



# HS-SPME-GC-MS 技术结合电子鼻分析热处理对南京盐水鸭高温蒸煮味的影响

吴世豪<sup>1</sup>, 黄天然<sup>2</sup>, 黄明<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>南京农业大学食品科技学院/肉类加工与质量控制教育部重点实验室, 南京 210095; <sup>2</sup>南京黄教授食品科技有限公司/国家禽肉加工技术研发专业中心/江苏省畜禽产品加工工程技术研究中心, 南京 211225

**摘要:**【目的】以南京盐水鸭为研究对象, 通过风味检测技术研究热处理对其高温蒸煮味(warmed-over flavor, WOF)产生的影响, 并对其高温蒸煮味的主要成分进行分析, 填补南京盐水鸭高温蒸煮味相关研究的空白, 为禽类加工方向的异味控制提供一定的科学依据。【方法】选用 12 只樱桃谷鸭鸭腿为原料, 经过清洗、干腌、湿腌、凉胚、煮制后制作成南京盐水鸭, 待其冷却后利用高温蒸煮袋进行真空包装, 随机分成 4 组。其中一组作为对照组不作热处理, 另外 3 组则分别作不同温度的热处理, 探究在不同热处理条件下(80 °C 50 min、100 °C 30 min 和 121 °C 15 min)盐水鸭挥发性气味物质的种类及含量的变化, 利用 HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻与感官评价, 通过聚类分析、PLS-DA 分析研究热处理对南京盐水鸭蒸煮味形成的影响。【结果】不同热处理条件下南京盐水鸭的挥发性风味物质种类及含量均有所差异。感官评定的结果显示 121 °C 处理组的高温蒸煮味最重, 然后是 100 °C、80 °C 热处理组, 其中未进行热处理的盐水鸭风味最好。GC-MS 的结果显示, 4 个组共检出 78 种风味化合物, 主要包括醛类、酮类、烃类、醇类和含氮含硫及苯系物。对这 78 种风味物质进行 OAV 分析, 发现其中共有 22 种 OAV > 1 的活性气味物质, 对 22 种活性气味物质进行聚类分析, 结果显示戊醛、2-庚酮、癸醛、十二醛、辛醛、己醛、庚醛、壬醛、2,5-辛二酮、1-辛烯-3-醇和 2-戊基呋喃在 121 °C 处理组含量最高。对 22 种气味物质进行 OPLS-DA 分析, 结果显示壬醛、辛醛、戊醛、1-辛烯-3-醇和 2-戊基呋喃的 VIP > 1, 且其在 121 °C 处理组中含量最高( $P < 0.05$ )。【结论】121 °C 高温热处理能够显著促进盐水鸭中脂质的氧化降解, 使代表性香气物质含量显著下降, 代表性异味物质含量显著上升, 挥发性风味物质中的壬醛、辛醛、戊醛、1-辛烯-3-醇和 2-戊基呋喃是南京盐水鸭高温蒸煮味的主要成分。

**关键词:** 南京盐水鸭; 热处理; 高温蒸煮味; 挥发性化合物

## Effect of Heat Treatment on the Warmed-Over Flavor of Nanjing Water-Boiled Salted Duck Detected by HS-SPME-GC-MS Technology and Electronic Nose

WU ShiHao<sup>1</sup>, HUANG TianRan<sup>2</sup>, HUANG Ming<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>College of Food Science and Technology/Key Laboratory of Meat Processing and Quality Control, Ministry of Education, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095; <sup>2</sup>Nanjing Huangjiaoshou Food Science and Technology Co., Ltd./National R&D Center for Poultry Processing/Jiangsu Research Center for Livestock and Poultry Products Processing Engineering Technology, Nanjing 211225

收稿日期: 2023-03-13; 接受日期: 2023-05-31

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)3194)、南京市科技计划项目(“一区一中心”联动专项项目)(202212003)

联系方式: 吴世豪, E-mail: 2428092648@qq.com. 通信作者黄明, E-mail: mhuang@njau.edu.cn

**Abstract:** 【Objective】 By using flavor detection technology, the effect of heat treatment on Nanjing water-boiled salted duck's warmed-over flavor (WOF) was investigated, and the main components of warmed-over flavor were identified. The study could fill the gap in research on warmed-over flavor of Nanjing water-boiled salted duck, as well as provide a basis for controlling the odor associated with poultry processing. 【Method】 The raw materials for the Nanjing water-boiled salted duck were 12 cherry valley duck legs, washed, dry pickled, wet pickled, cooled, and boiled. The samples were vacuum packed in high-temperature retort pouches and randomly divided into four groups after cooling. In order to examine the changes in volatile odor substances in water-boiled salted ducks after heat treatment, one group was used as a control without heat treatment, and the other three groups were heated at different temperatures (80 °C 50 min, 100 °C 30 min, and 121 °C 15 min). By using HS-SPME-GC-MS in combination with electronic nose and sensory evaluation, the effect of heat treatment on Nanjing water-boiled salted duck's warmed-over flavor was studied by cluster analysis and PLS-DA. 【Result】 Under different heat treatment conditions, Nanjing water-boiled salted duck contained different volatile flavor substances. Sensory evaluation showed that the highest warmed-over flavor was found in the 121 °C heat treatment group, followed by 100 °C and 80 °C group, and the best flavor was found in water-boiled salted duck without heat treatment. A total of 78 flavor compounds were detected in the four groups, mainly including aldehydes, ketones, hydrocarbons, alcohols, nitrogenous sulfur, and benzene. These 78 flavor substances were analyzed for OAV, and 22 active odors were detected with  $OA V > 1$ , among these 22 active odor substances, cluster analysis showed that Valeraldehyde, 2-Heptanone, Decanal, Dodecanal, Octanal, Hexanal, Heptanal, Nonanal, 2,5-Octanedione, 1-Octen-3-ol and 2-Pentylfuran were the most abundant in the 121 °C group. Nonanal, Octanal, Valeraldehyde, 1-Octen-3-ol, and 2-Pentylfuran were found to have  $VIP > 1$  and the highest content at 121 °C in the OPLS-DA analysis ( $P < 0.05$ ). 【Conclusion】 It has been found that heat treatment at 121 °C increased oxidative degradation of lipids in water-boiled salted duck, significantly reduced the content of representative aroma substances, and increased the amount of representative odor substances. Nanjing water-boiled salted duck's warmed-over flavor mainly consisted of Nonanal, Octanal, Valeraldehyde, 1-Octen-3-ol, and 2-Pentylfuran.

**Key words:** Nanjing water-boiled salted duck; heat treatment; warmed-over flavor; volatile compounds

## 0 引言

【研究意义】南京盐水鸭(Nanjing water-boiled salted duck)是一种中国传统的低温酱卤肉制品,其以质地细嫩,味道鲜美,风味独特而闻名。LIU等<sup>[1]</sup>研究了南京盐水鸭加工过程中挥发性化合物的变化,发现挥发性化合物的成分和含量受干法、腌制和煮沸等处理过程的影响。在现代盐水鸭的工业化生产中,一些微生物在包装过程中仍会有所残留并繁殖<sup>[2]</sup>,有些甚至会在运输时因外界温度的改变导致其品质发生劣变,这会对肉制品的颜色、风味和安全产生不利影响,从而危害到食品安全<sup>[3-6]</sup>。目前的食品企业一般都会使用常见的121 °C高压蒸汽灭菌工艺,这种方式可以保证产品的食用安全,但是会对产品的气味、滋味、口感带来不好的影响<sup>[7]</sup>,同时还会产生较重的高温蒸煮味(warmed-over flavor, WOF),也就是经常被提及的“罐头味”“过温味”或者“过熟味”。因此,找出南京盐水鸭高温蒸煮味的主要成分物质尤为重要,可为后续高温蒸煮味的抑制等相关研究提供科学依据。【前人研究进展】高温蒸煮味常常呈现出“纸板味”“油漆味”和“金属味”等<sup>[8]</sup>,在商品包装被拆开时,这种异味会很明显

