性组分。3 种鸭脖的挥发性风味物质构成特点存在差异, J 牌鸭脖中萜烯类物质的含量显著高于其他两组 ($P < 0.05$), 达到 5 564.55 mg/kg, 占比 30.68%, 其次是醚类、酚类; 且 J 牌中的醚类化合物含量显著高于其他两组 ($P < 0.05$), 含量达 3 173.38 mg/kg。H 牌鸭脖中萜烯类物质的含量为 2 413.79 mg/kg, 占比 26.38%, 其次是酚类、酮类。W 牌鸭脖中酚类物质的含量显著高于其他两组 ($P < 0.05$), 达到 14 408.41 mg/kg, 占比 43.20%, 其次是醇类、萜烯类。整体来看, W 牌酱卤鸭脖中挥发性化合物总含量 (33 097.37 mg/kg) 高于 J 牌 (18 135.96 mg/kg) 和 H 牌 (9 150.05 mg/kg), 这表明 W 牌酱卤鸭脖拥有更加丰富浓郁的香气。

醛酮化合物在高浓度时会产生较为刺激的气味, 但降低到合适范围内会产生愉悦的芳香^[7]。由表 4 可知, 3 组样品中包含 2 种相同的酮类化合物, 3-羟基-2-丁酮与米香味、奶油味相关, 2,4-二甲基苯乙酮具有薄荷清香、焦糖甜香。3-甲基环戊烷-1,2-二酮 (又称枫槭内酯) 在 J 牌、W 牌中的含量显著高于其他酮类物质 ($P < 0.05$), 可作为食品添加剂使用; 醛类化合物是多不饱和脂肪酸氧化降解或美拉德反应的衍生产物, 在肉品风味中起着至关重要的作用^[26]。3 组样品中共有的苯甲醛 (苦杏仁味) 和肉豆蔻醛 (油脂味) 是肉桂、肉豆蔻中的关键香气物质。在 J 牌和 H 牌中检测到的壬醛属直链脂肪族醛类, 是典型的“脂香味”风味化合物, Liu 等^[27]表示壬醛也是北京烤鸭中的芳香活性化合物。

在 5 种共有的醇类化合物中, 芳樟醇分别占到 W 牌、J 牌、H 牌中醇类总含量的 46.99%、53.06%、34.88%, 属链状萜烯醇类, 是 3 种酱卤鸭脖的重要香气物质。4-萜烯醇具有胡椒香、木质香。 α -松油醇具有薄荷香、水果香。苯乙醇具有玫瑰香。糠醇多产生于美拉德反应, 具有焦糖、白兰地的香气^[8]。W 牌中的橙花醇、香叶醇常见于茶叶、柠檬

等芳香植物, 气味清新并伴有花香、柑橘香^[28,29]。J 牌中的 1-辛烯-3-醇是脂肪氧化降解的产物, 2,3-丁二醇是酱油发酵的香气产物, 可与酸类物质经酯化反应生成增香作用的酯^[30], 前者具有蘑菇香, 后者具有蜂蜜香、玫瑰香。

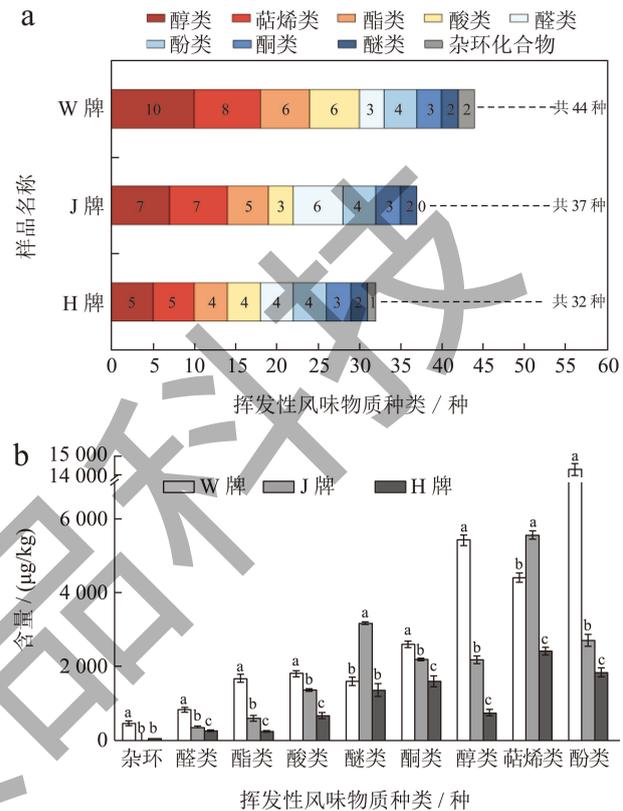


图 1 3 种酱卤鸭脖挥发性风味物质种类统计图 (a) 和含量统计图 (b)

Fig.1 Quantity statistics (a) and content statistics (b) of volatile flavor substances of three kinds of soy-marinated duck necks

注: 字母不同表示不同品牌酱卤鸭脖间该类挥发性风味物质的总含量差异显著 ($P < 0.05$)。

萜烯类化合物主要包含 α -姜黄烯、姜烯、石竹烯、 β -红没药烯等, 多来自香辛料, 因含量占比高且阈值普遍较低^[8], 对酱卤鸭脖的整体风味贡献显著。W 牌含有 8 种萜烯类化合物, J 牌含有 7 种, H 牌 5 种。这可能是在卤煮阶段从香辛料包中释放出, 并随卤汁迁移到鸭肉中而获得^[26]; 其中 α -姜黄烯在 W 牌、J 牌和 H 牌中含量达到 2 494.8、3 974.75 和 1 799.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 占到各自萜烯类化合物总含量的 56.59%、71.43%、77.76%, 具有草本芳香。姜烯在 3 组鸭脖中含量占比也较高, 属倍半萜烯类, 气味辛辣温暖, 是姜油中的活性成分。

酚类属芳香族化合物, 低阈值的特点促成其一般具有浓郁香气。乙基麦芽酚、丁香酚和苯酚共存

于3种鸭脖中,前两者含量远超其他酚类化合物,可对“酱卤香”的形成有重要影响。其中乙基麦芽酚作为常见的具有增香、增甜、去腥除异功能的食品添加剂,是W牌酱卤鸭脖中含量最高的酚类化合物,含量达到11 606.47 μg/kg,显著高于J牌和H牌($P<0.05$)。丁香酚是丁香中的主要活性成分,拥有强烈的丁香味、辛辣味和香甜味,尤其在苯酚含量相对较低,仅含18.52~28.25 μg/kg,但在大球盖菇中作为关键气味物质贡献了甜香味^[31]。

