

基于顶空气相离子迁移色谱对鸭肉腥味特征物质的鉴定

赵改名¹, 王 森¹, 祝超智^{1*}, 孙灵霞¹, 王壮壮¹, 王兴辉¹, 谢 伟²

(1.河南农业大学食品科学技术学院, 河南 郑州 450002; 2.馆陶六和食品有限公司, 河北 邯郸 057750)

摘 要: 为探究鸭肉在60 ℃和90 ℃两种温度煮制后的腥味特征物质, 以鸭胸、鸭腿及鸭锁骨为研究对象, 基于顶空气相色谱-离子迁移谱(headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, HS-GC-IMS)技术结合嗅闻评价、电子鼻测定及风味物质评价分析确定鸭肉腥味特征物质。结果表明, 在两种温度处理下, 90 ℃处理的各部位鸭肉腥味重于60 ℃, 且不同处理组鸭肉样品的腥味特征具有一定差异, 电子鼻分析结果也验证了不同处理组鸭肉样品气味存在一定差异。同时基于HS-GC-IMS技术共鉴定出61种挥发性物质, 鉴定发现不同处理组鸭肉样本中挥发性物质种类基本一致, 而相对含量存在部分差异。结合嗅闻评价结果与风味物质的相对气味活性值共筛选出12种腥味特征物质, 分别为壬醛、辛醛、庚醛、癸醛、戊醛、己醛、(E)-2-辛烯醛、(E)-2-庚烯醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、2-庚酮和1-辛烯-3-醇, 这些物质之间发生的交互作用对鸭肉腥味形成具有重要贡献, 并且因种类和含量的不同使得两种温度处理的鸭肉样品各具特征腥味。

关键词: 鸭肉; 嗅闻评价; 电子鼻; 顶空气相色谱-离子迁移谱; 相对气味活性值; 腥味特征物质

Identification of Characteristic Odorants in Duck Meat by Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry

ZHAO Gaiming¹, WANG Sen¹, ZHU Chaozhi^{1*}, SUN Lingxia¹, WANG Zhuangzhuang¹, WANG Xinghui¹, XIE Wei²

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Guantao Liuhe Food Co. Ltd., Handan 057750, China)

Abstract: The characteristic odorants in duck breast, leg and clavicle meat cooked at 60 and 90 ℃ were analyzed by headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) and were identified by sensory evaluation, electronic nose measurement and flavor substance evaluation. The results showed that duck breast, leg and clavicle meat cooked at 90 ℃ had a stronger odor than at 60 ℃, and there were differences in the odor characteristics of different groups of duck meat samples, which was also confirmed by electronic nose analysis. A total of 61 volatile flavor compounds were identified by HS-GC-IMS. The types of volatile substances in different groups of duck meat samples were basically the same, but there were differences in their relative contents. Based on the sensory evaluation results and the relative odor activity values (ROAV) of flavor substances, a total of 12 characteristic odorants were identified, including nonanal, octanal, heptanal, decanal, pentanal, hexanal, (E)-2-octenal, (E)-2-heptenal, 2-methyl-butanal, 3-methyl-butanal, 2-heptanone and 1-octene-3-ol. The interaction between these substances contributed significantly to the formation of the odor of duck meat. Due to the differences in the types and contents of odorants, duck meat samples cooked at 60 and 90 ℃ had distinct odor characteristics.

Keywords: duck meat; sensory odor evaluation; electronic nose; headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry; relative odor activity value; characteristic odorants

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220420-257

中图分类号: TS251.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)04-0247-09

收稿日期: 2022-04-20

基金项目: 河南省重大科技专项(161100110800)

第一作者简介: 赵改名(1965—)(ORCID: 0000-0002-4538-3186), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉类加工与产品质量安全控制体系。E-mail: gmzhao@126.com

*通信作者简介: 祝超智(1985—)(ORCID: 0000-0002-4582-747X), 女, 副教授, 博士, 研究方向为肉类加工与质量控制。E-mail: zhuchaozhi66@163.com

引文格式:

赵改名, 王森, 祝超智, 等. 基于顶空气相离子迁移色谱对鸭肉腥味特征物质的鉴定[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 247-255.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220420-257. <http://www.spkx.net.cn>

ZHAO Gaiming, WANG Sen, ZHU Chaozhi, et al. Identification of characteristic odorants in duck meat by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(4): 247-255. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220420-257. <http://www.spkx.net.cn>

近些年, 鸭肉产量持续增加, 成为继猪肉和鸡肉后的第三大肉类产业^[1]。从营养学角度看, 鸭肉中不仅含有大量的不饱和脂肪酸, 还含有丰富的微量元素及维生素等多种有益物质^[2]。鸭肉及其制品也是优质蛋白的重要来源^[3]。但鸭腥味的存在限制了鸭肉制品的生产, 降低了其风味质量, 影响消费者对鸭肉制品的认可度。目前, 对于肉品异味研究主要集中在熟肉制品贮藏方向^[4], 很少有人检测生肉及熟制过程中产生的异味, 主要是因为生肉气味较少, 且被广泛定义为金属味、血腥味等^[5]; 在加热过程中发生的热降解反应、脂质氧化、美拉德反应等, 产生的挥发性小分子物质掺杂在一起使得肉品异味研究更加复杂^[6]。因此, 探索温度处理对鸭肉腥味形成的特征成分, 对鸭肉产品生产与开发具有重要意义, 相关研究发现鸭蛋在60℃时挥发性物质种类显著增加, 腥味加重^[7]。

气相色谱-离子迁移谱技术(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)是基于不同气相离子在电场中迁移率的差异对样品基质中的挥发性成分进行痕量气体检测, 并表征其化学离子物质的分析技术^[8]。与气相色谱-质谱联用技术等传统技术相比, GC-IMS具有响应快、灵敏度高、设备简单易携带、定性能力强等优点, 适用于痕量物质的检测^[9]。结合电子鼻、嗅闻评价、相对气味活度值(relative odour activity value, ROAV)鉴定鸭腥味特征物质。

本研究以樱桃谷鸭为研究对象, 利用顶空GC-IMS(headspace-GC-IMS, HS-GC-IMS)分别对60、90℃两种温度煮制后的鸭胸、鸭腿、鸭锁骨等部位鸭肉的挥发性成分进行测定, 根据ROAV确定关键风味物质, 与嗅闻评价结果相结合确定鸭肉腥味特征物质, 旨在为后期食品工业中鸭肉祛腥这一难题提供一定理论依据和参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

选取生长周期40 d樱桃谷鸭的鸭胸肉、鸭腿肉、鸭锁骨作为研究对象, 所有鸭肉样品均购于河北邯郸馆陶六和食品有限公司。按照NY/T 3962—2021《畜禽肉分割技术规程 鸭肉》^[10]分割鸭肉样品, 并在-18℃左右的冷冻贮藏条件下运回实验室, 置于-40℃的冰柜中保存待用。

2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

AE224电子分析天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; HHS-21-8电热恒温水浴锅 上海博讯实业有限公司; PEN3型电子鼻 德国Airsense公司; Flavour Spec[®]风味分析仪(GC-IMS) 德国G.A.S.公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

将鸭胸和鸭腿肉上多余的鸭皮、脂肪和结缔组织以及鸭锁骨的骨头剔除, 将鸭胸、鸭腿及鸭锁骨肉切成均匀小块。依据前期预实验结果, 将鸭肉样品和水按照液比1:2(g/mL)分别在60、90℃条件下煮制30 min后取出。将鸭肉样品密封放凉后, 迅速用真空包装袋密封保存, 贴好标签, 置于干净无异味的(4±1)℃冰箱中, 并在3 d内进行理化实验。

1.3.2 鸭肉腥味嗅闻评价

对肉品专业的研究生进行感官评价培训, 选择10名感官评价员(男女各5名, 年龄为20~26岁)成立感官评价小组, 对两种温度处理的鸭肉样品进行腥味特征气味描述及嗅闻评价^[11]。将鸭肉样品绞碎后, 称取适量样品分别装入10个10 mL感量杯中, 迅速进行嗅闻。采用10分制对腥味强度进行评分, 按照腥味程度分为5个等级, 如表1所示。嗅闻标记的样品后, 评价员需讨论与鸭肉腥味相关的感官描述词汇, 对鸭肉腥味进行定义并达成共识, 并根据描述词汇出现次数绘制雷达图。再对一批经过编号的测试样品进行嗅闻, 根据表1进行评分。