地被消费者感受到,从而降低食用及购买的欲望<sup>[9-10]</sup>。STANGELO等<sup>[11]</sup>对新鲜的、刚煮制过的以及贮藏后再加热的牛肉进行了测定,结果显示导致牛肉高温蒸煮味的主要气味物质是己醛和2,3-辛二酮。AJUYAH等<sup>[12]</sup>和ANTONY等<sup>[13]</sup>分别对新鲜煮制以及贮存一段时间后的鸡肉和火鸡肉进行测定,结果发现己醛的高含量导致鸡肉中高温蒸煮味的产生。AN等<sup>[14]</sup>对鱼糜凝胶进行风味测定,结果显示(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、庚醛、辛醛等醛类物质导致其产生高温蒸煮味。ZANG等<sup>[15]</sup>对预煮猪肉的风味进行测定,结果表明3-辛烯-2-醇、(*Z*)-2-辛烯醛和(*E,E*)-1,4-癸二烯醛对高温蒸煮味的贡献最大。在此之前,高温蒸煮味经常和冷藏肉一起出现,特指冷藏的熟肉制品,对其进行食用前加热处理时产生的异味,随着研究的不断深入,其囊括的范围越来越大,现在已经包括传统的冷藏熟肉、生肉、冻存的肉以及高温处理之后的肉制品等<sup>[16]</sup>。越来越多的研究显示,高温蒸煮味的产生是因为肉制品发生了脂质氧化,而且肉制品经过热处理之后更容易产生异味,这是因为热处理加速了其氧化进程,使产品失去了原来的肉香味<sup>[16]</sup>。【本研究切入点】目前研究人员对高温蒸煮味的研究大多集中在冷藏肉制品上,对于热处理后肉类高温蒸



煮味的形成及控制研究还较为缺乏,而关于南京盐水鸭高温蒸煮味的主要成分物质也未见相关报道。

【拟解决的关键问题】通过不同温度的热处理,探究南京盐水鸭挥发性风味物质种类及含量的变化,确定南京盐水鸭高温蒸煮味的主要成分,为南京盐水鸭高温蒸煮味的形成及品质的提升提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

试验于 2022 年在南京农业大学食品科技学院肉品加工与质量控制教育部重点实验室进行。

### 1.1 材料与试剂

鸭腿购于江苏省宿迁市益客集团,食盐、花椒、香叶、八角、姜、葱均购于南京苏果超市,环己酮购于德国默克公司。

### 1.2 仪器与设备

AL-104 精密电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)设备有限公司;AUY120 型电子分析天平,日本岛津公司;DC-860S 真空包装机,美国 Promarksvac 公司;高压灭菌锅 HVE-50,日本 Hirayama 公司;PEN3 便携式电子鼻气味分析仪,德国 Airsense 公司;TRACE GC ULTRA 气相色谱-质谱仪,美国 Thermo Fisher 公司。

### 1.3 方法

1.3.1 样品的制备 选用 12 只 42 日龄的樱桃谷鸭鸭腿,屠宰分割后经 4 °C 冷链运输至实验室冷库,试验原料经清洗、沥干水分、修整后,使每只鸭腿重量保

持在 (200±10) g,对鸭腿进行先干腌后湿腌的工艺处理:干腌采用(鸭腿重)8%的食盐、0.1%的花椒和 0.1%香叶混合制得的炒盐,将其均匀涂抹至鸭腿表面,置于 4 °C 冷库腌制 3 h,干腌阶段结束后将鸭腿按照体积配料比 1:3(鸭腿:卤水)完全浸没于卤水中(湿腌阶段所用的卤水由 0.05%花椒、0.025%香叶、0.075%八角熬制而成的 26%(w/v)的过饱和食盐水),置于 4 °C 冷库湿腌 3 h,湿腌阶段结束后将其取出在 4 °C 凉胚 24 h,接着在 90 °C 煮制 35 min,冷却至室温,利用高温蒸煮袋将其真空包装。将 12 只真空包装的鸭腿随机分成 4 组,一组作为对照组不对其进行热处理,另外 3 组分别在 80 °C 50 min、100 °C 30 min 和 121 °C 15 min 条件下处理,热处理结束后迅速用冷水将其降至室温进行取样。

1.3.2 电子鼻测定 参考 CHEN 等<sup>[7]</sup>的方法并稍作改动,称取 2.0 g 碎鸭肉置于 20 mL 顶空瓶中,旋盖密封。上机前,将顶空瓶在 50 °C 条件下水浴平衡 50 min,随后将金属探针快速且平稳地插入密封的顶空瓶中,通过滤膜对挥发性气体成分和气体杂质进行交换过滤。

采用 PEN3 型电子鼻检测器对样品的宏观气味进行测定。PEN3 型电子鼻系统拥有 10 个气体传感器,具体作用和检测阈值如表 1 所示。设定测量时间(气体采集时间)为 120 s,传感器以及样品的流量均设置为 400 mL·min<sup>-1</sup>,归零和间隔准备时间均设置为 5 s,传感器清洗时间设置为 90 s。相同处理组样品测定结束后,及时更换滤膜和换气针头。

表 1 PEN3 型电子鼻传感器的性能描述

Table 1 Performance description of 10 sensors for PEN3 electronic nose

传感器名称 Sensor name	性能描述 Performance description	灵敏性 Sensitivity (mL·m <sup>-3</sup> )
W1C	对芳香族化合物敏感,苯 Sensitive to aromatic compounds, Benzene	10
W5S	对氮氧化物敏感 Sensitive to nitrogen oxides	1
W3C	对香气敏感,氨气 Sensitive to aroma, ammonia	10
W6S	对氢化物敏感 Sensitive to hydrides	100
W5C	对短链烷烃及芳香组分敏感 Sensitive to short-chain alkanes and aromatic components	1
W1S	对甲基敏感 Sensitive to methyl groups	100
W1W	对硫化物敏感 Sensitive to sulfides	1
W2S	对醇、醛、酮类化合物敏感 Sensitive to alcohols, aldehydes and ketones	100
W2W	对芳香成分及有机硫化物敏感 Sensitive to aromatic components and organic sulfides	1
W3S	对长链烷烃敏感 Sensitive to long-chain alkanes	100

**1.3.3 挥发性化合物的测定** GC-MS 分析使用配备有自动进样器 (TRIPLUS) 以及 DSQ-II 质谱检测器 (Thermo Scientific, Waltham, U.S.A.) 的全自动气相色谱-质谱仪 (TRACE GC ULTRA)。仪器参数的设定参考李聪等<sup>[18]</sup>和 ZHOU 等<sup>[19]</sup>的方法,对热解析时间、离子源温度及升温程序稍作修改。

**1.3.4 样品前处理** 精确称取 3.0 g 肉样于 20 mL 的顶空瓶,向瓶内加入 5  $\mu\text{L}$  浓度为 1  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  的环己酮溶液作内标,旋盖密封。

**1.3.5 HS-SPME 条件** 将顶空瓶置于 60  $^{\circ}\text{C}$  水浴条件下处理 30 min,将固相微萃取 (solid-phase microextraction, SPME) 的进样针头 (50  $\mu\text{m}/30 \mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS 纤维) 插进顶空瓶,对样品的挥发性化合物进行吸附,30 min 后将纤维头插入仪器的进样口,对其吸附的化合物进行解析,利用气相色谱质谱联用仪对样品的挥发性化合物进行分离鉴定。

**1.3.6 GC-MS 条件** GC 条件:萃取头在 250  $^{\circ}\text{C}$  且模式为不分流条件下热解析 3 min。色谱柱采用的是 TR-5 MS 毛细管柱 (30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25  $\mu\text{m}$ ; Thermo Scientific, Waltham, U.S.A.), 氦气作为载气, 1  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的流速, 250  $^{\circ}\text{C}$  的进样口温度。升温程序如下:柱温首先在 40  $^{\circ}\text{C}$  下预热 3 min,随后采取 3  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  将其持续升温到 70  $^{\circ}\text{C}$ ,然后在 5  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的条件下升温到 180  $^{\circ}\text{C}$ ,最后采取 10  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  将其升温至 280  $^{\circ}\text{C}$ ,最终在此温度下维持 5 min。

MS 条件: 220  $^{\circ}\text{C}$  的离子源温度, 250  $^{\circ}\text{C}$  的接口温度; 电离方式为电子电离 (EI); 电子能量设定在 70 eV; 灯丝电流设置为 150  $\mu\text{A}$ ; 扫描质量范围设定在 30—550 m/z。将测得的挥发性化合物与质谱数据库 MAINLIB 和 NISTDEMO 进行匹配,筛选出匹配度大于 800 的化合物进行定性。挥发性物质的含量根据内标环己酮进行相对定量。