酯类化合物多以2-羟基丙酸乙酯、肉桂酸乙酯、十二酸乙酯、对甲氧基肉桂酸乙酯等乙酯为主,一般源于鸭肉中醇类和酸类的酯化反应或。乙酸芳樟酯和乙酸香叶酯只出现在J牌中,前者源于脂肪降解,是低盐鸭肉火腿中的关键香气成分^[32],后者为

花椒特征香气的关键贡献者。W牌中的己酸乙酯与白酒的“酯香”密切相关^[33]。虽然3种酱卤鸭脖中仅检测到茴香脑、草蒿脑两种醚类物质,但含量占比较高,具有甘草味、茴香味、甜香等令人愉悦的气味特征,也是茴香、八角的特征气味组分^[20]。

此外,鸭脖中还鉴定出2-乙酰基吡咯和2,3,5,6-四甲基吡嗪2种杂环化合物,通常源自美拉德反应,具有坚果、烤面包的香气,其中2-乙酰基吡咯是W牌的独有挥发性成分,但含量偏低可能对J牌和H牌整体香气仅起修饰作用。综上可知,酱卤鸭脖的主要挥发性风味化合物多来自酱卤料包中的香辛料、热加工过程中脂肪氧化降解、美拉德反应以及多种风味增强剂,这与Zhou等^[8]对另外一款酱卤鸭脖中挥发性物质的检测结果相似。

表4 3种酱卤鸭脖的GC-MS检测结果

Table 4 The results of GC-MS of three kinds of soy marinated duck necks

序号	保留时间/min	化合物名称	计算保留指数	参考保留指数	定性方式	含量/(μg/kg)		
						W牌	J牌	H牌
萜烯类化合物	1	月桂烯	1 145	1 160	MS, RI	210.175±11.08 ^a	—	—
	2	D-柠檬烯	1 174	1 198	MS, RI	243.16±7.97 ^a	139.70±3.70 ^b	—
	3	石竹烯	1 576	1 592	MS, RI	303.10±26.29 ^a	328.63±49.96 ^a	165.04±19.90 ^b
	4	γ-衣兰油烯	1 698	1 671	MS, RI	188.81±13.94 ^a	196.39±38.82 ^a	69.82±6.03 ^b
	5	姜烯	1 704	1 715	MS, RI	634.05±43.74 ^a	536.12±58.57 ^b	181.59±22.33 ^c
	6	β-红没药烯	1 711	1 721	MS, RI	262.03±25.27 ^a	287.37±68.35 ^a	98.28±9.35 ^b
	7	α-法尼烯	1 734	ND	MS	72.22±20.80 ^a	—	—
	8	α-姜黄烯	1 756	1 774	MS, RI	2 494.85±88.23 ^b	3 974.75±473.64 ^a	1 799.83±334.50 ^c
	9	反式-菖蒲烯	1 814	ND	MS	—	101.56±10.08 ^a	—
酮类化合物	10	3-羟基-2-丁酮	1 267	1 271	MS, RI	388.68±92.10 ^b	623.73±117.43 ^a	328.51±53.91 ^c
	11	3-甲基环戊烷-1,2-二酮	1 798	ND	MS	2 047.99±14.41 ^a	1 454.00±205.01 ^b	—
	12	2,4-二甲基苯乙酮	2 204	ND	MS	161.71±10.69 ^b	115.02±7.51 ^c	1 235.86±107.21 ^a
	13	苯乙酮	1 619	1 645	MS, RI	—	—	34.18±12.63 ^a
酸类化合物	14	乙酸	1 427	1 435	MS, RI	616.47±140.81 ^a	696.58±91.15 ^a	168.33±44.92 ^c
	15	丙酸	1 514	1 531	MS, RI	75.59±13.89 ^a	—	—
	16	2-苯基乙酯乙酸	1 790	ND	MS	101.51±4.99 ^a	—	—
	17	己酸	1 819	1 827	MS, RI	360.57±74.87 ^a	364.32±125.67 ^a	202.15±39.74 ^b
	18	辛酸	2 034	2 050	MS, RI	231.60±21.07 ^a	—	103.44±5.79 ^b
	19	苯甲酸	2 401	2 412	MS, RI	422.90±39.53 ^a	302.52±25.19 ^b	193.30±4.89 ^c
酚类化合物	20	甲基麦芽酚	1 943	1 968	MS, RI	537.79±41.76 ^a	—	14.36±0.32
	21	乙基麦芽酚	2 042	2 050	MS, RI	11 606.47±416.31 ^a	946.84±125.00 ^a	505.15±20.17 ^c
	22	反式异丁香酚	2 321	ND	MS	—	171.35±62.05 ^a	—
	23	丁香酚	2 140	2 146	MS, RI	2 116.84±94.11 ^a	1 738.06±285.35 ^b	1 130.74±50.71 ^c
	24	苯酚	1 975	1 978	MS, RI	38.29±1.51 ^a	23.73±4.62 ^b	19.52±0.58 ^c