表1 鸭肉腥味嗅闻评分标准
Table 1 Criteria for sensory odor evaluation of duck meat

评分标准	无或略有腥味	腥味较淡	腥味中等	腥味较重	腥味极重
分值	0~2	3~4	5~6	7~8	9~10

1.3.3 电子鼻测定

根据孟子晴等^[12]的方法, 并略作修改。称取8.00 g搅碎的测试样品放入50 mL螺口顶空瓶中, 迅速密封。45℃水浴平衡5 min后立即测定。电子鼻条件: 采用顶空进样; 清洗时间120 s(清洗2、3次); 传感器归零时间5 s; 样品准备时间5 s; 数据采集时间80 s; 取60~75 s内

连续的3组数据作为采集1次样品的数据,以确保传感器的稳定性与数据采集的准确性,每个样品至少测定4次。

1.3.4 HS-GC-IMS测定

参照李聪^[13]和杜晓兰等^[14]的方法,并略作修改。将样品搅碎后,准确称取4.0 g样品置于20 mL顶空瓶中,密封保存,每个样品测定3次。

HS条件:顶空孵化温度75℃;孵育时间15 min;孵化转速500 r/min;进样针温度85℃;进样体积500 μL;不分流模式;载气为高纯N₂(纯度≥99.99%);清洗时间30 s。

GC条件:MXT-5型色谱柱(15 m×0.53 mm, 1 μm);柱温60℃;运行时间20 min;载气为高纯N₂(纯度≥99.99%);载气流速梯度:初始流速2 mL/min,保持2 min;在10 min内增至10 mL/min;在20 min内增至150 mL/min。

IMS条件:漂移管长度9.8 cm;管内线性电压500 V/cm;载气/漂移气为高纯N₂(纯度≥99.99%);流速150 mL/min;IMS温度45℃,分析时间20 min。

1.3.5 风味物质评价

采用刘登勇等^[15]的ROAV法评价样品中香气组分对主体香味的贡献度。定义对样品总体风味贡献最大的组分为ROAV_{stan}=100,其他组分的ROAV按式(1)计算:

$$ROAV = \frac{C_i}{T_i} \times \frac{T_{stan}}{C_{stan}} \times 100 \quad (1)$$

式中:C_i和T_i分别为某种挥发性化合物的相对含量/%和感觉阈值/(μg/kg);C_{stan}和T_{stan}为整体挥发性组分中贡献最大的挥发性成分的相对含量/%和感觉阈值/(μg/kg)。

ROAV越大的挥发性成分对样品整体风味贡献也越大;ROAV≥1的组分为该样品中关键风味化合物,0.1≤ROAV<1的组分对样品整体风味有重要修饰作用。

1.4 数据处理

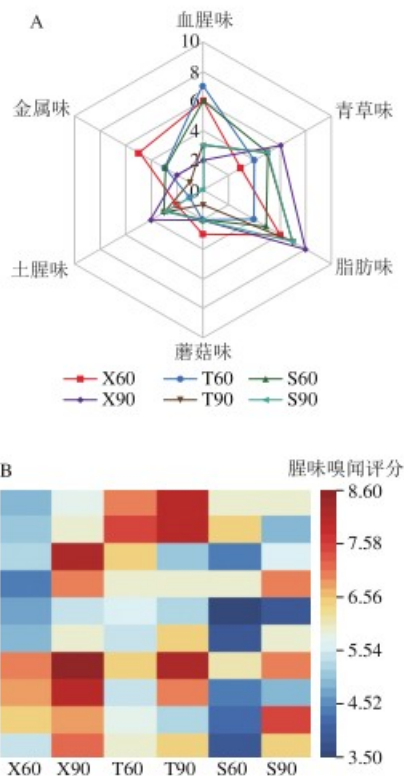
采用SPSS 24.0软件对挥发性成分的相对含量进行方差分析和显著性分析(P<0.05,差异显著);雷达图、热图、条形堆积图及主成分分析(principal components analysis, PCA)图均由Origin 2021软件绘制分析。利用HS-GC-IMS测得的挥发性成分结合仪器配套的LAV分析软件以及软件内置的NIST 2014和IMS数据库进行定性定量分析,利用Reporter、Gallery Plot等插件构建挥发性化合物的二维谱图及挥发性化合物指纹谱图。

2 结果与分析

2.1 两种温度处理不同部位鸭肉腥味嗅闻评价分析

通过嗅闻评价分析了两种温度处理不同部位鸭肉的腥味特征气味及整体腥味强度,经感官评价小组商议确

定的鸭肉腥味特征气味描述词共有6个,包括血腥味、金属味、土腥味、蘑菇味、脂肪味及青草味。如图1A所示,60℃处理组中鸭胸的腥味特征与鸭腿和鸭锁骨存在部分差异,鸭胸主要以脂肪、血腥、金属味及蘑菇味为主,而鸭腿与鸭锁骨的腥味主要以血腥、脂肪及青草味为主。但在90℃处理组中3个部位鸭肉的特征腥味均以脂肪味、青草及土腥味为主,这些特征气味间相互作用共同构成了鸭肉腥味。由图1B可知,90℃处理的各部位鸭肉腥味重于60℃,马洁^[7]也发现了90℃处理的鸭蛋腥味最重。60℃处理组中鸭腿腥味强度较重于鸭胸,鸭锁骨的腥味较淡;90℃处理组中鸭胸与鸭腿腥味强度较为接近。



X60、T60、S60.分别表示60℃处理的鸭胸、鸭腿、鸭锁骨;X90、T90、S90.分别表示90℃处理的鸭胸、鸭腿、鸭锁骨;下同。

图1 两种温度处理不同部位鸭肉腥味特征气味雷达图(A)及嗅闻评分热图(B)

Fig. 1 Radar map of odor characteristics (A) and heat map (B) of sensory scores for odor of duck meat cooked at different temperatures

2.2 两种温度处理不同部位鸭肉电子鼻PCA

由图2可知,PC1和PC2贡献率之和为91.9%,其贡献率大于90%,可以较完整地反映出样本间气味信息。其中,PC1贡献率为77.5%,远大于PC2贡献率(14.4%),表明样品在PC1方向上的距离越远,气味差异越明显。60℃处理组中鸭胸在PC1方向上的距离最远,鸭腿和鸭

锁骨间的距离较近,说明鸭胸的整体气味与鸭腿及鸭锁骨存在明显差异,而鸭腿与鸭锁骨间气味接近。90℃处理组中鸭肉各部位距离较近,说明这3个部位整体气味较为接近^[16]。与60℃处理组相比,90℃处理的鸭肉3个部位均较集中地分布在坐标轴的正象限,表明温度对鸭肉气味形成有显著影响。这些结果表明,PCA明显反映出3个部位鸭肉在两种温度处理下的气味差异,与嗅闻结果基本一致。

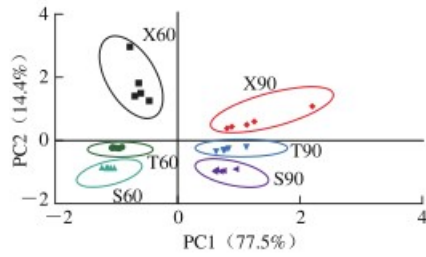


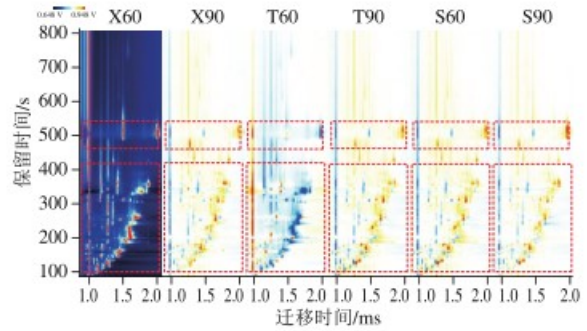
图2 两种温度处理不同部位鸭肉电子鼻PCA得分图

Fig. 2 PCA score plot of electronic nose data for duck meat from different body parts cooked at two temperatures