**1.3.7 关键风味化合物评定** 通过气味活度值法 (odor activity value, OAV) 来评定样品的关键风味物质, OAV 的结果用来描述挥发性风味物质对样品风味的贡献大小,其利用挥发性风味物质的浓度和自身气味阈值 (水相) 的比值来表示,如果某一物质测得的  $\text{OAV} > 1$ ,那么就表示这种物质对样品的香气有贡献<sup>[20]</sup>,而且当其 OAV 值越大时,它对整体风味的影响就越大<sup>[21]</sup>。

**1.3.8 感官评定** 感官评定小组由 10 名 (5 名男性和 5 名女性) 受过 WOF 培训的人士组成,此前均品尝过盐水鸭产品。参考徐渊等<sup>[22]</sup>的方法,稍作修改。感官评定人员采用 7 点喜好评分制对 4 组鸭肉样品的

风味 (咸味、异味、鲜味、酸败味)、口感 (咀嚼性、粗糙程度)、组织状态 (肉质紧实程度) 进行评分 (7 以下说明风味不佳、口感差、组织状态差; 7—8 表示风味适宜、口感一般、组织状态较好; 8 以上表明风味极佳、口感佳、组织状态好)。要求评价人员在开始评价前 0.5 h 内禁食,将纯净水和苏打饼干作为不同样品之间的口腔清洁剂,减少各样品之间的交叉影响。

## 1.4 数据处理

本研究所有的试验均重复 3 次,数据使用平均值  $\pm$  标准差表示,利用 SAS (V8) 统计分析软件对试验数据进行处理,采用单因素方差分析,其中,多重比较方法采用的是 Duncan's multiple range test,并对电子鼻数据进行主成分分析,  $P < 0.05$  表示统计学显著差异,采用 Origin 2022b 软件绘图。

## 2 结果

### 2.1 热处理过程中气味的变化

电子鼻能够迅速且敏锐地对样品中的挥发性气味信息进行全面评估<sup>[23]</sup>。从图 1-A 可以看出, W1C、W3C 和 W5C 三个传感器的响应值在对照组 (CK) 中较高,特别是 W3C 和 W5C,表明 CK 组的样品中含有较多的芳香气味、芳香族化合物和短链烷烃等物质。电子鼻 10 个传感器的响应值在 CK 组和 100  $^{\circ}\text{C}$  处理组之间没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。传感器 W1S、W2W、W3S 和 W6S 响应值在 121  $^{\circ}\text{C}$  处理组最高, W2S 和 W5S 的响应值较低,表明 121  $^{\circ}\text{C}$  处理组含有较多的有机硫化物、芳香成分和氢化物,同时含有较少的氮氧化合物。从图 1-B 可以看出,两个主成分 PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 79.8% 和 14.1%,其方差贡献率之和为 93.9%,表明该主成分可以体现绝大部分样品的总体特征。从图中可以看出,不同热处理的盐水鸭样品在得分图中差异显著,所有的热处理组都分布在 PC1 的正轴,只有 CK 组独自分布在 PC1 的负轴,表明这几组样品之间的气味相差较大。此外, 121  $^{\circ}\text{C}$  处理组样品远离 80  $^{\circ}\text{C}$ 、100  $^{\circ}\text{C}$  和 CK 组的样品聚集,而且和 PC1 轴上的 W1S、W2W、W3S 和 W6S 传感器密切相关,说明与其他 3 组相比, 121  $^{\circ}\text{C}$  处理组具有更高丰度的氢化物、有机硫化物和芳香化合物等。

### 2.2 热处理过程中挥发性物质含量的变化

由表 2 可知,对照组 (CK) 和处理组 (80  $^{\circ}\text{C}$ 、100  $^{\circ}\text{C}$ 、121  $^{\circ}\text{C}$ ) 一共鉴定出 78 种挥发性风味物质,包括 31 种烃类、18 种醛类、10 种含氮含硫及苯系物、



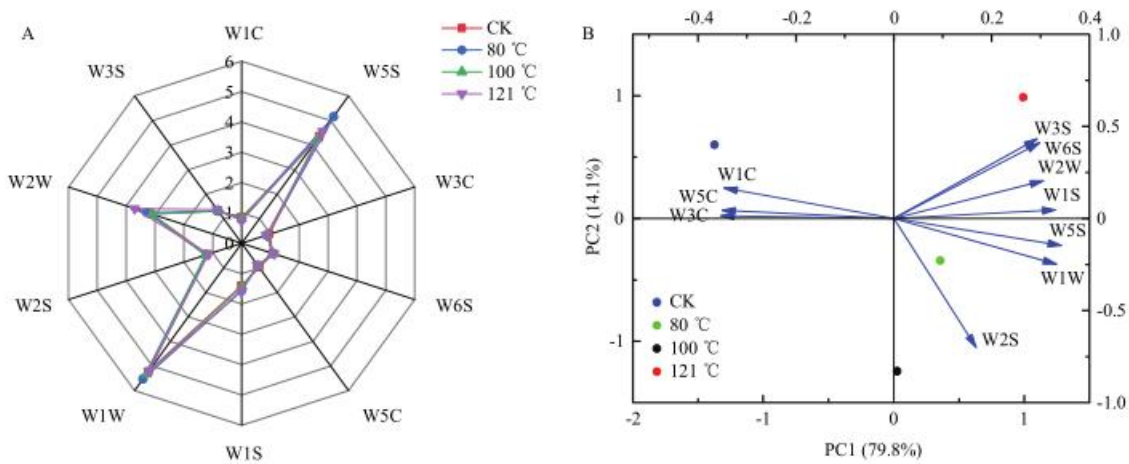


图 1 不同热处理温度下南京盐水鸭电子鼻雷达图 (A) 及 PCA 图 (B)

Fig. 1 Nanjing water-boiled salted duck electronic nose radar diagram (A) and PCA diagram (B) at different heat treatment temperatures

11 种醇类、4 种酮类、2 种酯类、1 种呋喃类以及其他物质 1 种, 其中 36 种物质在 4 个组别中均有出现。这 4 个组别中的挥发性化合物种类分别为 58、50、53 以及 49 种。通过 4 个组别的对比, 发现 CK 组中检测到的风味物质种类最多, 而且 CK 组中的风味物质总含量也最高。

4 组样品中烃类物质的含量都较高, 31 种烃类物质中有 13 种饱和烃, 其余均为不饱和烃。烃类物质在 3 个热处理组之间的总含量存在明显差异, 其中 OAV > 1 (表 3) 的烃类物质主要为茴香脑、 $\alpha$ -蒎烯、柠檬烯和  $\beta$ -石竹烯, 且在 CK 组中的含量最高, 因此这几种物质对盐水鸭整体风味的形成非常重要。

盐水鸭热处理过程中检测到的醛类物质包括苯甲醛、十四醛、己醛、辛醛、十六醛、壬醛、庚醛、3-甲基丁醛、十八醛、戊醛、(E)-2-辛烯醛、十二醛、肉豆蔻醛、(Z)-2-壬烯醛、癸醛、(Z)-4-癸烯醛、十七醛、十三醛。其中己醛的含量最高, 占据主导地位, 其主要来源于  $\omega$ -6 不饱和脂肪酸的氧化, 在低浓度时, 己醛具有青草香气, 但当其浓度较高时, 说明不饱和脂肪酸的氧化程度增加, 从而产生不良气味<sup>[27]</sup>。戊醛、庚醛、辛醛和壬醛分别被描述为杏仁味、腐臭味、柠檬味和脂肪味<sup>[28]</sup>。包括 3-甲基丁醛在内的支链醛含量在热处理后显著降低, 其中 3-甲基丁醛表现出一种坚果风味。而苯甲醛是盐水鸭样品中检测到的唯一的芳香醛, 其会产生一种杏仁和坚果风味。不饱和醛如(Z)-2-壬烯醛等大多数具有令人愉悦的香气而且气味阈值