续表4

序号	保留时间/min	化合物名称	计算保留指数	参考保留指数	定性方式	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)			
						W牌	J牌	H牌	
醇类化合物	25	芳樟醇	1 537	1 537	MS, RI	2 600.19 \pm 15.25 ^a	1 156.38 \pm 7.24 ^b	293.07 \pm 39.06 ^c	
	26	4- 萜烯醇	1 583	1 602	MS, RI	649.45 \pm 93.22 ^a	378.87 \pm 40.72 ^b	93.92 \pm 10.25 ^c	
	27	糠醇	1 636	1 659	MS, RI	744.17 \pm 58.98 ^a	159.47 \pm 15.61 ^c	220.68 \pm 21.48 ^b	
	28	α - 松油醇	1 678	1 688	MS, RI	621.62 \pm 45.31 ^a	295.92 \pm 60.39 ^b	99.21 \pm 8.66 ^c	
	29	橙花醇	1 782	1 784	MS, RI	114.23 \pm 8.92 ^q	—	—	
	30	香叶醇	1 829	1 847	MS, RI	363.31 \pm 4.07 ^q	—	—	
	31	二氢芳樟醇	1 837	ND	MS	101.62 \pm 71.90 ^q	—	—	
	32	苯乙醇	1 884	1 875	MS, RI	191.06 \pm 13.05 ^a	134.11 \pm 8.32 ^b	133.35 \pm 23.73 ^b	
	33	橙花叔醇	2 022	ND	MS	43.001 \pm 5.97 ^a	—	—	
	34	1- 辛烯 -3- 醇	1 440	1 456	MS, RI	—	27.71 \pm 1.03 ^a	—	
	35	2, 3- 丁二醇	1 559	1 544	MS, RI	—	26.82 \pm 2.05 ^a	—	
	36	1- 辛醇	1 548	1 558	MS, RI	104.52 \pm 4.71 ^a	—	—	
	醛类化合物	37	壬醛	1 375	1 388	MS, RI	—	42.18 \pm 3.09 ^a	34.38 \pm 4.78 ^b
		38	苯甲醛	1 491	1 494	MS, RI	112.82 \pm 10.98 ^a	71.68 \pm 3.13 ^b	70.25 \pm 5.47 ^b
		39	2,4- 二羟基苯甲醛	2 103	ND	MS	427.26 \pm 54.49 ^a	—	—
		40	肉豆蔻醛	1 944	1 940	MS, RI	286.19 \pm 28.86 ^a	64.89 \pm 11.27 ^b	72.22 \pm 6.53 ^b
41		2, 4- 癸二烯醛	1 789	ND	MS	—	45.41 \pm 1.69 ^a	—	
42		对甲氧基苯甲醛	1 995	2 011	MS, RI	—	115.64 \pm 6.35 ^a	86.39 \pm 8.15 ^b	
43		间苯二甲醛	2 350	2 341	MS, RI	—	13.35 \pm 0.62 ^a	—	
酯类化合物	44	乙酸芳樟酯	1 544	1 553	MS, RI	455.23 \pm 40.16 ^a	—	—	
	45	乙酸香叶酯	1 740	1 711	MS, RI	335.06 \pm 30.53 ^a	—	—	
	46	顺 -3- 己烯基肉桂酸酯	1 925	ND	MS	5.57 \pm 7.89 ^a	—	—	
	47	肉桂酸乙酯	2 107	2 095	MS, RI	777.85 \pm 34.26 ^a	397.60 \pm 61.39 ^b	163.15 \pm 22.29 ^c	
	48	二十酸乙酯	2 248	ND	MS	28.47 \pm 21.09 ^a	—	—	
	49	对甲氧基肉桂酸乙酯	2 608	ND	MS	62.37 \pm 3.55 ^b	68.79 \pm 7.72 ^a	25.04 \pm 3.02 ^c	
	50	正己酸乙酯	1 221	1 241	MS, RI	—	86.78 \pm 1.66 ^a	—	
	51	2- 羟基丙酸乙酯	1 330	1 340	MS, RI	—	24.01 \pm 1.94 ^a	24.47 \pm 7.35 ^a	
	52	乙酸丁香酚酯	2 320	ND	MS	—	23.47 \pm 7.34 ^a	20.33 \pm 2.81 ^a	
醚类化合物	53	草蒿脑	1 646	1 655	MS, RI	163.01 \pm 11.78 ^b	500.31 \pm 84.04 ^a	175.73 \pm 26.40 ^c	
	54	茴香脑	1 801	1 815	MS, RI	1 431.38 \pm 12.71 ^b	2 673.07 \pm 7.97 ^a	1 177.18 \pm 15.07 ^c	
		杂环化合物 (2 种)							
	55	2- 乙酰基吡咯	1 370	1 393	MS, RI	399.67 \pm 1.45 ^a	—	—	
56	2,3,5,6- 四甲基吡嗪	1 462	1 459	MS, RI	57.98 \pm 15.59 ^a	—	28.10 \pm 5.49 ^b		

注: ND 表示未查到该种香气物质的参考保留指数。“—”表示未检出该种挥发性风味物质。表中上标小写字母 abc 表示差异显著性 ($P < 0.05$)。挥发性风味物质的参考保留指数来自网站 <https://webbook.nist.gov/chemistry/>。

2.1.2 OAV分析

根据气味描述可将挥发性风味物质进行分类,但其对风味的贡献程度不能单一通过含量来判断,需要进一步结合自身阈值计算 OAV。3 种

酱卤鸭脖挥发性风味物质的 OAV 如表 5 所示,以 $\text{OAV} \geq 1$ 为筛选条件, J 牌包含 19 种主要气味活性物质, W 牌 18 种, H 牌 14 种。3 种鸭脖中共包含石竹烯、肉豆蔻醛、3- 羟基 -2- 丁酮、丁香

酚、苯酚、芳樟醇、糠醇、苯乙醇、 α -松油醇、肉桂酸乙酯、草蒿脑和茴香脑 12 种共有的气味活性物质。根据气味描述和气味强度 ($OAV > 10$), 将肉桂酸乙酯 (4 078.75~19 446.25)、乙基麦芽酚 (252.57~5 803.23)、丁香酚 (226.15~423.37)、苯酚 (29.6~58.58)、芳樟醇 (48.85~856.04)、苯乙醇 (133.35~191.06)、糠醇 (83.93~391.67)、 α -松油醇 (21.57~135.13)、茴香脑 (10.19~31.27)、草蒿脑 (78.48~178.20) 划定为市售酱卤鸭脖的特征挥发性风味物质, 整体具有甜香、果香和脂香的呈香特点, 对鸭脖的风味贡献显著。同样, W 牌中的 β -月桂

烯 (胡椒味)、D-柠檬烯 (柑橘香)、香叶醇 (玫瑰香)、乙酸香叶酯 (花香), J 牌中的 D-柠檬烯、3-羟基-2-丁酮 (奶油香)、1-辛烯-3-醇 (蘑菇香)、壬醛 (脂香)、2,4-癸二烯醛 (土豆香)、己酸乙酯 (果香) 以及 H 牌中的壬醛 OAV 均在 13.97~363.31 范围内, 因此对各自样品的香气也具有突出贡献。此外, 苯乙酮 (杏仁味、皮革味)、己酸 (略有酸臭味)、橙花叔醇 (玫瑰花香、苹果香)、苯甲醛 (苦杏仁味)、2-乙酰基吡咯 (核桃、烤面包香)、2,3,5,6-四甲基吡嗪 (坚果味), 因 $0.1 < OAV < 1$ 对整体风味仅起到修饰作用。