2.3 两种温度处理不同部位鸭肉HS-GC-IMS分析

2.3.1 两种温度处理不同部位鸭肉挥发性风味物质谱图分析

由图3可知,样品间挥发性物质的差异及变化较为明显。以60℃处理的鸭胸图谱作为参比,90℃处理的鸭肉样品中部分挥发性物质含量明显高于60℃,且鸭肉各部位挥发性物质种类及含量较为接近。而60℃处理组中鸭胸挥发性物质与鸭腿及鸭锁骨差异较大,鸭腿与鸭锁骨较为接近,这与电子鼻分析结果一致。



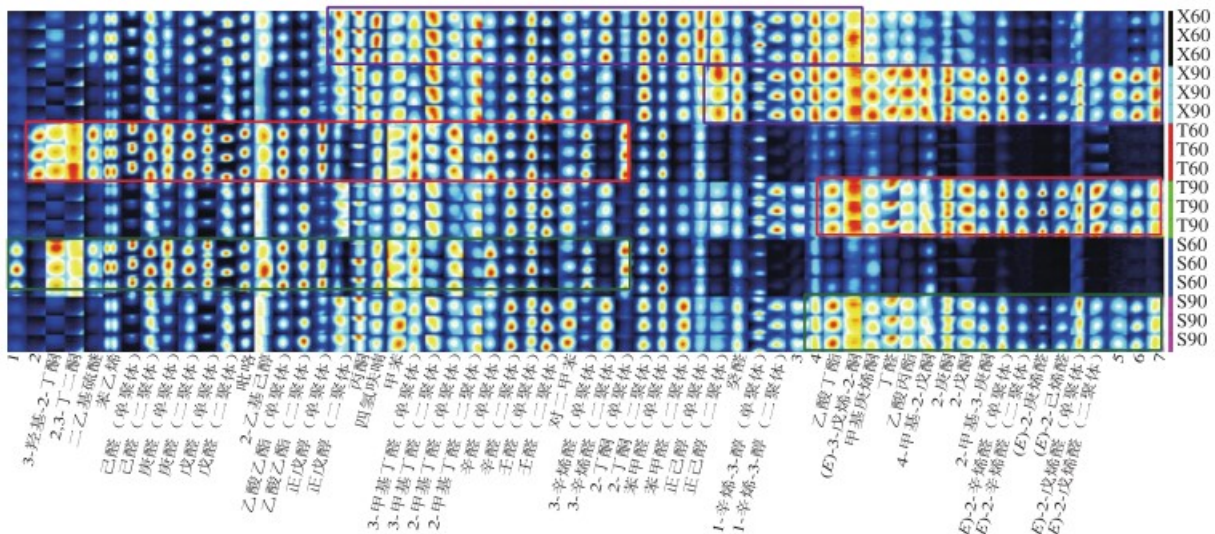
颜色表示挥发性物质含量,红色、蓝色、白色分别为含量大于、小于、等于参照样品^[14]。

图3 两种温度处理不同部位鸭肉挥发性成分对比差异谱图

Fig. 3 Differential GC-IMS spectra of volatile components in duck meat from different body parts cooked at different temperatures

2.3.2 两种温度处理不同部位鸭肉挥发性风味物质指纹图谱分析

如图4所示,随着点亮度的变化,样本中的挥发性成分种类及含量也随之变化^[14]。60℃处理组中鸭腿与鸭锁骨挥发性物质组成相对接近,且均与鸭胸存在明显差异。其中,各部位共有的主要挥发性物质有苯甲醛(单聚体)、3-辛烯醛(单聚体)、壬醛(单聚体)、辛醛(二聚体)、甲苯、丙酮等。鸭胸主要挥发性物质包括癸醛、(E)-3-戊烯-2-酮、乙酸丁酯、1-辛烯-3-醇(二聚体)、正己醇、苯甲醛(二聚体)、2-丁酮(二聚体)、3-辛烯醛(二聚体)、2-甲基丁醛(二聚体)、3-甲基丁醛(二聚体)、正戊醇(二聚体)等,鸭腿和鸭锁骨主要挥发性物质包括2-丁酮(单聚体)、辛醛(单聚体)、2-甲基丁醛(单聚体)、3-甲基丁醛(单



每行代表各样品中的全部挥发性成分信息,每列代表同种挥发性成分在不同样本间的信息。1~7等未知物质为数据库及相关文献中未匹配或未查到的物质,后续不对其进行分析。

图4 两种温度处理不同部位鸭肉各类挥发性成分指纹图谱

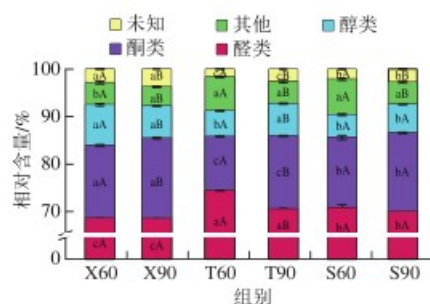
Fig. 4 Fingerprints of various volatile components in duck meat from different body parts cooked at different temperatures

聚体)、乙酸乙酯、2-乙基己醇、吡咯、戊醛、庚醛、己醛、苯乙烯、二乙基硫醚、2,3-丁二酮及3-羟基-2-丁酮(单聚体)等。90℃处理组中鸭肉各部位挥发性物质组成较为接近,通过对比60℃与90℃处理的鸭肉3个部位中挥发性化合物,发现其含量明显增加的物质包括(*E*)-2-戊烯醛、(*E*)-2-己烯醛、(*E*)-2-庚烯醛、(*E*)-2-辛烯醛、丁醛、癸醛、壬醛(二聚体)、2-甲基-3-庚酮、2-戊酮、2-庚酮、4-甲基-2-戊酮、(*E*)-3-戊烯-2-酮、甲基庚烯酮、乙酸丙酯、乙酸丁酯、1-辛烯-3-醇(二聚体)及正己醇(二聚体)等。此外,部分醛酮类物质如己醛、戊醛、庚醛、3-甲基丁醛(单聚体)、2-甲基丁醛(单聚体)、3-羟基-2-丁酮及2,3-丁二酮等在90℃处理组含量小于60℃。这些结果表明,两种温度处理的鸭肉各部位挥发性成分组成存在明显差异,60℃处理的鸭胸与鸭腿和鸭锁骨挥发性物质差异较大,而90℃处理的3个部位鸭肉挥发性物质差异相对较小。

2.3.3 两种温度处理不同部位鸭肉挥发性风味物质定性分析

由于二维谱图及指纹图谱并不能直接对不同温度处理的鸭肉中挥发性成分及相对含量进行分析,为进一步探究其挥发性成分的变化,可根据挥发性物质的气相色谱保留时间、离子迁移时间及正构酮类 $C_4\sim C_9$ 作为外标物计算的各挥发性物质保留指数,结合数据库进行匹配,对样品中的挥发性风味物质进行定性分析^[17]。由图5可知,不同处理组样品中挥发性风味物质种类主要是醛类、酮类及醇类物质;其中,醛类物质占比最高,其次是酮类和醇类物质。相关研究表明,醛类物质主要源于脂质氧化或氨基酸Strecker降解反应^[18],其阈值一般较低,被普遍认为是导致肉类风味差异及肉制品特征风味的主要来源^[19]。酮类物质是脂肪氧化的另一重要产物,其中部分酮类物质是形成杂环化合物的中间体,其阈值相对较高,对肉品整体风味贡献较小^[20]。醇类物质主要源于不饱和脂肪氧化和氨基酸代谢^[21],存在较高的阈值,对肉品整体风味影响较小。酮类和醇类物质的阈值通常高于醛类,且具有稳定、持久的特性,一般具有令人愉悦的花香、水果香等^[22]。由图5可知,60℃处理组中,鸭胸中醛类物质的相对含量(65.46%)显著低于鸭腿(74.52%)和鸭锁骨(70.84%)($P<0.05$);鸭胸中酮类物质(18.49%)和醇类物质(8.47%)在3个部位中的相对含量最高,且与鸭腿和鸭锁骨差异显著($P<0.05$);鸭腿中酮类物质(11.33%)显著低于鸭锁骨(14.80%)($P<0.05$),而醇类物质无显著差异($P>0.05$)。90℃处理组中,鸭胸中醛类物质的相对含量(65.38%)显著低于鸭腿(70.57%)及鸭锁骨(69.86%)($P<0.05$);鸭胸中酮类物质在3个部位中相对含量最高(20.09%),其次是鸭锁骨(16.72%)及