低。其中 OAV > 1 的醛类物质主要有己醛、3-甲基丁醛、辛醛、(E)-2-辛烯醛、庚醛、癸醛、壬醛、戊醛和 (Z)-2-壬烯醛, 说明醛类物质对盐水鸭的风味起重要作用。但 (Z)-2-壬烯醛只在对照组及 100 °C 处理组中检测到, (E)-2-辛烯醛仅在 100 °C 处理组中检测到, 说明它们并不是导致盐水鸭高温蒸煮味的主要物质; 3-甲基丁醛在 CK 组中含量最高 ( $P < 0.05$ ), 说明其对盐水鸭整体风味的形成起重要作用; 其中癸醛在 CK 组及处理组间并没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 说明其对盐水鸭风味的形成影响较小; 剩下的己醛、壬醛、辛醛、庚醛和戊醛均在 121 °C 处理组含量最高 ( $P < 0.05$ ), 因此它们对盐水鸭高温蒸煮味的形成具有重要作用。

醇类通常也被认为是鸭肉中的重要风味化合物<sup>[29]</sup>, 盐水鸭热处理过程中检测到的醇类物质分别是 1-辛烯-3-醇、1-十六烷醇、4-萜烯醇、2-辛烯-1-醇、桉叶油醇、戊醇、芳樟醇、(-)-4-萜品醇、 $\alpha$ -松油醇、(R)- $\alpha$ , $\alpha$ -4-三甲基-3-环己烯-1-甲醇以及 6-甲基-1-庚醇。其中 1-辛烯-3-醇是盐水鸭风味形成中的重要醇类, 其含量随着热处理温度的升高存在一个明显的上升趋势, 且在 121 °C 处理组中含量最高。芳樟醇、桉叶油醇以及  $\alpha$ -松油醇是香料中常见的风味物质, 对于肉类菜肴的风味贡献较大<sup>[30]</sup>。醇类中 1-辛烯-3-醇、芳樟醇、2-辛烯-1-醇和桉叶油醇这 4 种物质的 OAV > 1, 因此它们对盐水鸭风味的形成起重要作用。其中特别需要注意的是, 由于 1-辛烯-3-醇的阈值较低, 而经常被认为是产生异味的因素之一<sup>[31]</sup>。

表 2 不同热处理温度下南京盐水鸭挥发性风味物质含量的变化

Table 2 Changes of volatile flavor substances in Nanjing water-boiled salted duck at different heat treatment temperatures

化合物名称 Compound	SI	鉴定依据 Identification basis	气味描述 Odor description	含量 Content ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			
				CK	80 °C	100 °C	121 °C
<b>烃类 Hydrocarbons</b>							
(3E)-3-丙-2-烯亚基环丁烯 (3E)-3-prop-2-enylidenecyclobutene	828	MS	NC	520.10±15.11a	84.69±3.03b	60.38±2.71b	—
右旋萜二烯 Cyclohexene,1-methyl-4-(1-methyl-ethenyl)-, (4R)-	1071	MS、RI	橙子香气 Orange aroma	669.16±20.31a	—	—	—
3,7-二甲基-1-辛烯 3,7-dimethyl-1-Octene	862	MS、RI	NC	308.56±11.33a	—	—	—
茴香脑 cis-Anethol	906	MS、RI	甜、清凉、茴香气味 Sweet, cool, fennel smell	229.56±10.76b	56.43±5.34a	92.81±9.31a	—
十二烷 Dodecane	1200	MS、RI	NC	374.03±12.43b	198.99±8.35a	131.35±6.33a	134.05±5.12a
2,6,10-三甲基十四烷 2,6,10-Trimethyltetradecane	1456	MS、RI	NC	73.09±6.15a	54.57±4.33a	55.81±4.11a	67.92±5.32a
2,6,11-三甲基十二烷 2,6,11-Trimethyldodecane	1241	MS、RI	NC	141.89±9.31a	174.29±8.82a	120.05±10.05a	125.86±9.33a
十四烷 Tetradecane	1400	MS、RI	NC	97.76±9.11a	66.11±6.21a	50.83±3.33a	72.35±5.33a
2-氯辛烷 2-Chlorooctane	902	MS、RI	NC	—	106.63±6.30a	—	—
十五烷 Pentadecane	1504	MS、RI	NC	153.31±10.33a	114.88±9.45a	100.72±8.33a	123.04±10.33a
[1S-(1R*,4E,9S*)]-4,11,11-三甲基-8-亚甲基双环[7.2.0]十一碳-4-烯 [1S-(1R*,4E,9S*)]-4,11,11-Trimethyl-8-methylenebicyclo [7.2.0]undec-4-ene	971	MS	NC	9.98±1.21a	—	—	—
异松油烯 Terpinolene	1074	MS、RI	松木, 柑橘味 Matsuki, citrus flavor	64.58±4.30a	—	—	—
2,4,6-三甲基癸烷 2,4,6-Trimethyldecane	1087	MS、RI	NC	164.65±10.33a	—	70.55±8.20b	—
柠檬烯 Limonene	1033	MS、RI	柠檬、薄荷味 Lemon, mint flavor	65.91±7.01b	76.01±8.10b	54.37±6.33b	37.44±4.02a
1,5,5-三甲基-6-亚甲基环己烯 6-methylene-1,5,5-Trimethylcyclohexene	911	MS、RI	NC	52.98±4.37b	51.20±6.12a	—	12.55±0.12b
$\beta$ -石竹烯 $\beta$ -Caryophyllene	1468	MS、RI	辛香、木头味 Spicy, woody flavor	85.07±10.33a	—	—	—
$\alpha$ -蒎烯 $\alpha$ -Pinene	1375	MS、RI	松木, 针叶香 Pine, coniferous aroma	121.60±11.12a	—	—	—
十六烷 Hexadecane	1618	MS、RI	NC	—	161.39±12.33b	—	89.67±7.33a
2,3,5,8-四甲基癸烷 2,3,5,8-Tetramethyldecane	1080	MS、RI	NC	35.21±1.02a	—	—	—
十一烷 Undecane	1101	MS、RI	NC	63.67±4.33a	56.69±3.72a	52.18±5.11a	64.21±9.02a
癸烷 Decane	996	MS、RI	NC	42.75±8.33a	38.33±5.56a	28.89±2.33a	28.01±1.89a
2,6-二甲基十一烷 2,6-Dimethylundecane	1152	MS、RI	NC	123.50±11.03a	89.69±8.02a	75.16±8.41a	95.15±7.73a
$\gamma$ -蒎烯 $\gamma$ -Terpinene	1018	MS、RI	木头, 金属味 Wood, metallic smell	32.37±2.36a	33.63±1.03a	44.11±5.45a	43.60±3.33a