表 5 3 种酱卤鸭脖挥发性风味物质的 OAV Table 5 OAV of volatile flavor substances of three kinds of soy-marinated duck necks

序号	保留时间/min	化合物名称	阈值/ $\mu\text{g}/\text{kg}$	OAV			气味描述
				W 牌	J 牌	H 牌	
1	8.03	β -月桂烯	1.3	161.6	—	—	胡椒味、辛辣
2	9.02	D-柠檬烯	10	24.32	13.97	—	甜香、柑橘香
3	21.86	石竹烯	64	4.74	5.13	2.58	木质香、甜香、果香、丁香味
4	12.27	3-羟基-2-丁酮	55	7.07	11.34	5.97	奶油香味
5	22.76	苯乙酮	65	—	—	0.53	杏仁香、辛辣、皮革味、焦味
6	26.09	己酸	3 000	0.12	0.12	0.07	略有酸臭味
7	29.08	辛酸	148	1.56	—	0.7	汗味、奶酪味
8	28.45	乙基麦芽酚	2	5 803.235	473.42	252.575	焦糖味
9	30.36	丁香酚	5	423.37	347.61	226.15	香甜、辛辣、丁香味
10	28.30	苯酚	0.65	58.58	35.51	29.65	甜香味
11	20.93	芳樟醇	6	856.04	192.73	48.85	花香、甜香
12	22.01	4-萜烯醇	340	1.91	1.11	0.28	胡椒香、泥土香、木质香
13	23.09	糠醇	1.9	391.67	83.93	116.15	焦糖香
14	23.86	α -松油醇	4.6	135.13	64.33	21.57	水果香、薄荷味
15	26.30	香叶醇	1	363.31	—	—	甜香、玫瑰花香
16	27.09	苯乙醇	45	191.06	134.11	133.35	玫瑰香
17	28.93	橙花叔醇	300	0.14	—	—	玫瑰、苹果香
18	18.17	1-辛烯-3-醇	1	—	27.71	—	蘑菇香
19	16.10	壬醛	1	—	42.18	34.38	油脂气味、玫瑰和柑橘香气
20	18.73	苯甲醛	350	0.32	0.2	0.2	苦杏仁味
21	30.17	肉豆蔻醛	53	5.4	1.22	1.36	脂肪味、蜡香
22	25.70	2, 4-癸二烯醛	0.2	—	227.05	—	脂肪味、土豆清香
23	28.59	对甲氧基苯甲醛	27	—	4.28	3.2	强烈的茴芹、山楂香、甜香
24	24.92	乙酸香叶酯	9	37.23	—	—	薰衣草、玫瑰花香
25	29.99	肉桂酸乙酯	0.04	19 446.25	9 940	4 078.75	甜香、脂香、果香、辛辣味
26	10.65	正己酸乙酯	2.2	—	39.45	—	果香、甜香
27	23.27	草蒿脑	16	10.19	31.27	10.98	甘草、茴香味
28	25.90	茴香脑	15	95.43	178.2	78.48	茴香味、甜味、甘草味
29	27.85	2-乙酰基吡咯	1 000	0.4	—	—	核桃、甘草、烤面包香
30	33.93	2,3,5,6-四甲基吡嗪	100	0.58	—	0.28	坚果味

注: 表中上标小写字母 abc 表示差异显著性 ($P < 0.05$)。“—”表示未检出该种挥发性风味物质。阈值参考值来自刘欢^[34]、强宇^[22]、Sam^[26]、包陈力根^[31]、顾明月^[35]的文章中, 气味描述来自网站 <http://www.the-goodscents-company.com>。

图2是3种酱卤鸭脖气味活性物质(OAV>1)的热图,红色表示正相关,蓝色表示负相关,灰色代表未检出。对3种酱卤鸭脖中的气味活性化合物进行聚类分析,发现J牌和W牌欧氏距离相近,说明两组酱卤鸭脖气味活性物质组成相近,具有相似的风味。而H牌呈现独特的香气分布,整体香气强度明显低于J牌和W牌。观察图2发现,引起上述风味差异的挥发性风味物质主要包括J牌和W牌中OAV较高的石竹烯、乙基麦芽酚、丁香酚、芳樟醇、4-萜烯醇、肉桂酸乙酯,以及H牌中未检出的D-柠檬烯。由此可知,3种酱卤鸭脖特征香气的差异主要集中在萜烯类、酚类、醇类和酯类化合物上。并且这些挥发性成分常见于如丁香、小茴香、肉豆蔻、八角、花椒、香砂等香辛料,表明香辛料是引起3种酱卤鸭脖风味差异的关键原因。这也说明,不用鸭脖样品在同种香气物质上的气味强度差异可能与加工中香辛料的添加量和配比密切相关。

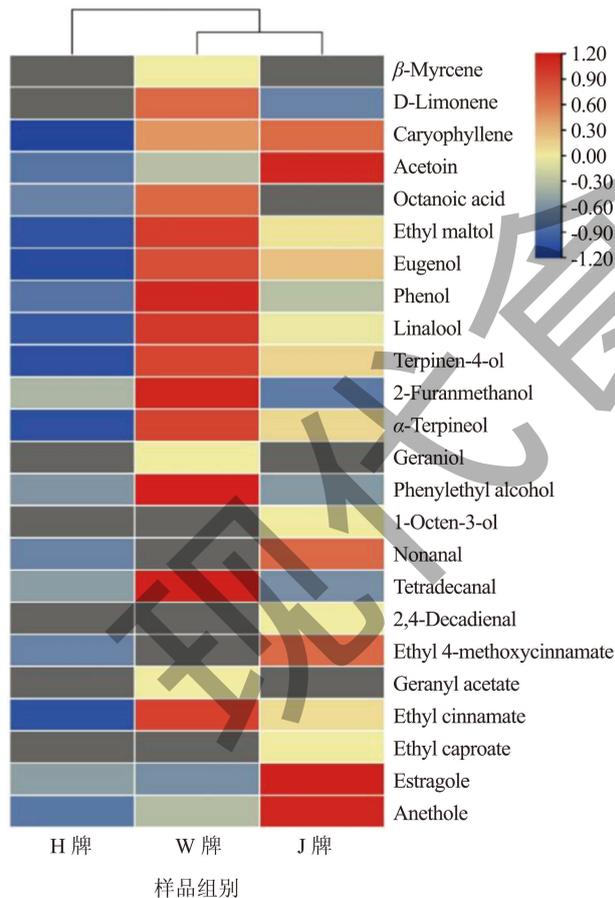


图2 3种酱卤鸭脖气味活性物质的热图及聚类分析

Fig.2 Heat map and cluster analysis of aroma active compounds of three kinds of soy-marinated duck necks