鸭腿(15.36%);鸭胸中醇类物质的相对含量(6.77%)与鸭腿(6.80%)无显著差异($P>0.05$),且均显著高于鸭锁骨(5.98%)($P<0.05$)。与60℃处理组相比,90℃处理组中鸭胸和鸭锁骨的醛类物质相对含量无显著差异($P>0.05$),而鸭腿显著减小($P<0.05$);鸭胸中酮类物质的相对含量显著增加,醇类物质显著减小($P<0.05$);鸭腿中酮类和醇类物质的相对含量均显著增加($P<0.05$);鸭锁骨中酮类物质和醇类物质的相对含量均无显著变化($P>0.05$)。这些结果表明,不同处理组样品中所含主要挥发性风味物质种类无明显差异,但各种类主要挥发性物质的相对含量存在一定差异,由此可以推测,鸭肉腥味的形成并不是由某一类挥发性物质造成,而是由多种挥发性物质间的交互作用形成。因此,需要根据具体的挥发性物质进行分析,对比不同处理组中挥发性物质的差异,进而确定造成鸭肉腥味的主要特征物质。



小写字母不同表示同一温度处理下不同部位间差异显著($P<0.05$);大写字母不同表示同一部位不同温度处理组间差异显著($P<0.05$);未知物质为数据库及相关文献中未匹配或未查阅到的物质,后续不对其进行分析。

图5 两种温度处理不同部位鸭肉各类挥发性成分相对含量变化

Fig. 5 Changes in relative contents of various volatile components in duck meat from different body parts cooked at different temperatures

结合嗅闻评价与电子鼻分析结果,90℃处理的鸭肉腥味重于60℃,推断出温度升高可能会产生新的挥发性物质或使某种挥发性物质含量增加,从而导致鸭肉腥味加重。如表2所示,不同温度处理的鸭肉中通过HS-GC-IMS技术共鉴定出61种物质,其中包括醛类26种、酮类11种、醇类7种、烯炔类1种、醚类1种、酯类4种、呋喃类1种、吡咯类1种、苯类2种及未知物质7种。与60℃相比,90℃处理的鸭胸中挥发性物质相对含量显著增加($P<0.05$)的物质包括癸醛、壬醛(二聚体)、(*E*)-2-辛烯醛、(*E*)-2-庚烯醛、(*E*)-2-戊烯醛(二聚体)、(*E*)-2-己烯醛、丁醛、2-甲基-3-庚酮、2-庚酮、4-甲基-2-戊酮、2-戊酮、乙酸丁酯等。与60℃相比,鸭腿与鸭锁骨在90℃处理下相对含量显著增加的挥发性物质与鸭胸相近,但鸭腿与鸭锁骨中额外存在1-辛烯-3-醇、正己醇(二聚体)、乙酸丙酯等物质,鸭锁骨中癸醛相对含量无显著差异($P>0.05$)。此外,由于鸭肉自身腥味的存

表2 不同部位鸭肉在两种温度处理下挥发性成分定性分析

Table 2 Qualitative analysis of volatile components in duck meat from different parts cooked at different temperatures