续表 2 Continued table 2

化合物名称 Compound	SI	鉴定依据 Identification basis	气味描述 Odor description	含量 Content ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			
				CK	80 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$	121 $^{\circ}\text{C}$
11-戊烷-3-基己烷 11-Pentane-3-Methylhexane	804	MS	NC	—	121.68±13.72a	—	—
1,2-环氧十四烷 1,2-Epoxytetradecane	1421	MS、RI	NC	—	16.81±2.01a	—	15.00±1.89a
3-二十碳烯 3-Eicosane	1986	MS、RI	NC	—	123.48±17.03a	—	—
辛基环丙烷 Octylcyclopropane	805	MS、RI	NC	—	—	7.41±0.33a	—
2,4-二甲基十二烷 2,4-Dimethyldodecane	1226	MS、RI	NC	—	—	9.48±1.64a	—
3-二十二烯 3-Docosanol	2281	MS、RI	NC	—	—	21.33±3.41a	28.30±6.02a
环庚三烯 Cycloheptatriene	813	MS、RI	NC	—	—	—	94.34±10.05a
10-二十一碳烯 10-Henicosene	2046	MS、RI	NC	—	—	—	13.66±1.82a
<b>醛类 Aldehydes</b>							
戊醛 Valeraldehyde	692	MS、RI	杏仁, 麦芽, 辛辣味 Almond, malt, spicy flavor	280.53±19.33a	285.13±13.02a	256.59±17.56a	996.64±17.01b
癸醛 Decanal	1202	MS、RI	肥皂, 橙皮, 牛脂味 Soap, orange peel, tallow flavor	45.49±4.13a	45.01±3.01a	47.20±3.33a	48.89±4.11a
(Z)-2-壬烯醛 (Z)-2-Nonenal	1146	MS、RI	鸚尾, 脂肪, 黄瓜味 Iris, fatty, cucumber flavor	20.35±2.03a	—	27.09±2.67a	—
壬醛 Nonanal	1101	MS、RI	脂肪, 柑橘味 Fatty, citrus flavor	914.53±21.01c	1329.39±32.37b	1316.03±17.33b	1584.60±34.02a
辛醛 Octanal	1003	MS、RI	脂肪, 肥皂, 柠檬味 Fatty, soap, lemon flavor	1022.08±43.73c	1369.69±34.56b	1347.81±29.11b	1689.87±39.72a
庚醛 Heptanal	908	MS、RI	脂肪, 柑橘, 腐臭味 Fatty, citrus, rancid smell	424.10±27.15a	320.82±18.62b	347.96±20.13ab	486.59±30.56a
苯甲醛 Benzaldehyde	961	MS、RI	杏仁, 烧糖味 Almonds, burnt sugar flavor	91.38±10.33a	73.23±9.67a	65.33±7.56a	80.31±9.02a
己醛 Hexanal	801	MS、RI	低浓度: 脂肪、青草味; 高浓度: 酸败、辛辣味 Low concentration: fat, grassy flavor; high concentration: rancidity, spicy taste	3286.68±312.65b	3788.73±275.13a	3824.27±266.42a	3960.89±302.33a
3-甲基丁醛 Isovaleraldehyde	638	MS、RI	可可、杏仁、麦芽味 Cocoa, almond, malt flavor	351.26±37.42a	—	—	22.70±3.12b
十八醛 Octadecanal	2052	MS、RI	油脂味 Grease smell	7.76±1.21b	15.24±2.73a	20.44±3.32a	20.52±2.67a
十六醛 Hexadecanal	1834	MS、RI	蒜味 Garlic smell	16.83±3.23c	31.57±4.02b	62.38±6.45a	81.02±6.12a
(Z)-4-癸烯醛 (Z)-4-Decenal	667	MS、RI	青味 Green taste	—	21.97±2.33b	56.94±6.67a	—
肉豆蔻醛 Myristicin aldehyde	1198	MS、RI	脂肪、蜡味 Fatty, waxy taste	—	37.94±5.21a	—	—

续表 2 Continued table 2

化合物名称 Compound	SI	鉴定依据 Identification basis	气味描述 Odor description	含量 Content ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			
				CK	80 °C	100 °C	121 °C
十二醛 Dodecanal	1423	MS、RI	脂肪、松油味 Fatty, pine oil flavor	13.05±1.01a	15.92±1.67a	13.26±0.92a	16.56±1.93a
十七醛 Heptadecanal	1906	MS、RI	NC	—	—	5.42±0.21a	5.35±0.73a
十三醛 Tridecanal	1503	MS、RI	花, 甜味 Flower, sweet	—	—	4.66±0.91a	—
十四醛 Tetradecanal	1611	MS、RI	NC	—	—	22.24±3.72a	51.18±6.11a
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	1056	MS、RI	绿色, 坚果, 脂肪味 Green, nutty, fatty flavor	—	—	7.69±2.12a	—
<b>醇类 Alcohols</b>							
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	956	MS、RI	蘑菇味 Mushroom flavor	1367.97±121.42b	1582.81±145.29b	1469.03±133.65b	1747.05±113.67a
芳樟醇 Linalool	1100	MS、RI	花, 薰衣草味 Flower, lavender flavor	206.62±22.67a	116.50±17.33b	135.77±13.51b	106.80±11.01b
2-辛烯-1-醇 2-Octen-1-ol	1104	MS、RI	肥皂, 塑料味 Soap, plastic smell	62.19±7.93b	88.07±9.20b	213.03±28.77a	73.28±9.33b
桉叶油醇 Cineole	1031	MS、RI	樟脑样香气, 清凉味 Camphor-like aroma, cool taste	348.84±52.21a	131.01±17.83b	158.49±15.01b	186.30±19.62b
4-萜烯醇 Terpinene-4-ol	907	MS	松节油, 肉豆蔻 Turpentine, nutmeg	233.49±28.33a	142.54±16.67b	163.39±21.56b	188.70±19.38b
1-十六烷醇 1-Hexadecanol	1889	MS、RI	花, 蜡味 Flower, waxy smell	87.03±9.73a	46.30±5.20b	35.49±3.45b	30.84±4.21b
$\alpha$ -松油醇 Alpha-Terpineol	1189	MS、RI	松油, 茴香, 薄荷味 Pine oil, fennel, mint flavor	131.08±16.31b	—	57.36±11.14a	46.45±8.42a
戊醇 1-Pentanol	760	MS、RI	香醋味 Vinegar flavor	90.04±8.67b	109.13±13.62b	123.92±19.33b	179.04±21.77a
(-)-4-萜品醇 (-)-Terpinen-4-ol	904	MS、RI	NC	366.92±66.67a	—	—	—
(R)- $\alpha,\alpha$ -4-三甲基-3-环己烯-1-甲醇 3-Cyclohexene-1-methanol, $\alpha,\alpha$ -4-trimethyl-, (R)-	857	MS	NC	74.61±11.01a	74.84±9.82a	—	82.24±7.34a
6-甲基-1-庚醇 6-Methylheptanol	962	MS、RI	化学、青味 Chemical, green	—	—	19.28±2.78a	—
<b>酮类 Ketones</b>							
2-庚酮 2-Heptanone	891	MS、RI	肥皂味 Soapy smell	24.51±3.12b	219.90±19.33a	247.34±23.56a	281.07±22.67a
2-甲基环戊酮 2-Methylcyclopentanone	921	MS	NC	197.66±18.03b	281.95±25.67a	319.20±33.45a	311.04±29.89a
2, 5-辛二酮 2,5-Heptanedione	984	MS、RI	NC	4041.89±245.35a	4392.15±168.62a	4181.72±160.67a	4410.86±217.45a
香叶基丙酮 Geranylacetone	2015	MS、RI	玫瑰, 花香 Roses, Flowers	83.22±11.02b	42.88±9.73a	42.48±6.33a	41.93±7.67a
<b>酯类 Esters</b>							
己酸乙酯 Vinyl hexanoate	998	MS、RI	甜的醚香味 Sweet ether scent	2489.36±344.78a	—	—	—
(3-羟基-2,2,4-三甲基戊基)2-甲基丙酸酯 Propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-, 2,2,4-Trimethylpentyl ester	815	MS	NC	205.30±21.33a	115.58±11.45b	173.90±17.67a	121.79±13.80b



续表 2 Continued table 2

化合物名称 Compound	SI	鉴定依据 Identification basis	气味描述 Odor description	含量 Content ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			
				CK	80 °C	100 °C	121 °C
<b>含氮含硫及苯系物 Benzene and sulfur series containing nitrogen</b>							
2,6-二叔丁基对甲酚 Butylated hydroxytoluene	1180	MS、RI	NC	23.69±4.02b	34.11±3.33a	40.67±6.74a	47.90±5.67a
对二甲苯 p-Xylene	845	MS、RI	塑胶味 Plastic smell	26.69±4.33c	67.20±8.67b	107.65±9.06a	159.93±11.45a
乙胺 Ethylamine	677	MS、RI	鱼味 Fish smell	345.75±39.71a	203.44±22.04b	187.29±23.33b	—
乙基苯 Ether	816	MS、RI	NC	25.68±3.31b	41.59±5.73a	49.51±6.01a	44.13±6.33a
间二甲苯 m-Xylene	869	MS、RI	塑胶味 Plastic smell	—	—	42.86±5.42a	95.43±7.67b
2,4-二叔丁基苯酚 2,4-Di-t-butylphenol	1073	MS、RI	NC	19.42±1.72b	31.47±2.84a	—	34.33±3.65a
甲苯 Toluene	773	MS、RI	油漆味 Smell of paint	—	42.27±6.78a	—	—
邻异丙基甲苯 o-Cymene	846	MS、RI	NC	149.94±17.67a	—	—	—
间异丙基甲苯 m-Cymene	872	MS、RI	NC	101.71±11.33a	—	—	—
2-(氮杂环丁-1-基)乙胺 1-Azetidineethanamine	817	MS、RI	NC	131.54±14.48a	—	—	—
<b>呋喃类 Furans</b>							
2-戊基呋喃 2-Pentylfuran	992	MS、RI	豆香、果香 Bean-aroma, fruity	1386.48±110.73d	1887.56±187.42c	2477.94±214.33b	2884.23±267.25a
<b>其他 Others</b>							
十二烷-1-磺酰氯 Dodecane-1-sulfonyl chloride	770	MS	NC	—	—	3.92±0.67a	—