2.1.3 电子鼻检测结果分析

图3a是3种酱卤鸭脖气味的雷达指纹图谱,

W1W、W3C、W5C、W5S、W1C和W2W传感器检测到了3组样品中的主要挥发性成分,包括萜烯类、氨类、含硫化合物、氮氧化合物、芳香性化合物。3组样品气味差异主要集中在W1W(对含硫化合物敏感)和W5S(对氮氧化合物敏感)的传感器上,表明含硫化合物和氮氧化合物可能是引起鸭脖之间风味差异的重要挥发性风味化合物,两者主要来源于含硫氨基酸(如甲硫氨酸、半胱氨酸)的降解和美拉德反应等^[19]。主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)可以通过减小数据的维度并保留样品大部分有用信息,进行原始数据缩减或简化算法,来提高测量结果的可解释性^[36]。图3b是3种酱卤鸭脖的PCA分析图,第一主成分贡献率占66.1%,第二主成分贡献率占23.2%,总计达89.3%,因此可以反映与样品有关的整体信息。图中J牌和W牌两组样品的响应值存在部分重叠,但与H牌的重叠度不高,表明W牌和J牌的整体气味特征更加相似,而H牌在气味上有别于前两者,具有独特的气味特点,与GC-MS检测分析结果一致。

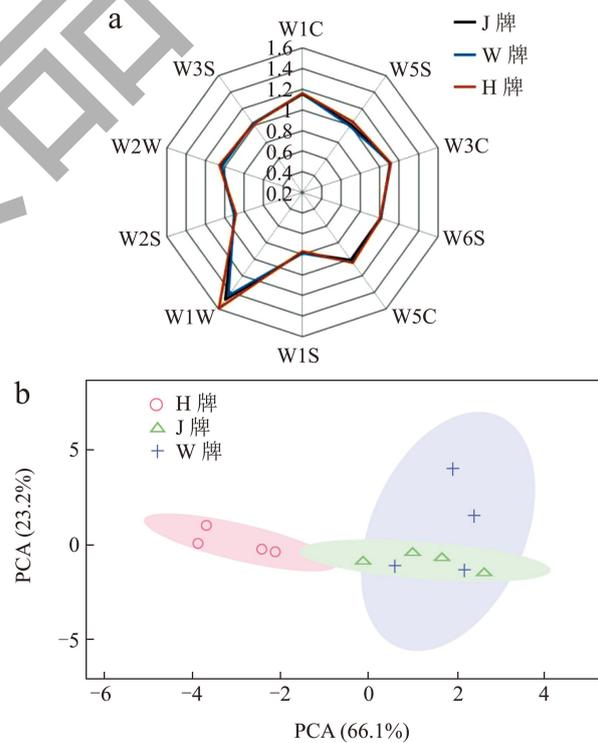


图3 3种酱卤鸭脖气味的雷达指纹图谱(a)和PCA分析图(b)

Fig.3 Radar fingerprint profile (a) and PCA analysis (b) of the odor of three kinds of soy-marinated duck necks

2.2 非挥发性风味物质检测结果

2.2.1 游离氨基酸含量检测分析

游离氨基酸可以为肉品贡献鲜味、甜味、苦味

等多种滋味^[37]。在 W 牌、J 牌、H 牌中检测到了 17 种氨基酸，总含量由高到低：H 牌>J 牌>W 牌。3 种酱卤鸭脖中均以鲜、甜味氨基酸占主导地位，总质量浓度分别为 203.97、188.54、264.49 mg/100 g，占比为 65.53%、57.05%、59.46%，远超苦味和无味氨基酸。W 牌中天冬氨酸的质量浓度最高，为 68.18 mg/100 g，J 牌和 H 牌中分别是苏氨酸和丙氨酸，含量为 47.81 mg/100 g 和 61.84 mg/100 g。半胱氨酸仅在 H 牌中检测到，虽然含量只有 2.58 mg/100 g，但在加工过程中其美拉德反应活性要高于其他氨基酸，

能与美拉德中间产物反应形成烤肉的风味^[38]。根据游离氨基酸的阈值和含量计算滋味活性值，当 TAV>1 时对鸭脖整体滋味贡献显著。W 牌中谷氨酸的 TAV 为 1.26，H 牌中谷氨酸、丙氨酸的 TAV 为 1.91、1.03，表明谷氨酸、丙氨酸是 W 牌和 H 牌鸭脖中的关键呈味物质，对鲜味贡献显著，相似结果也出现盐水鸭滋味物质的鉴定分析中^[18]。以上游离氨基酸组成的特点差异可能是造成 3 种酱卤鸭脖滋味不同的原因之一。

表 6 3种酱卤鸭脖中游离氨基酸含量的检测结果

Table 6 The results of free amino acid content in three kinds of soy-marinated duck necks