挥发性物质	CAS号	分子式	相对分子质量	保留指数	保留时间/s	漂移时间/ms	相对含量/%					
							X60	T60	S60	X90	T90	S90
醛类												
癸醛	C112312	C ₁₀ H ₂₀ O	156.3	1278.9	751.985	1.540 15	0.63±0.07 ^{ab}	0.40±0.03 ^{ab}	0.54±0.18 ^{ab}	0.83±0.03 ^{ab}	0.55±0.06 ^{ab}	0.63±0.04 ^{ab}
壬醛(单聚体)	C124196	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1109.9	508.997	1.475 52	11.23±0.09 ^{ab}	13.24±0.04 ^{ab}	12.42±0.83 ^{ab}	8.96±0.05 ^{ab}	9.46±0.26 ^{ab}	9.65±0.31 ^{ab}
壬醛(二聚体)	C124196	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1109.4	508.284	1.955 62	11.97±1.33 ^{ab}	8.29±0.27 ^{ab}	6.34±1.73 ^{ab}	16.88±0.13 ^{ab}	18.97±0.66 ^{ab}	19.60±0.23 ^{ab}
(E)-2-辛烯醛(单聚体)	C2548870	C ₈ H ₁₄ O	126.2	1056.4	432.039	1.337 03	1.19±0.17 ^{ab}	0.42±0.01 ^{ab}	0.32±0.03 ^{ab}	2.26±0.04 ^{ab}	2.25±0.04 ^{ab}	1.76±0.05 ^{ab}
(E)-2-辛烯醛(二聚体)	C2548870	C ₈ H ₁₄ O	126.2	1055.9	431.326	1.830 06	0.18±0.06 ^{ab}	0.09±0.02 ^{ab}	0.11±0.00 ^{ab}	0.98±0.06 ^{ab}	0.98±0.04 ^{ab}	0.58±0.05 ^{ab}
辛醛(单聚体)	C124130	C ₈ H ₁₆ O	128.2	1014.8	372.183	1.401 66	2.92±0.11 ^{ab}	5.05±0.04 ^{ab}	5.25±0.18 ^{ab}	2.06±0.05 ^{ab}	2.27±0.10 ^{ab}	2.34±0.06 ^{ab}
辛醛(二聚体)	C124130	C ₈ H ₁₆ O	128.2	1005.3	358.644	1.831 90	4.54±0.34 ^{ab}	4.82±0.27 ^{ab}	4.19±0.45 ^{ab}	4.74±0.12 ^{ab}	6.14±0.19 ^{ab}	6.64±0.06 ^{ab}
3-辛烯醛(单聚体)	R286265	C ₈ H ₁₆ O	126.2	990.5	340.829	1.392 43	2.64±0.39 ^{ab}	4.30±0.11 ^{ab}	4.06±0.81 ^{ab}	1.08±0.04 ^{ab}	1.21±0.14 ^{ab}	1.37±0.07 ^{ab}
3-辛烯醛(二聚体)	R286265	C ₈ H ₁₆ O	126.2	988.6	339.156	1.802 96	1.49±0.05 ^{ab}	0.30±0.03 ^{ab}	0.26±0.11 ^{ab}	1.05±0.01 ^{ab}	1.10±0.07 ^{ab}	1.26±0.05 ^{ab}
苯甲醛(单聚体)	C100527	C ₇ H ₆ O	106.1	958.8	313.773	1.152 78	1.51±0.11 ^{ab}	1.44±0.06 ^{ab}	1.76±0.13 ^{ab}	0.88±0.02 ^{ab}	0.80±0.03 ^{ab}	1.09±0.05 ^{ab}
苯甲醛(二聚体)	C100527	C ₇ H ₆ O	106.1	958.8	313.773	1.476 89	1.21±0.07 ^{ab}	0.32±0.04 ^{ab}	0.42±0.03 ^{ab}	0.83±0.07 ^{ab}	0.59±0.08 ^{ab}	1.12±0.05 ^{ab}
(E)-2-庚烯醛	C18829555	C ₇ H ₁₂ O	112.2	953.3	309.090	1.676 19	0.75±0.09 ^{ab}	0.17±0.01 ^{ab}	0.20±0.01 ^{ab}	1.93±0.09 ^{ab}	2.84±0.05 ^{ab}	1.58±0.07 ^{ab}
庚醛(单聚体)	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	900.6	264.145	1.329 90	1.18±0.12 ^{ab}	2.66±0.05 ^{ab}	2.88±0.18 ^{ab}	0.61±0.01 ^{ab}	0.62±0.02 ^{ab}	0.66±0.04 ^{ab}
庚醛(二聚体)	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	900.6	264.145	1.708 66	2.83±0.02 ^{ab}	4.62±0.12 ^{ab}	4.47±0.31 ^{ab}	2.16±0.06 ^{ab}	2.53±0.09 ^{ab}	2.50±0.06 ^{ab}
己醛(单聚体)	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	796.5	205.650	1.255 44	1.18±0.17 ^{ab}	3.23±0.17 ^{ab}	3.54±0.27 ^{ab}	0.55±0.03 ^{ab}	0.55±0.02 ^{ab}	0.61±0.03 ^{ab}
己醛(二聚体)	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	800.3	207.684	1.568 78	8.28±0.21 ^{ab}	12.14±0.14 ^{ab}	12.36±0.83 ^{ab}	7.85±0.08 ^{ab}	7.06±0.12 ^{ab}	7.08±0.10 ^{ab}
(E)-2-戊烯醛(单聚体)	C1576870	C ₅ H ₁₀ O	84.1	748.8	184.687	1.107 02	0.13±0.02 ^{ab}	0.10±0.01 ^{ab}	0.10±0.00 ^{ab}	0.19±0.00 ^{ab}	0.20±0.01 ^{ab}	0.18±0.00 ^{ab}
(E)-2-戊烯醛(二聚体)	C1576870	C ₅ H ₁₀ O	84.1	747.5	184.158	1.363 78	0.07±0.01 ^{ab}	0.18±0.00 ^{ab}	0.03±0.01 ^{ab}	0.26±0.01 ^{ab}	0.50±0.01 ^{ab}	0.26±0.01 ^{ab}
(E)-2-己烯醛	C6728263	C ₆ H ₁₀ O	98.1	847.7	233.092	1.521 21	0.37±0.09 ^{ab}	0.12±0.01 ^{ab}	0.08±0.01 ^{ab}	0.83±0.04 ^{ab}	1.31±0.04 ^{ab}	0.63±0.05 ^{ab}
戊醛(单聚体)	C110623	C ₅ H ₁₀ O	86.1	697.5	163.880	1.185 41	1.08±0.10 ^{ab}	2.23±0.09 ^{ab}	2.40±0.20 ^{ab}	0.55±0.01 ^{ab}	0.58±0.02 ^{ab}	0.58±0.03 ^{ab}
戊醛(二聚体)	C110623	C ₅ H ₁₀ O	86.1	694.1	162.509	1.429 47	5.18±0.03 ^{ab}	5.65±0.11 ^{ab}	5.33±0.36 ^{ab}	5.48±0.11 ^{ab}	5.91±0.11 ^{ab}	5.88±0.05 ^{ab}
2-甲基丁醛(单聚体)	C96173	C ₅ H ₁₀ O	86.1	663.8	153.599	1.164 81	0.36±0.02 ^{ab}	0.61±0.01 ^{ab}	0.60±0.04 ^{ab}	0.24±0.01 ^{ab}	0.22±0.01 ^{ab}	0.28±0.01 ^{ab}
2-甲基丁醛(二聚体)	C96173	C ₅ H ₁₀ O	86.1	662.2	152.913	1.397 55	1.30±0.04 ^{ab}	1.21±0.05 ^{ab}	0.89±0.06 ^{ab}	1.11±0.01 ^{ab}	1.07±0.01 ^{ab}	0.98±0.00 ^{ab}
3-甲基丁醛(单聚体)	C590863	C ₅ H ₁₀ O	86.1	642.6	147.887	1.176 14	0.52±0.02 ^{ab}	0.99±0.04 ^{ab}	0.96±0.06 ^{ab}	0.36±0.01 ^{ab}	0.45±0.02 ^{ab}	0.44±0.03 ^{ab}
3-甲基丁醛(二聚体)	C590863	C ₅ H ₁₀ O	86.1	643.5	148.116	1.417 11	2.36±0.09 ^{ab}	1.78±0.10 ^{ab}	1.17±0.06 ^{ab}	2.22±0.03 ^{ab}	1.83±0.02 ^{ab}	1.62±0.06 ^{ab}
丁醛	C123728	C ₄ H ₈ O	72.1	551.1	123.212	1.286 33	0.35±0.02 ^{ab}	0.16±0.01 ^{ab}	0.14±0.01 ^{ab}	0.49±0.02 ^{ab}	0.58±0.01 ^{ab}	0.50±0.01 ^{ab}
酮类												
2-甲基-3-庚酮	C13019200	C ₈ H ₁₆ O	128.2	1089.0	479.069	1.283 48	0.59±0.08 ^{ab}	0.18±0.01 ^{ab}	0.15±0.01 ^{ab}	1.68±0.08 ^{ab}	1.30±0.07 ^{ab}	1.19±0.15 ^{ab}
3-羟基-2-丁酮	C513860	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	712.7	170.049	1.057 72	0.04±0.00 ^{ab}	0.11±0.01 ^{ab}	0.10±0.02 ^{ab}	0.02±0.00 ^{ab}	0.03±0.00 ^{ab}	0.03±0.00 ^{ab}
2-丁酮(单聚体)	C78933	C ₄ H ₈ O	72.1	576.5	130.066	1.250 29	0.76±0.09 ^{ab}	1.60±0.05 ^{ab}	1.59±0.14 ^{ab}	0.28±0.01 ^{ab}	0.25±0.02 ^{ab}	0.28±0.04 ^{ab}
2-丁酮(二聚体)	C78933	C ₄ H ₈ O	72.1	580.8	131.209	1.062 87	6.34±0.27 ^{ab}	4.05±0.12 ^{ab}	4.16±0.34 ^{ab}	6.12±0.27 ^{ab}	4.02±0.22 ^{ab}	4.82±0.27 ^{ab}
丙酮	C67641	C ₃ H ₆ O	58.1	485.0	105.392	1.122 59	7.59±0.09 ^{ab}	4.43±0.17 ^{ab}	7.90±0.36 ^{ab}	7.08±0.12 ^{ab}	4.78±0.04 ^{ab}	6.19±0.05 ^{ab}
2,3-丁二酮	C431038	C ₄ H ₆ O ₂	86.1	573.1	129.153	1.175 11	0.04±0.00 ^{ab}	0.15±0.02 ^{ab}	0.13±0.02 ^{ab}	0.05±0.00 ^{ab}	0.05±0.00 ^{ab}	0.04±0.01 ^{ab}
2-庚酮	C110430	C ₇ H ₁₄ O	114.2	893.3	257.867	1.639 07	2.57±0.20 ^{ab}	0.45±0.04 ^{ab}	0.39±0.09 ^{ab}	4.06±0.11 ^{ab}	4.16±0.07 ^{ab}	3.54±0.08 ^{ab}
4-甲基-2-戊酮	C108101	C ₆ H ₁₂ O	100.2	731.3	177.623	1.483 94	0.13±0.01 ^{ab}	0.13±0.03 ^{ab}	0.28±0.00 ^{ab}	0.23±0.00 ^{ab}	0.23±0.00 ^{ab}	0.20±0.02 ^{ab}
甲基庚烯酮	C110930	C ₈ H ₁₄ O	126.2	990.3	340.662	1.182 89	0.10±0.00 ^{ab}	0.07±0.01 ^{ab}	0.08±0.02 ^{ab}	0.11±0.00 ^{ab}	0.09±0.00 ^{ab}	0.10±0.00 ^{ab}
(E)-3-戊烯-2-酮	C3102338	C ₅ H ₈ O	84.1	737.2	179.977	1.094 59	0.02±0.00 ^{ab}	0.01±0.00 ^{ab}	0.01±0.00 ^{ab}	0.01±0.00 ^{ab}	0.02±0.00 ^{ab}	0.01±0.00 ^{ab}
2-戊酮	C107879	C ₅ H ₁₀ O	86.1	691.7	161.553	1.377 08	0.31±0.01 ^{ab}	0.17±0.01 ^{ab}	0.15±0.02 ^{ab}	0.40±0.01 ^{ab}	0.43±0.01 ^{ab}	0.34±0.01 ^{ab}
醇类												
1-辛烯-3-醇(单聚体)	C3391864	C ₈ H ₁₆ O	128.2	984.7	335.841	1.161 61	3.23±0.16 ^{ab}	1.69±0.07 ^{ab}	1.38±0.18 ^{ab}	2.49±0.06 ^{ab}	2.73±0.03 ^{ab}	2.40±0.05 ^{ab}
1-辛烯-3-醇(二聚体)	C3391864	C ₈ H ₁₆ O	128.2	979.5	331.407	1.603 53	1.14±0.04 ^{ab}	0.22±0.02 ^{ab}	0.16±0.03 ^{ab}	1.23±0.02 ^{ab}	1.27±0.04 ^{ab}	0.93±0.01 ^{ab}
正戊醇(单聚体)	C71410	C ₅ H ₁₂ O	88.1	764.1	190.919	1.255 50	0.90±0.07 ^{ab}	1.42±0.02 ^{ab}	1.51±0.15 ^{ab}	0.47±0.01 ^{ab}	0.33±0.02 ^{ab}	0.55±0.04 ^{ab}
正戊醇(二聚体)	C71410	C ₅ H ₁₂ O	88.1	763.5	190.678	1.516 38	1.50±0.06 ^{ab}	0.69±0.16 ^{ab}	0.94±0.16 ^{ab}	1.20±0.02 ^{ab}	1.41±0.01 ^{ab}	1.24±0.04 ^{ab}
正己醇(单聚体)	C111273	C ₆ H ₁₄ O	102.2	872.9	246.609	1.325 37	0.69±0.06 ^{ab}	0.60±0.05 ^{ab}	0.55±0.01 ^{ab}	0.40±0.01 ^{ab}	0.30±0.01 ^{ab}	0.28±0.02 ^{ab}
正己醇(二聚体)	C111273	C ₆ H ₁₄ O	102.2	868.4	244.198	1.644 49	0.78±0.03 ^{ab}	0.13±0.01 ^{ab}	0.10±0.01 ^{ab}	0.81±0.07 ^{ab}	0.54±0.05 ^{ab}	0.37±0.01 ^{ab}
2-乙基己醇	C104767	C ₈ H ₁₈ O	130.2	1030.0	393.572	1.406 26	0.23±0.00 ^{ab}	0.34±0.01 ^{ab}	0.36±0.03 ^{ab}	0.16±0.01 ^{ab}	0.22±0.00 ^{ab}	0.22±0.01 ^{ab}
其他类												
苯乙烯	C100425	C ₈ H ₈	104.2	892.3	257.016	1.428 84	1.34±0.12 ^{ab}	2.01±0.19 ^{ab}	1.88±0.31 ^{ab}	0.68±0.09 ^{ab}	0.85±0.05 ^{ab}	0.99±0.04 ^{ab}
二乙基硫醚	C352932	C ₆ H ₁₄ S	90.2	723.7	174.525	1.044 70	0.20±0.03 ^{ab}	0.46±0.01 ^{ab}	0.40±0.04 ^{ab}	0.06±0.00 ^{ab}	0.08±0.01 ^{ab}	0.07±0.01 ^{ab}
乙酸乙酯(单聚体)	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	610.4	139.205	1.098 91	0.54±0.02 ^{ab}	1.14±0.05 ^{ab}	1.25±0.08 ^{ab}	0.47±0.05 ^{ab}	0.61±0.04 ^{ab}	0.55±0.05 ^{ab}
乙酸乙酯(二聚体)	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	608.7	138.748	1.340 91	0.77±0.06 ^{ab}	1.73±0.12 ^{ab}	2.04±0.25 ^{ab}	0.95±0.26 ^{ab}	1.38±0.32 ^{ab}	1.27±0.35 ^{ab}
乙酸丁酯	C123864	C ₆ H ₁₂ O ₂	116.2	818.8	217.621	1.620 02	0.41±0.04 ^{ab}	0.25±0.03 ^{ab}	0.21±0.06 ^{ab}	0.48±0.02 ^{ab}	0.45±0.01 ^{ab}	0.47±0.01 ^{ab}
乙酸丙酯	C109604	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	707.1	167.781	1.482 02	0.35±0.03 ^{ab}	0.10±0.01 ^{ab}	0.09±0.02 ^{ab}	0.44±0.01 ^{ab}	0.37±0.01 ^{ab}	0.36±0.01 ^{ab}
四氢呋喃	C109999	C ₄ H ₈ O	72.1	628.2	144.003	1.064 93	0.44±0.02 ^{ab}	0.47±0.02 ^{ab}	0.54±0.05 ^{ab}	0.32±0.01 ^{ab}	0.30±0.02 ^{ab}	0.32±0.03 ^{ab}
吡咯	C109977	C ₄ H ₆ N	67.1	738.0	180.330	0.966 07	0.23±0.01 ^{ab}	0.42±0.01 ^{ab}	0.39±0.03			