气味的描述参考文献[24-25]以及数据库网站: <http://www.flavornet.org> 和 <http://www.odour.org.uk>; 不同小写字母表明处理组间差异显著 ( $P<0.05$ ); “—”表示未检出; NC表示还未确定。下同  
References [24-25] describing odors and database websites: <http://www.flavornet.org> and <http://www.odour.org.uk>; Different lowercase letters indicate significant difference between different treatment groups ( $P<0.05$ ); “—” indicate that it is not detected; NC indicate it has not yet been determined. The same as below

酯类物质只检测到两种, 其中(3-羟基-2,2,4-三甲基戊基)2-甲基丙酸酯的相对含量很低, 而已酸乙酯的相对含量在 CK 组中很高, 但酯类的气味阈值普遍较高, 因此对盐水鸭整体风味影响较小<sup>[32]</sup>。

酮类物质的总含量随着热处理温度的升高而不断增加, 其中 2-庚酮具有肥皂味, 香叶丙酮具有玫瑰、花香; 酮类中 2-庚酮和 2,5-辛二酮的 OAV>1, 二者对盐水鸭的风味起重要作用, 且 121 °C 处理组中 2,5-辛二酮含量较高, 可能是盐水鸭高温蒸煮味的主要成分之一。

经过 121 °C 高温热处理后, 鸭肉中的呋喃类物质含量明显升高 ( $P<0.05$ ), 且 OAV>1, 2-戊基呋喃是亚油酸氧化后的产物, 在低浓度下具有果香、清香以及一种蔬菜的香气<sup>[33]</sup>, 因此, 2-戊基呋喃可能是导致盐水鸭高温蒸煮味的重要气味物质之一。

### 2.3 盐水鸭热处理过程中 OAV>1 的挥发性风味物质的聚类

将检测到的 22 种 OAV>1 的挥发性风味物质进

行聚类分析, 能够更直观地比较同一种物质在不同处理组之间的差异情况<sup>[34]</sup>。从图 2 可以看出, 热图的横坐标为 4 个不同的处理组, 纵坐标为 22 种 OAV>1 的风味化合物相对含量, 其中红色和蓝色代表不同物质的含量, 蓝色越深说明这种化合物含量越低, 红色越深说明这种化合物含量越高。本研究不同处理组之间的挥发性风味物质各不相同, 存在明显的区分, 其中 CK 组的 3-甲基丁醛、茴香脑及芳樟醇等醇类物质较于其他热处理组含量较高, 因此这些物质对于盐水鸭整体风味的形成有重要贡献; 而 80 °C 以及 100 °C 处理组仅有柠檬烯、(Z)-2-壬烯醛、(E)-2-辛烯醛以及 2-辛烯-1 醇含量相对较高, 且它们在对照组中含量偏低, 说明这些物质并不利于盐水鸭整体风味的形成, 同时与高温蒸煮味的产生也无明显关联; 121 °C 处理组的醛类及酮类含量都较高, 主要有戊醛、2-庚酮、癸醛、十二醛、辛醛、己醛、庚醛、壬醛、2,5-辛二酮、1-辛烯-3-醇和 2-戊基呋喃, 这些挥发性风味物质对于盐水鸭高温蒸煮味的产生具有重要作用。

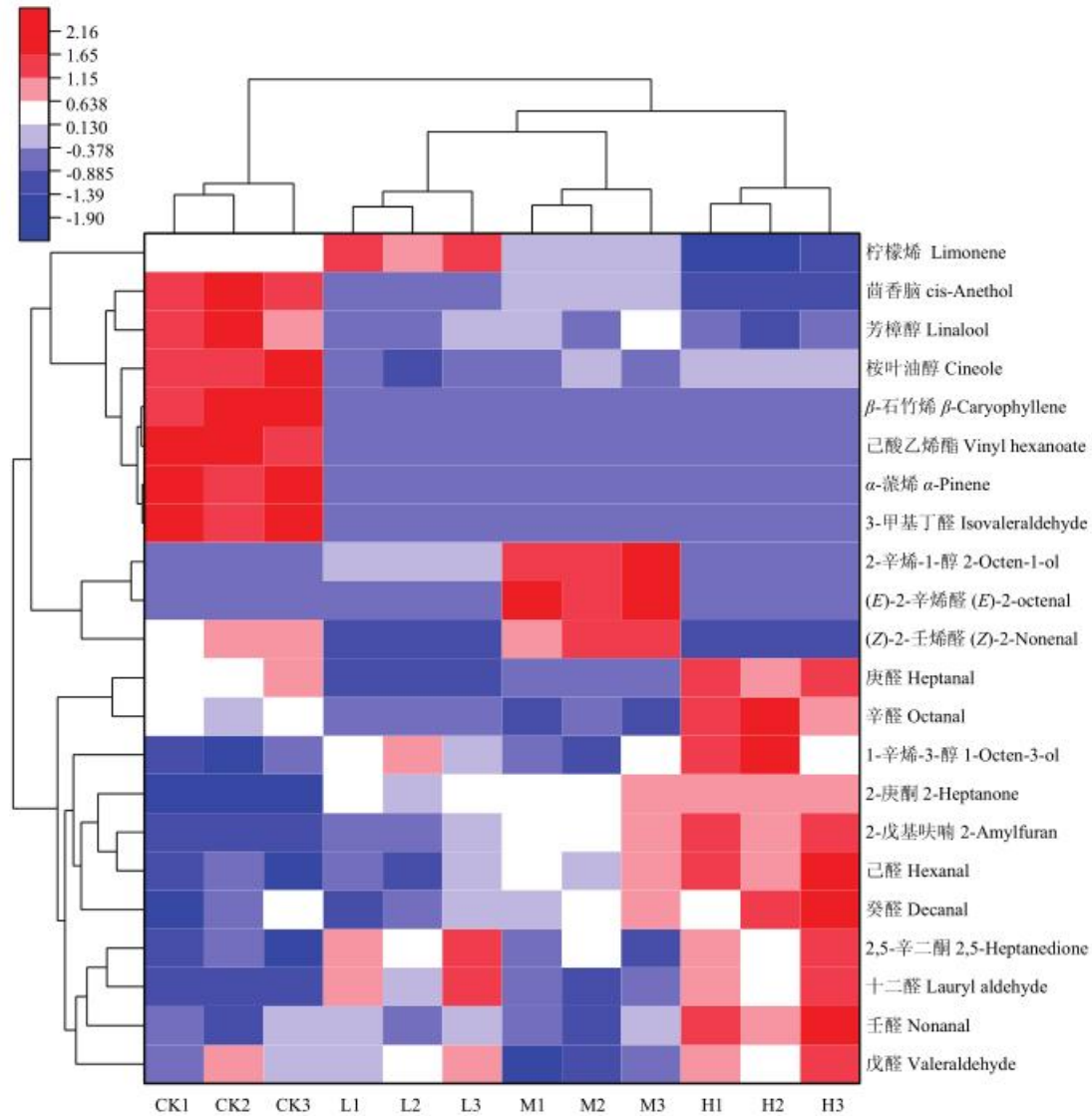
表 3 不同热处理温度下南京盐水鸭挥发性风味物质的 OAV

Table 3 OAV of volatile flavor substances of Nanjing water-boiled salted duck at different heat treatment temperatures