游离氨基酸	呈味特点	含量/(mg/100 g)			阈值/(mg/100 g)
		W 牌	J 牌	H 牌	
天冬氨酸	鲜味 (+)	68.18 ± 0.67 ^a	25.77 ± 0.39 ^c	34.36 ± 1.98 ^b	100
谷氨酸	鲜味 (+)	21.12 ± 0.96 ^c	37.76 ± 0.67 ^b	57.43 ± 0.43 ^a	30
小结 (鲜味氨基酸)		89.30 ± 1.63 ^a	63.53 ± 1.06 ^b	91.79 ± 2.41 ^a	
丝氨酸	甜味 (+)	14.04 ± 1.72 ^c	26.68 ± 3.79 ^b	46.41 ± 0.46 ^a	150
甘氨酸	甜味 (+)	6.82 ± 0.24 ^c	11.40 ± 0.71 ^b	14.71 ± 0.61 ^a	130
苏氨酸	甜味 (+)	52.84 ± 1.20 ^a	47.81 ± 5.16 ^a	49.74 ± 2.42 ^a	260
丙氨酸	甜味 (+)	40.96 ± 4.20 ^b	39.12 ± 3.89 ^b	61.84 ± 4.63 ^a	60
小结 (甜味氨基酸)		114.67 ± 7.4 ^b	125.01 ± 13.55 ^b	172.70 ± 8.12 ^a	
组氨酸	苦味 (-)	14.434 ± 2.62 ^a	4.08 ± 2.41 ^b	10.71 ± 2.56 ^a	20
精氨酸	苦味 (-)	17.07 ± 1.52 ^{ab}	19.22 ± 1.73 ^a	14.79 ± 0.55 ^b	50
酪氨酸	苦味 (-)	15.78 ± 0.34 ^b	16.00 ± 0.34 ^b	21.43 ± 0.94 ^a	—
缬氨酸	苦味 (-)	1.08 ± 0.44 ^c	7.16 ± 1.17 ^b	20.46 ± 1.90 ^a	40
甲硫氨酸	苦味 (-)	7.12 ± 4.67 ^c	12.06 ± 3.32 ^b	29.82 ± 7.39 ^a	30
异亮氨酸	苦味 (-)	3.95 ± 1.31 ^c	22.33 ± 3.55 ^a	18.24 ± 3.29 ^b	90
亮氨酸	苦味 (-)	4.59 ± 0.96 ^c	20.50 ± 2.94 ^a	12.55 ± 1.31 ^b	190
苯丙氨酸	苦味 (-)	25.53 ± 3.39 ^b	21.92 ± 6.36 ^c	33.66 ± 2.28 ^a	90
小结 (苦味氨基酸)		89.55 ± 15.25 ^c	123.28 ± 21.82 ^b	167.67 ± 20.06 ^a	
脯氨酸	无味	5.96 ± 0.02 ^b	6.23 ± 0.07 ^a	6.23 ± 0.03 ^a	300
半胱氨酸	无味	0	0	2.58 ± 0.4 ^s a	—
赖氨酸	无味	11.76 ± 0.04 ^c	12.41 ± 0.11 ^b	15.87 ± 0.04 ^a	50
小结 (无味氨基酸)		17.72 ± 0.06 ^c	18.65 ± 0.18 ^b	24.69 ± 0.56 ^a	
总量 (氨基酸)		311.25 ± 22.34 ^b	330.47 ± 36.61 ^b	444.84 ± 31.15 ^a	

注：表中上标小写字母 abc 表示差异显著性 (P<0.05)。“—”表示未查到该种氨基酸的阈值。

2.2.2 呈味核苷酸含量检测分析

5'-鸟苷酸、5'-腺苷酸和 5'-肌苷酸的含量高也会间接反映肉类滋味的优劣。核苷酸源于肌肉中三磷酸腺苷的降解，其中 5'-肌苷酸是畜禽肉中鲜味的主要贡献者^[13]。表 7 中，5'-肌苷酸的含量显著高于 5'-鸟苷酸和 5'-腺苷酸 (P<0.05)，占比

54.87%~73.60%，且在 W 牌、J 牌和 H 牌中的 TAV 分别为 1.09、1.07 和 1.06，说明 5'-肌苷酸对 3 种鸭脖鲜味影响显著。J 牌和 H 牌中的 5'-鸟苷酸因 TAV>1，表明对鲜味也具有增益作用。由此可知，5'-鸟苷酸和 5'-肌苷酸也是酱卤鸭脖的特征滋味物质，并均对鸭脖的鲜味贡献突出。

表 7 3种酱卤鸭脖中呈味核苷酸含量的检测结果

Table 7 The results of flavor nucleotide content in three kinds of soy-marinated duck necks

核苷酸含量	呈味特点	含量/(mg/100 g)			阈值
		W牌	J牌	H牌	
5'- 鸟苷酸	鲜味(+)	3.73 ± 1.41 ^c	13.88 ± 1.41 ^a	13.76 ± 0.35 ^b	12.5
5'- 肌苷酸	鲜味(+)	27.30 ± 1.06 ^a	26.69 ± 0.07 ^b	26.53 ± 1.06 ^c	25
5'- 腺苷酸	鲜/甜味(+)	6.06 ± 0.22 ^c	8.07 ± 0.05 ^a	7.15 ± 0.10 ^b	50
总量(核苷酸)		37.09 ± 2.69 ^c	48.64 ± 1.53 ^a	45.44 ± 1.51 ^b	

注：表中上标小写字母 abc 表示差异显著性 ($P < 0.05$)。

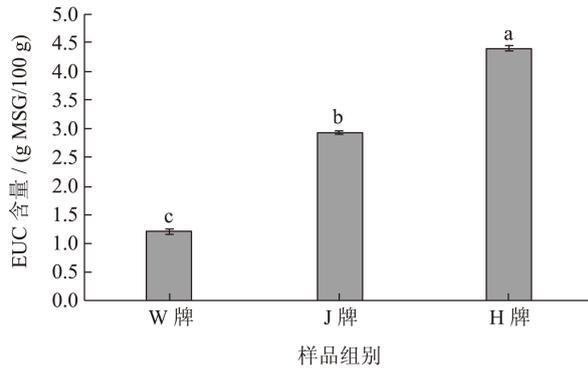


图 4 3种酱卤鸭脖的 EUC 值

Fig.4 EUC values of three kinds of marinated duck necks in sauce

注：字母不同表示不同品牌酱卤鸭脖间 EUC 值差异显著 ($P < 0.05$)。

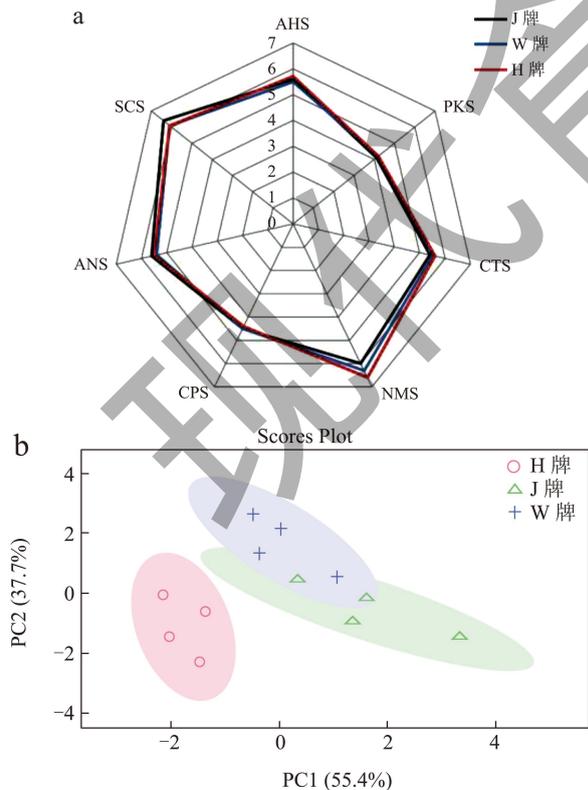


图 5 3种酱卤鸭脖滋味的雷达指纹图谱(a)和 PCA 分析图(b)