在,因此在两种温度处理过程中差异较大、含量较高、且阈值较低的物质也可能是构成鸭腥味的主要成分,包括辛醛、3-辛烯醛、苯甲醛、庚醛、己醛、戊醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、2-丁酮和丙酮等。研究表明,醛类物质中庚醛和己醛是 ω -6多不饱和脂肪酸中亚油酸和花生四烯酸的氧化产物;己醛具有青草、鱼腥味^[23],目前被广泛认为是肉品中的腥味特征物质,也有研究将其定义为鸭腥味^[24];庚醛具有油脂味;辛醛和壬醛主要源于油酸的氧化^[25],辛醛赋予肉品油脂味^[26],壬醛具有特殊的清香、鱼腥、油脂及水果味^[20];戊醛呈现面包香和水果香味^[26]及青草味^[27];癸醛具有青草、脂肪及水果香味^[28];任志伟^[29]的报道中表明己醛、庚醛、辛醛、壬醛、戊醛等低级醛因其具有强烈刺激气味,而引起鸭肉异味。亚油酸和亚麻酸降解产生烯醛类物质^[30],一般具有青草、油脂香味^[31];苯甲醛具有苦杏仁味及略带水果香味^[32],张晶晶等^[33]认为苯甲醛也具有金属味;2-甲基丁醛、3-甲基丁醛具有苹果香气,江津津等^[34]和吉思茹^[35]的报道中显示2-甲基丁醛呈现强烈的炙烤味、焦味,3-甲基丁醛呈现油脂味,且与其他风味物质有很强的叠加效应。酮类物质中2-酮类对肉品风味具有重要贡献^[36],其中2-庚酮通常具有令人愉悦的香气,但周蓓蓓等^[37]认为其具有动物特征味和油脂味,且在酮类物质中占比较高;2-丁酮具有清香、醚香及果香^[38];2-戊酮具有刺激性气味;丙酮在样品中相对含量较高,促进了肉品中奶香味的形成^[4]。此外,有研究表明酮类物质对腥味消减存在一定作用^[39]。醇类物质中1-辛烯-3-醇是一种不饱

和脂肪醇,源于亚油酸氧化,具有清香、蘑菇香及土腥味^[31],其阈值较低,对鸭肉气味贡献很大,可能是引起鸭肉腥味的一种重要特征物质^[40]。酯类物质主要通过肉中脂肪氧化及醇酯化反应得到,一般具有果香、花香、奶油及脂肪香味^[41]。其中乙酸乙酯具有清新果香和酒香气味^[42],对鸭肉气味具有积极作用,故不作为造成鸭肉腥味的特征物质。

2.4 两种温度处理鸭肉中关键性风味物质的ROAV及腥味特征物质的确定

根据挥发性风味物质相对含量并不能有效说明其对样品整体风味起关键性作用,还需结合自身风味阈值进行分析。目前,ROAV法广泛应用于分析各类肉品中关键性风味化合物^[43]。为进一步筛选造成鸭肉腥味的特征物质,选择挥发性物质中相对含量较高、阈值较低或相对含量变化较大的挥发性物质,将其相对含量与风味阈值结合,计算各类挥发性风味物质的ROAV。如表3所示,辛醛在样品中相对含量较高,且阈值较低(0.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$),故选择辛醛作为鸭肉关键性风味物质,为ROAV_{stan}(100)。两种温度处理的3个部位鸭肉中ROAV ≥ 1 的关键性风味物质包括壬醛、辛醛、庚醛、癸醛、戊醛、己醛、(E)-2-辛烯醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、1-辛烯-3-醇和乙酸乙酯。此外,在60 $^{\circ}\text{C}$ 处理组中,鸭腿和鸭锁骨中2-庚酮ROAV < 1 ,(E)-2-庚烯醛在3个部位中均ROAV < 1 ,但在90 $^{\circ}\text{C}$ 处理组中2-庚酮、(E)-2-庚烯醛等ROAV均增加,且2-庚酮在3个部位的ROAV > 1 ,(E)-2-庚烯醛在鸭胸和鸭腿中ROAV > 1 ,在鸭锁骨中接