化合物名称 Compound	感觉阈值 Sensitivity ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	OAV			
		CK	80 ℃	100 ℃	121 ℃
<b>醛类 Aldehydes</b>					
戊醛 Valeraldehyde	12	23.38	23.76	21.38	83.05
癸醛 Decanal	0.1	454.90	450.10	472	488.90
(Z)-2-壬烯醛 (Z)-2-Nonenal	4.1	4.96	—	6.61	—
壬醛 Nonanal	1	914.53	1329.39	1316.03	1584.6
辛醛 Octanal	0.7	1460.11	1956.7	1925.44	2414.4
庚醛 Heptanal	3	141.37	106.94	115.99	162.20
苯甲醛 Benzaldehyde	350	0.26	0.21	0.19	0.23
己醛 Hexanal	4.5	730.37	841.94	849.84	880.2
3-甲基丁醛 Isovaleraldehyde	0.2	1756.3	—	—	113.5
十二醛 Dodecanal	2	6.53	7.96	6.63	8.28
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-octenal	3	—	—	2.56	—
<b>醇类 Alcohols</b>					
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	1	1367.97	1582.81	1469.03	1747.05
芳樟醇 Linalool	6	34.44	19.42	22.63	17.80
2-辛烯-1-醇 2-Octen-1-ol	40	1.55	2.20	5.33	1.83
桉叶油醇 Cineole	140.04	2.49	0.94	1.13	1.33
4-萜烯醇 Terpinene-4-ol	1240	0.19	0.11	0.13	0.15
$\alpha$ -松油醇 Alpha-Terpeneol	330	0.40	—	0.17	0.14
戊醇 Isoamyl alcohol	4000	0.02	0.03	0.03	0.04
<b>酮类 Ketones</b>					
2-庚酮 2-Heptanone	141	0.17	1.56	1.75	1.99
2,5-辛二酮 2,5-Heptanedione	2.52	1603.92	1742.92	1659.41	1750.34
香叶基丙酮 Geranylacetone	60	1.39	0.71	0.71	0.70
<b>酯类 Esters</b>					
己酸乙烯酯 Vinyl hexanoate	14	177.81	—	—	—
<b>呋喃类 Furans</b>					
2-戊基呋喃 2-Pentylfuran	6	231.08	314.59	412.99	480.705
<b>烃类 Hydrocarbons</b>					
茴香脑 cis-Anethol	0.14	925.43	403.07	662.93	—
十二烷 Dodecane	2040	0.09	0.10	0.06	0.07
异松油烯 Terpinolene	3260	0.02	—	—	—
柠檬烯 Limonene	10	6.59	7.60	5.44	3.74
$\beta$ -石竹烯 $\beta$ -Caryophyllene	64	1.33	—	—	—
$\alpha$ -蒎烯 $\alpha$ -pinene	6	20.27	—	—	—
<b>含氮含硫及苯系物 Benzene and sulfur series containing nitrogen</b>					
对二甲苯 p-Xylene	450.23	0.06	0.15	0.24	0.36
甲苯 Toluene	1550	—	0.03	—	—

风味阈值的参考文献[18][26]以及通过 Flavor-Base 10th Edition (Leffingwell & Associates, U.S.A.) 进行查找

References [18][26] to flavor thresholds and search through Flavor-Base 10th Edition (Leffingwell & Associates, U.S.A.)



CK1—3 代表对照组 3 个重复; L1—3 代表 80 °C 处理组 3 个重复; M1—3 代表 100 °C 处理组 3 个重复; H1—3 代表 121 °C 处理组 3 个重复  
 CK1-3 represent 3 replicates of the control group; L1-3 represent 3 replicates of the 80 °C treatment group; M1-3 represent 3 replicates of the 100 °C treatment group; H1-3 represent 3 replicates of the 121 °C treatment group

图 2 不同热处理温度下南京盐水鸭挥发性风味物质 OAV>1 的聚类分析热图

Fig. 2 Cluster analysis heat map of volatile flavor substance OAV>1 of Nanjing water-boiled salted duck at different heat treatment temperatures

#### 2.4 盐水鸭热处理过程中关键挥发性风味物质的偏最小二乘判别分析

对 22 种 OAV>1 的挥发性物质进行偏最小二乘判别分析。利用 VIP 值法筛选不同处理组间潜在标记的挥发性物质,用以区别不同的样品。若某一物质的 VIP>1,其就能作为潜在标记物用来对不同样品进行区分;而且该物质的识别能力随着 VIP 值的变大而增强。投影中变量重要性(VIP)的结果如图

3 所示, VIP 结果用 PLS-DA 载荷的加权平方和来表示,以说明变量 Y 在不同维度中的变化量<sup>[26]</sup>。通过 PLS-DA 分析得到 9 种 VIP>1 的物质,分别是桉叶油醇、2-辛烯-1-醇、1-辛烯-3-醇、壬醛、(E)-2-辛烯醛、戊醛、辛醛、(Z)-2-壬烯醛和 2-戊基呋喃,说明这 9 种挥发性风味物质的形成受热处理温度的影响较大,且它们在热处理过程中对于盐水鸭整体风味及异味的形成起关键性的作用。其中(Z)-2-壬烯醛只



在 CK 组及 100 ℃ 处理组出现,且(*E*)-2-辛烯醛只在 100 ℃ 处理组出现,说明这两种物质可以作为 100 ℃ 处理组的标记物;对于桉叶油醇和 2-辛烯-1-醇,其分别在对照组及 100 ℃ 处理组含量最高,因此其

可作为二者的标记物;其余 5 种物质都在 121 ℃ 高温热处理组中含量最高,说明这 5 种物质(辛醛、壬醛、戊醛、1-辛烯-3-醇和 2-戊基呋喃)可作为盐水鸭高温蒸煮味的标志物。

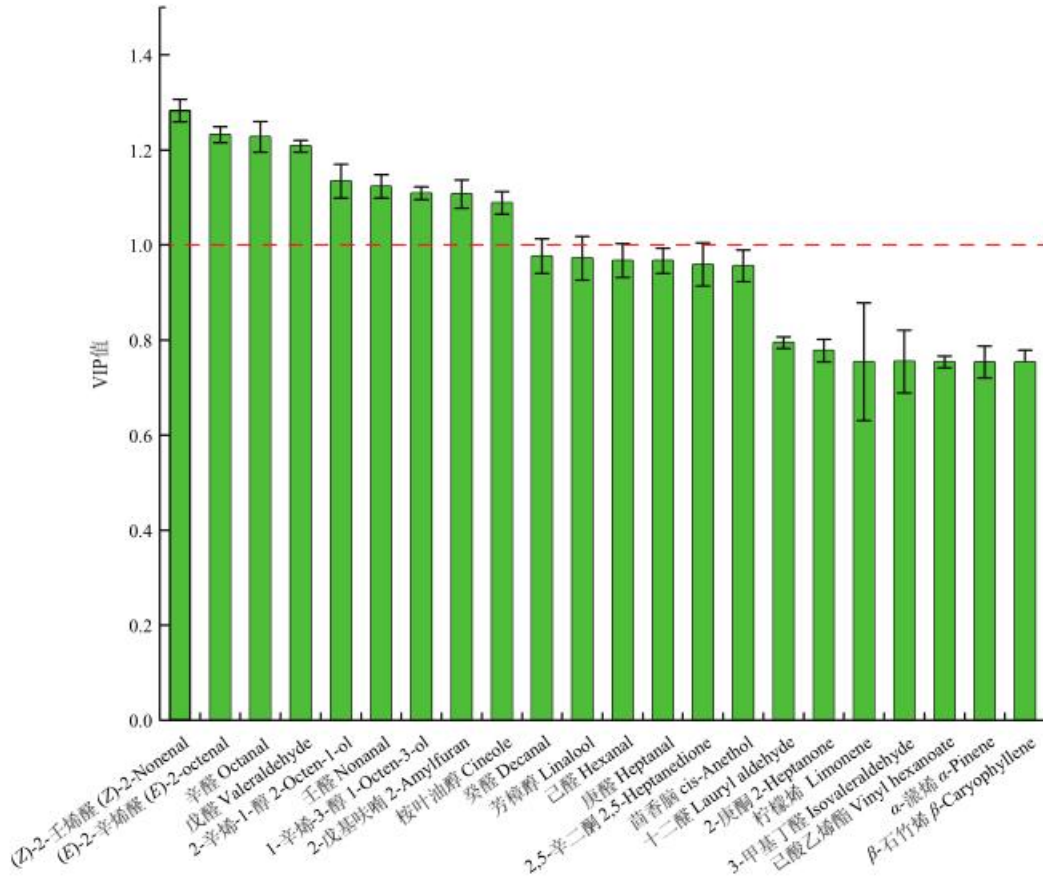


图 3 基于主要挥发性风味物质 (OAV>1) 的 VIP 值

Fig. 3 The variable importance in the projection (VIP) values based on key volatile compound data OAV>1