Fig.5 Radar fingerprint profile (a) and PCA analysis (b) of the taste of three kinds of soy-marinated duck necks

2.2.3 EUC分析

肉制品的滋味是多种滋味物质相互作用的结果，其中鲜味氨基酸（天冬氨酸、谷氨酸）与呈味核苷酸（5'- 鸟苷酸、5'- 腺苷酸、5'- 肌苷酸）间的协同作用是关键因素，味精当量为此类呈味反应的评价指标，用以衡量肉类的鲜味程度。在 3 种酱卤鸭脖样品中，H 牌的 EUC 值达到 4.41 g MSG/100 g，远超其他两组 ($P < 0.05$)，说明 H 牌酱卤鸭脖的鲜味要优于 J 牌和 W 牌。可知在游离氨基酸含量分析中，J 牌鸭脖中的天冬氨酸及 3 种呈味核苷酸的含量均高于 H 牌。相比之下，H 牌中谷氨酸的含量显著高于其他两种鸭脖 ($P < 0.05$)，且 TAV > 1，表明其对鲜味的贡献较大，由此可知谷氨酸是 H 牌鸭脖鲜味的关键贡献者。

2.2.4 电子舌检测结果分析

电子舌可模拟 5 种基本味觉（酸、甜、苦、咸、鲜）将食品的滋味特征转化为电信号响应值通过分析把滋味特征量化，实现快速准确预测样品的质量^[24]。ASTREE 电子舌的 7 个传感器中，AHS 传感器、CTS 传感器、NMS 传感器、ANS 传感器、SCS 传感器分别对酸味、咸味、鲜味、甜味、苦味物质敏感。PKS 和 CPS 传感器为通用传感器，一般用来反映检测样品的复合滋味。图 5 中 3 组酱卤鸭在 NMS 传感器上的差异性最大，响应强度：H 牌 > W 牌 > J 牌，说明 3 款酱卤鸭脖的鲜味程度中，H 牌要优于 J 牌和 W 牌。J 牌在 SCS 传感器上反映出的信号响应值最高，说明在苦味上表现突出。对 3 种酱卤鸭脖电子舌 7 个传感器响应值进行主成分分析，发现 PCA 对于 W 牌和 J 牌两组样品的区分效果不理想，但 H 牌与两者距离较远且均不存在交集，说明 W 牌和 J 牌两者的酱卤鸭脖呈味特点相似，与 H 牌存在明显的滋味特征差异，并且差异可能主要集中在鲜味和苦味两种滋味上。目前酱卤鸭脖的生产大多仍采用传统老汤卤煮方式^[35]，加工工艺上大同小异，不同

样品之间滋味的差异可能与鸭肉中以及香辛料的种类、配比密切相关。

3 结论

本研究利用 HS-SPME/GC-MS、电子鼻、HPLC 及电子舌对 3 款市售酱卤鸭脖 (J 牌、W 牌、H 牌) 的特征香气和特征滋味进行了剖面分析。香气方面, 3 种酱卤鸭脖中共鉴定出 56 种挥发性风味物质, 其中酚类、萜烯类和醇类化合物为主要挥发性组分。通过计算挥发性风味成分的 OAV, 将肉桂酸乙酯、乙基麦芽酚、丁香酚、苯酚、芳樟醇、苯乙醇、糠醇、 α -松油醇、茴香脑和草蒿脑判定为 3 种鸭脖的特征挥发性风味物质, 整体对鸭脖的甜香、果香和脂香贡献显著。杂环化合物和部分酮类、醇类和酸类化合物则起到风味修饰作用。气味活性物质的聚类分析结果表明, J 牌和 W 牌鸭脖的整体风味相似, 并且与 H 牌的特征风味差异主要源于香辛料中的萜烯类、酚类、醇类和酯类化合物。电子鼻的主成分分析可有效区分 3 种鸭脖的整体香气, 其雷达图结果则表明 3 种鸭脖在含硫化合物和含氮化合物上存在较大差异; 滋味方面, 谷氨酸、丙氨酸、5'-肌苷酸、5'-鸟苷酸被判定为 3 种酱卤鸭脖的特征滋味物质, 为鸭脖提供鲜味和甜味。根据 EUC 可知, H 牌鸭脖的鲜味显著高于另外两组 ($P < 0.05$), 而这可能与其中高含量的谷氨酸有关。电子舌的主成分分析也可有效区分 3 种鸭脖的整体滋味, 其雷达图结果则表明鸭脖间的滋味差异集中在鲜味和苦味上。本研究阐明了 3 种酱卤鸭脖的香气和滋味物质组成特点, 并且发现 H 牌酱卤鸭脖在特征气味和特征滋味上与其他两种鸭脖均存在差异。