表3 两种温度处理不同部位鸭肉挥发性风味物质阈值及ROAV^[14,26-27,34,45-49]

Table 3 Threshold values and ROAVs of volatile flavor compounds in duck meat from different body parts cooked at different temperatures^[14,26-27,34,44-48]

序号	挥发性物质	阈值/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	气味特征描述	ROAV					
				X60	T60	S60	X90	T90	S90
1	壬醛	1	脂肪味、清香、油脂、鱼腥味、柑橘味	217.54	152.60	139.08	265.90	236.90	227.94
2	辛醛	0.7	油脂味、青草味	100	100	100	100	100	100
3	庚醛	3	鱼腥味、油脂味	12.54	17.19	18.17	9.53	8.74	8.23
4	癸醛	0.1	脂肪味、青草味、黄瓜味	59.13	28.62	40.29	85.20	45.53	49.29
5	丁醛	11	刺激性气味	0.29	0.10	0.10	0.46	0.44	0.35
6	戊醛	12	水果香、面包香、青草味	4.89	4.66	4.78	5.17	4.51	4.20
7	己醛	4.5	青草味、鱼腥味、脂肪味	19.71	24.21	26.19	19.22	14.09	13.32
8	(E)-2-辛烯醛	3	脂肪味、清香、青草味	4.28	1.22	1.06	11.13	8.98	6.09
9	(E)-2-庚烯醛	13	清香、油脂味	0.54	0.09	0.12	1.52	1.82	0.95
10	(E)-2-己烯醛	17	绿叶清香、水果香	0.21	0.05	0.03	0.51	0.64	0.29
11	2-甲基丁醛	1	苹果香、强烈的炙烤味、焦味	15.59	12.86	11.08	13.82	10.71	9.81
12	3-甲基丁醛	2	苹果香、油脂味	13.52	9.83	7.90	13.28	9.52	8.06
13	苯甲醛	350	苦杏仁味、坚果香、金属味	0.07	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05
14	2-庚酮	9	令人愉快的气味/皂香、油脂味	2.68	0.35	0.32	4.64	3.85	3.06
15	2-丁酮	50 000	—	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
16	2-戊酮	70 000	刺激性气味	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
17	丙酮	500 000	—	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
18	1-辛烯-3-醇	1	油膩味、土腥味、蘑菇味、金属味	40.96	13.57	11.41	38.34	33.27	25.95
19	正己醇	250	水果香	0.06	0.02	0.02	0.05	0.03	0.02
20	乙酸乙酯	5	甜果香	2.47	4.07	4.88	2.93	3.32	2.84
21	乙酸丁酯	66	水果香	0.06	0.03	0.02	0.07	0.06	0.06

注:一.未查到该物质气味描述词汇。部分重要挥发性风味物质的相关阈值未查到,故不作分析。

近1,对鸭肉整体气味具有重要贡献;庚醛、戊醛(除鸭胸肉组)、己醛等物质在90℃处理组中ROAV下降,这可能是鸭肉经过高温加热物质间发生了反应,其产生的降解产物发生反应所致^[40];90℃处理组中,1-辛烯-3-醇ROAV在鸭胸中下降,而在鸭腿与鸭锁骨中上升,这可能是鸭胸处理过程中1-辛烯-3-醇向醛、酮等物质发生转变而造成^[49]。由表3可知,处理组中丁醛和(E)-2-己烯醛ROAV在0.1~1之间(包括0.1),对鸭肉整体气味起重要修饰作用。结合嗅闻评价、主要挥发性物质气味描述及风味物质评价分析可以得出,造成90℃处理鸭肉腥味加重的特征物质包括壬醛、辛醛、癸醛、(E)-2-辛烯醛、(E)-2-庚烯醛及2-庚酮;并且由于鸭肉自身腥味的存在,庚醛、戊醛、己醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛及1-辛烯-3-醇也与鸭肉腥味形成密切相关;此外,丁醛带来的刺激性气味也会引起人体不适,这些特征挥发性物质之间发生交互作用共同构成鸭肉腥味。

2.5 鸭肉腥味特征物质PCA

选取上述分析得到的12种鸭肉腥味特征物质进行PCA,如图6所示,PC1和PC2的累计贡献率达到82.7%,两种温度处理的鸭肉样品能够较完整区分。60℃处理的鸭腿和鸭锁骨均与鸭胸存在明显区分,鸭腿与鸭锁骨相对接近,而90℃处理的3个部位鸭肉距离均较为接近,该结果与电子鼻分析结果基本一致。在PC1上,90℃处理的3个部位鸭肉得分最高,且均为正值,其次是60℃处理的鸭胸。(E)-2-庚烯醛、壬醛、(E)-2-辛烯醛、2-庚酮在PC1上的载荷较大,可以明显将90℃处理组与60℃处理组进行区分;而1-辛烯-3-醇及癸醛在PC1上能将60℃处理的鸭胸与鸭腿及鸭锁骨进行区分。其他6种挥发性物质在PC1上的载荷为负,这些物质可以将60℃处理的鸭腿与鸭锁骨进行区分。在PC2上,60℃处理的鸭锁骨得分为负,己醛和2-甲基丁醛将其与其他样品区分开;60℃处理的鸭腿得分为正,3-甲基丁醛、辛醛、戊醛和庚醛可将其与其他样品进行区分。这12种鸭肉腥味特征物质因其种类及含量的差异使不同处理组鸭肉样品各具特征气味,对鸭肉腥味形成具有重要贡献,其他物质对于鸭腥味形成是否有促进作用,还有待进一步分析。

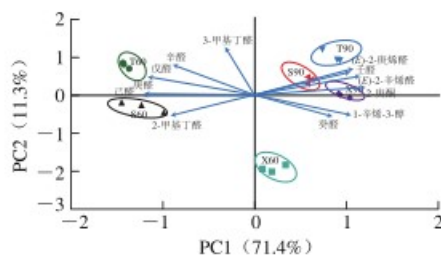


图6 两种温度处理不同部位鸭肉腥味特征物质PCA得分图和载荷图
Fig. 6 PCA score plot and loading plot of characteristic odorants in duck meat from different body parts cooked at different temperatures

3 结论

以樱桃谷鸭为研究对象,利用HS-GC-IMS分别对60、90℃两种温度煮制后的鸭胸、鸭腿、鸭锁骨等部位鸭肉的挥发性成分进行测定,根据ROAV确定关键风味物质,与嗅闻评价结果相结合确定鸭肉腥味特征物质。嗅闻评价结果表明,90℃处理的各部位鸭肉腥味重于60℃;60℃处理组中鸭胸与鸭腿及鸭锁骨的腥味特征存在部分差异,而90℃处理组中鸭肉3个部位腥味特征接近,电子鼻分析结果也验证了这一点。同时基于HS-GC-IMS技术共鉴定出61种挥发性物质,鉴定发现不同处理组鸭肉样品中挥发性物质种类基本一致,主要包括醛类、酮类、醇类等物质,其含量差异可能与鸭肉腥味差异有关。结合嗅闻评价结果与ROAV共筛选出12种腥味特征物质,分别为壬醛、辛醛、庚醛、癸醛、戊醛、己醛、(E)-2-辛烯醛、(E)-2-庚烯醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、2-庚酮和1-辛烯-3-醇,这些物质相互作用共同构成鸭肉腥味。另外,这12种腥味特征物质可以很好地对不同处理组鸭肉样品进行区分。针对鸭肉腥味的特征成分,可为后期在加工过程中减少鸭腥味、拓宽鸭肉的加工渠道提供一定参考。

参考文献:

- [1] 侯水生,周正奎.肉鸭种业的昨天及今天和明天[J].中国畜牧业,2021,18(4):23-26. DOI:10.3969/j.issn.2095-2473.2021.18.013.
- [2] SHIN D M, KIM D H, YUNE J H, et al. Oxidative stability and quality characteristics of duck, chicken, swine and bovine skin fats extracted by pressurized hot water extraction[J]. Food Science of Animal Resources, 2019, 39(3): 446-458. DOI:10.5851/kosfa.2019.e41.
- [3] SHIM J Y, KIM T K, KIM Y B, et al. The ratios of pre-emulsified duck skin for optimized processing of restructured ham[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2018, 38(1): 162-171. DOI:10.5851/kosfa.2018.38.1.162.
- [4] 何苗.福建风味鸭在贮藏过程中色泽和风味变化及调控研究[D].无锡:江南大学,2014:6-21.
- [5] BERIAIN M J, MURILLO-ARBIZU M T, INSAUSTI K, et al. Raw-cured spanish traditional meat product "Chistorra de Navarra": sensory and composition quality standards[J]. Foods, 2020, 9(8): 1-13. DOI:10.3390/foods9081006.
- [6] SOHAIL A, AL DALALI S, WANG J, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: a review[J]. Food Research International (Ottawa, Ont), 2022, 157: 111385. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111385.
- [7] 马洁.热处理过程中鸭蛋腥味形成规律的研究及调控[D].北京:北京农学院,2019:1-38.
- [8] CAVANNA D, ZANARDI S, DALL'ASTA C, et al. Ion mobility spectrometry coupled to gas chromatography: a rapid tool to assess eggs freshness[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 691-696. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.07.204.
- [9] 周晨曦,郑福平,孙宝国.离子迁移谱技术在食品风味分析中的应用研究进展[J].食品工业科技,2019,40(18):309-318. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.18.050.

- [10] 农业农村部. 畜禽肉分割技术规程 鸭肉: NY/T 3962—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-8.
- [11] 徐树来, 王永华. 食品感官分析与实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 39-149.
- [12] 孟子晴, 赵改名, 祝超智, 等. 基于电子鼻与模糊数学建立熏牛肉品质评价法[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 219-225. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024110.
- [13] 李聪. 磷脂分子及加工工艺对盐水鸭特征风味形成影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 12-28.
- [14] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210305-067.
- [15] 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. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2008.07.082.
- [16] 李璐. 电子鼻结合GC-MS对羊肉掺假鸭肉快速检测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 12-25.
- [17] JIA S L, LI Y, ZHUANG S, et al. Biochemical changes induced by dominant bacteria in chill-stored silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and GC-IMS identification of volatile organic compounds[J]. Food Microbiology, 2019, 84: 103248. DOI:10.1016/j.fm.2019.103248.
- [18] PAVLIDIS D E, MALLOUCHOS A, ERCOLINI D, et al. A volatilomics approach for off-line discrimination of minced beef and pork meat and their admixture using HS-SPME GC/MS in tandem with multivariate data analysis[J]. Meat, 2019, 151: 43-53. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.01.003.
- [19] SONG J X, SHAO Y, YAN Y M, et al. Characterization of volatile profiles of three colored quinoas based on GC-IMS and PCA[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146(1): 111292. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111292.
- [20] 姚文生, 蔡莹莹, 刘登勇, 等. 基于HS-GC-IMS和HS-SPME-GC-MS的熏鸡腿肉挥发性风味成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 253-261. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025979.
- [21] 徐永霞, 刘滢, 姜程程, 等. 电子鼻结合气质联用法分析大菱鲆冷藏过程中挥发性成分变化[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(1): 193-197. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2014.01.005.
- [22] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180612-193.
- [23] 尹一鸣, 徐永霞, 张朝敏, 等. 水产品贮藏期间风味劣变机理的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 269-274. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.023480.
- [24] AZARBAD M H, JELEŇ H. Determination of hexanal—an indicator of lipid oxidation by static headspace gas chromatography (SHS-GC) in fat-rich food matrices[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(7): 1727-1733. DOI:10.1007/s12161-014-0043-0.
- [25] GASPARDO B, PROCIDA G, TOSO B, et al. Determination of volatile compounds in San Daniele ham using headspace GC-MS[J]. Meat Science, 2008, 80(2): 204-209. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.11.021.
- [26] 王琼, 李聪, 高磊峰, 等. 不同类型烟熏香精对西式培根风味的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(7): 220-230. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.7.032.
- [27] 刘同, 杨悠悠, 刘大鹏, 等. 肉鸭胸肌特异挥发性风味物质的鉴定[J]. 畜牧兽医学报, 2022, 53(2): 402-413. DOI:10.11843/j.issn.0366-6964.2022.02.008.
- [28] 辛茜. 大鲵肉、油脂物质分析及脱除技术研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2019: 2-18.
- [29] 任志伟. 鸭肉熟制品WOF异味抑制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012: 1-23.
- [30] 顾赛麒, 唐锦晶, 周绪霞, 等. 腌腊鱼传统日晒干制过程中品质变化与香气形成[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 36-44. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180716-201.
- [31] 徐永霞, 白旭婷, 冯媛, 等. 基于GC-IMS和化学计量学分析海鲈鱼肉蒸制过程中风味物质的变化[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 270-275. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201219-221.
- [32] MAHDIEH I, HAMID E, BEHROUZ A A, et al. SPME/GC-MS characterization of volatile compounds of Iranian traditional dried Kashk[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 21(1): 1067-1079. DOI:10.1080/10942912.2018.1466323.
- [33] 张晶晶, 王锡昌, 施文正. 白姑鱼和小黄鱼肉中挥发性风味物质的鉴定[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 206-213. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180901-001.
- [34] 江津津, 严静, 郑玉玺, 等. 不同产地传统鱼露风味特征差异分析[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 206-214. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200825-335.
- [35] 吉思茹. 蒸制中华绒螯蟹关键性气味物质的鉴定研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016: 16-32.
- [36] 丁习林, 王桂瑛, 邹颖玲, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱结合多元统计学分析KCl部分替代NaCl对宣威火腿挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 190-198. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191226-311.
- [37] 周蓓蓓, 张东红, 杨松, 等. 绿头野鸭挥发性风味物质的检测[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 57-62; 67. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.08.003.
- [38] 邹英子. 传统良种猪肉与瘦肉型猪肉挥发性风味成分的差异分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012: 9-38.
- [39] 巨晓军, 单艳菊, 刘一帆, 等. 基于气相-离子迁移谱技术分析不同生长速度肉鸡肌肉中挥发性有机物的差异[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(3): 170-175. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025140.
- [40] XIE Q S, XU B C, XU Y, et al. Effects of different thermal treatment temperatures on volatile flavour compounds of water-boiled salted duck after packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112625. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112625.
- [41] 孟维一, 古瑞, 徐淇淇, 等. 顶空气相色谱-离子迁移谱分析不同部位和品种猪肉的挥发性风味化合物[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 206-212. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210103-012.
- [42] WANG J M, JIN G F, ZHANG W G, 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. DOI:10.1016/j.lwt.2012.02.020.
- [43] ZHANG Y R, ZHANG S W, FAN W X, et al. Identification of volatile compounds and odour activity values in quinoa porridge by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(8): 3957-3966. DOI:10.1002/jsfa.9621.
- [44] 刘俊霞, 赵萍, 金品, 等. 基于GC-IMS结合化学计量学分析大鲵肉冷藏期间挥发性成分[J]. 食品与发酵工业, 2022, 19(4): 1-14. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030169.
- [45] 彭旭怡, 郑经绍, 刘宇航, 等. 基于电子鼻、顶空气相色谱-离子迁移谱分析比较不同杀菌处理紫米甜酒酿中的挥发性成分[J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 259-268. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.7.1091.
- [46] 刘方芳. 美国大口胭脂鱼关键挥发性气味物质的分析及脱腥技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 9-16.
- [47] 曾欢. 淡水鱼体内腥味物质的鉴定及生物脱腥方法研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 24-47.
- [48] 田淑琳, 周文红, 刘小玲, 等. 基于GC-O-MS和ROAV法的马氏珍珠贝挥发性风味成分及腥味特征物质分析[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 573-579. DOI:10.16535/j.cnki.dlhyxb.2019.04.017.
- [49] WANG D, ZHANG J, ZHU Z S, et al. Effect of ageing time on the flavour compounds in Nanjing water-boiled salted duck detected by HS-GC-IMS[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 155. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112870.