参考文献

- [1] 刘雪, 闫晓明. 酱卤肉制品研究进展 [J]. 现代食品, 2022, 28(23): 10-15.
- [2] BISWASS, BANERJEE R, BHATTACHARYYA D, et al. Technological investigation into duck meat and its products—a potential alternative to chicken [J]. World's Poultry Science Journal, 2019, 75(4): 609-620.
- [3] 宋玉申. 热处理对包装后酱卤鸭脖风味的影响机制及其调控研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [4] 刘书东. 酱卤鸭脖真空低温卤制工艺优化与品质研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021.
- [5] 王宏勋, 黄威, 蔡玉洁, 等. 辣椒素和二氢辣椒素在辣鸭脖卤制过程中的迁移规律研究 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 239-242.
- [6] LI Y X, ZHOU C Y, HE J, et al. Combining e-beam irradiation and modified atmosphere packaging as a preservation strategy to improve physicochemical and microbiological properties of sauced duck product [J]. Food Control, 2022, 136: 108889.
- [7] 唐翠娥, 潘思轶, 曹婷, 等. 固相微萃取-气相色谱-质谱法分析不同口味精武鸭脖的香气成分 [J]. 食品科学, 2013, 34(4): 186-189.
- [8] ZHOU J J, HAN Y Q, ZHUANG H N, et al. Influence of the type of extraction conditions and fiber coating on the meat of sauced duck neck volatile compounds extracted by solid-phase microextraction (SPME) [J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(7): 1661-1672.
- [9] PU D D, SHAN Y M, ZHANG L L, et al. Identification and inhibition of the key off-odorants in duck broth by means of the sensomics approach and binary odor mixture [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(41): 13367-13378.
- [10] 李娟, 韩东, 米思, 等. 北京地区酱卤牛肉中挥发性风味物质剖面分析 [J]. 核农学报, 2020, 34(1): 94-103.
- [11] FANG Z Y, LI G Z, GU Y, et al. Flavour analysis of different varieties of camellia seed oil and the effect of the refining process on flavour substances [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 170: 114040.
- [12] WANG J T, SHI J, ZHOU Y, et al. Insights into crucial odourants dominating the characteristic flavour of citrus-white teas prepared from citrus reticulata Blanco 'Chachiensis' and Camellia sinensis 'Fudingdabai' [J]. Food Chemistry, 2022, 377(30): 132048.
- [13] VAIKUNDAMOORTHY R, SONG Z, INHO H. The potential role of secondary metabolites in modulating the flavor and taste of the meat [J]. Food Research International, 2019, 122: 174-182.
- [14] 姜薇, 强宇, 刘成江, 等. 香辛料对酱卤牛肉的赋味效应解析 [J]. 现代食品科技, 2022, 38(10): 249-260.
- [15] 李海. 农产品资源化利用技术研究—定量卤制工艺研究 [D]. 重庆: 重庆工商大学, 2015.
- [16] HAN D, ZHANG C H, MARIEL F. Effect of seasoning addition on volatile composition and sensory properties of stewed pork [J]. Foods, 2021, 10(1): 83.
- [17] 孙圳, 韩东, 张春晖, 等. 定量卤制鸡肉挥发性风味物质剖面分析 [J]. 中国农业科学, 2016, 49(15): 3030-3045.
- [18] 陶正清, 刘登勇, 周光宏, 等. 盐水鸭工业化加工过程中主要滋味物质的测定及呈味作用评价 [J]. 核农学报, 2014, 28(4): 632-639.
- [19] AMJAD S, SAM A D, WANG JIANAN, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review [J]. Food Research International, 2022, 157: 111385.
- [20] ZHOU Y J, WANG X S, CHEN Y, et al. Effects of different

- paprikas on the quality characteristics and volatile flavor components of spiced beef [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021,45(4): 15353.
- [21] WANG Q, LI J, LI K K, et al. Effects of turmeric on reducing heterocyclic aromatic amines in chinese tradition braised meat products and the underlying mechanism [J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(10): 5575-5582.
- [22] 强宇,姜薇,刘成江,等.风冷与冷藏过程中酱卤牛肉风味逸散行为研究[J].*中国农业科学*,2022,55(16):3224-3241.
- [23] 杜晓兰,杨文敏,黄永强,等.基于顶空气相离子迁移谱比较3种加工方式对番鸭肉挥发性风味物质的影响[J].*食品科学*,2021,42(24):269-275.
- [24] 田欢.酱牛肉定量卤制工艺优化研究[D].宁夏:宁夏大学,2021.
- [25] 刘天天,梁中永,范思华,等.北海沙蟹特征滋味成分的分析[J].*食品科学*,2018,39(14):236-241.
- [26] SAM A D, LI C, XU B C. Evaluation of the effect of marination in different seasoning recipes on the flavor profile of roasted beef meat via chemical and sensory analysis [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2021, 46(6): 13962.
- [27] LIU H, WANG Z Y, ZHANG D Q, et al. Characterization of key aroma compounds in Beijing roasted duck by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, odor-activity values, and aroma-recombination experiments [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(20): 5847-5856.
- [28] YUE C, CAO H L, ZHANG S R, et al. Aroma characteristics of Wuyi rock tea prepared from 16 different tea plant varieties [J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 17(30): 100586.
- [29] YANG F M, CHEN L Q, ZHAO D, et al. A novel water-soluble chitosan grafted with nerol: synthesis, characterization and biological activity [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 232(31): 123498.
- [30] 相欢,尹文颖,崔春.SPME-DSE联用分析不同固形物浓度发酵对酱油香气物质的影响[J].*现代食品科技*,2016,32(10):259-267.
- [31] 包陈力根,关淳博,辛明航,等.HS-SPME-GC-MS结合电子鼻分析烘烤对大球盖菇挥发性风味物质的影响[J].*食品科学*,2022,43(14):226-233.
- [32] CHEN C, FAN X K, HU Y Y, et al. Effect of different salt substitutions on the decomposition of lipids and volatile flavor compounds in restructured duck ham [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 176(15): 114541.
- [33] 方超,刘治国,乔璐,等.基于感官定量描述分析法和GC-MS对山庄老酒3种香型白酒挥发性特征风味的分析[J].*食品科学*,2023,44(10):291-299.
- [34] 刘欢,张德权,王振宇,等.北京烤鸭腿皮与腿肉关键挥发性风味物质解析[J].*中国食品学报*,2021,21(2):308-318.
- [35] 顾明月.香辛料包循环煮制对扒鸡挥发性风味物质的影响[D].锦州:渤海大学,2019.
- [36] LIU L, HU Z Q, HU X Q, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety [J]. *Food Research International*, 2022, 162(PB): 112214.
- [37] YU M, LI Z M, RONG T, et al. Different dietary starch sources alter the carcass traits, meat quality, and the profile of muscle amino acid and fatty acid in finishing pigs [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2021, 12(1): 358-371.
- [38] 詹欢.美拉德反应中间体-酶解氧化鸡脂协同构建鸡汤风味前体[D].无锡:江南大学,2022.