## 2.5 盐水鸭热处理过程中的感官分析

感官评价是评定肉制品品质的一个重要指标,其结果可以直观地反映肉制品整体的风味和品质<sup>[35]</sup>。本研究主要从风味、口感、组织状态 3 个方面对盐水鸭进行打分。结果如图 4 所示,热处理后的盐水鸭在鲜味、异味、酸败味、咀嚼性、肉质紧实程度方面均与对照组差异显著 ( $P<0.05$ )。风味方面,对照组的鲜味显著高于其他处理组 ( $P<0.05$ ),且无异味;随着热处理温度的不断升高,异味越来越重 ( $P<0.05$ ),尤其是 121 ℃ 处理组,感官评定人员都一致认为其高温蒸煮味较重,证明 121 ℃ 高温

热处理后的盐水鸭风味更差,异味明显。但各个组别之间咸味以及粗糙程度的差异不显著 ( $P>0.05$ ),说明热处理对盐水鸭咸味的影响较小,咸味是由含盐量及腌制时间所决定,这 4 个处理组的前处理方式均相同,因而对其咸味影响不显著。口感方面,咀嚼性与嫩度密切相关,对照组的咀嚼性最佳;鸭肉的组织状态方面,水分含量随热处理温度的升高而不断降低,对照组的肉质最紧实且富有弹性。综上,热处理会降低盐水鸭的品质,且随着热处理温度的增加,盐水鸭样品开始出现明显的高温蒸煮异味,使消费者难以接受。

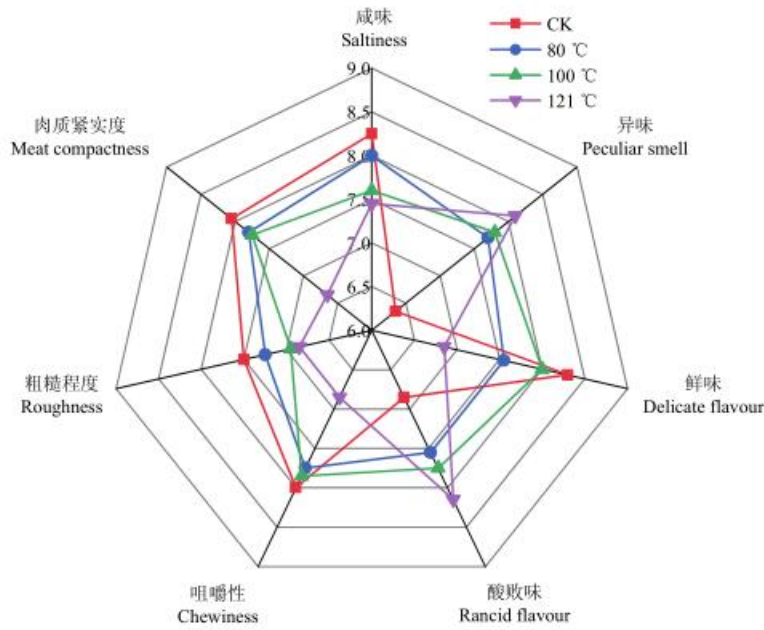


图 4 不同热处理温度下南京盐水鸭的感官评价

Fig. 4 Sensory evaluation of Nanjing water-boiled salted duck at different heat treatment temperatures

### 3 讨论

#### 3.1 盐水鸭高温蒸煮味的形成原因分析

本研究中对照组的盐水鸭整体风味较好, 氧化程度也比较低, 电子鼻结果表明盐水鸭样品的整体气味轮廓和 HS-SPME-GC-MS 检测到的具体气味化合物相一致。高温蒸煮味的产生与其他异味的产生并不相同, 如肉类制品经常容易发生的脂肪氧化是一个缓慢的过程, 然而高温蒸煮味会在熟肉制品再加热的短时间内产生, 因此熟肉制品中的高温蒸煮味会更加地迅速且明显, 且更具破坏性<sup>[36]</sup>。而 121 °C 高温热处理显著地促进了盐水鸭脂质的氧化降解, 导致产品风味较差, 出现较重异味。

#### 3.2 己醛与高温蒸煮味的相关性分析

在挥发性风味物质中, 己醛的含量最高, 但通过偏最小二乘判别分析的结果可知, 己醛的 VIP < 1, 说明己醛对南京盐水鸭高温蒸煮味形成的影响不显著, 因而其可能不是热处理过程中的关键挥发性风味物质, 有相关研究也表明, 己醛高浓度时所产生的气味与高温蒸煮的“纸板味”“油漆味”“金属味”并不匹配<sup>[37]</sup>。例如 AN 等<sup>[14]</sup>对鱼糜凝胶风味测定的结果说明 (*E,E*)-2,4-癸二烯醛、庚醛、辛醛等醛类物质导致其产生高温蒸煮味, 其中并未包含己醛;

且 ZANG 等<sup>[15]</sup>对预煮猪肉进行风味测定, 其结果显示 3-辛烯-2-醇、(*Z*)-2-辛烯醛和 (*E,E*)-4,1-癸二烯醛对其高温蒸煮味的贡献最大, 其中也未含有己醛。但是 STANGELO 等<sup>[11]</sup>、AJUYAH 等<sup>[12]</sup>以及 ANTONY 等<sup>[13]</sup>的研究都分别发现牛肉、鸡肉和火鸡肉的高温蒸煮味主要气味物质都含有己醛, 石泽雨等<sup>[38]</sup>关于四喜丸子软罐头的高温蒸煮味研究也显示其主要成分为己醛和庚醛。这可能是由于原料肉以及制作方式的不同所带来的差异。

#### 3.3 盐水鸭高温蒸煮味的主要成分分析

挥发性风味物质为盐水鸭带来的独特风味, 其中最重要的便是醛类及醇类化合物, 而烃类的阈值一般很高, 因此通常认为其对盐水鸭的风味影响较小, 但一些烃类作为中间体却能形成杂环化合物, 对于提升盐水鸭的整体风味起一定作用<sup>[39-42]</sup>。酯类一般具有清甜的水果类香气, 这是肉类在热处理过程中, 醇类物质和游离脂肪酸之间发生一系列的相互作用, 从而给肉制品带来果香类的气味<sup>[43-44]</sup>。酮类物质主要通过肉制品中脂肪及醇类氧化降解、美拉德反应等产生, 而且其气味阈值高, 一般认为该类物质对肉制品风味的贡献弱<sup>[45]</sup>。呋喃类物质主要通过硫胺素、氨基酸的热分解以及美拉德反应产生, 其含量很少, 但是此类物质的气味阈值普遍很低, 因此对食品的风味也有很大

影响<sup>[46-47]</sup>。通过对南京盐水鸭的挥发性风味物质进行 PLS-DA 分析<sup>[48]</sup>可知, 桉叶油醇、2-辛烯-1 醇、戊醛、(Z)-2-壬烯醛、(E)-2-辛烯醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、辛醛和 2-戊基呋喃这 9 种物质的 VIP>1, 说明这几种物质对南京盐水鸭高温蒸煮味的产生具有显著影响。根据本研究结果, (Z)-2-壬烯醛、(E)-2-辛烯醛可以作为 100 °C 处理组的潜在标记物, 辛醛、壬醛、戊醛、1-辛烯-3-醇以及 2-戊基呋喃可以作为南京盐水鸭高温蒸煮味的重要标志物。这与前人有关猪肉、牛肉、鸡肉等高温蒸煮味的重要成分具有一定的相似性, 说明高温蒸煮味的主要气味物质还是以醛类为主, 对于不同种类的肉类而言, 其具体的气味物质有所差异。

## 4 结 论

121 °C 高温热处理使南京盐水鸭产生较重的高温蒸煮味, 且辛醛、壬醛、戊醛、1-辛烯-3-醇以及 2-戊基呋喃这 5 种挥发性风味物质是导致南京盐水鸭产生高温蒸煮味的主要物质, 研究结果填补了南京盐水鸭高温蒸煮味相关领域的空白。今后可采用栅栏技术针对热处理过程加以优化 (例如: 添加抗氧化物质、接入竞争性菌群等措施), 也可以在保证杀菌强度的前提下, 降低杀菌温度和时间, 从而减少产品异味的产生。

## 参 考 文 献 References

- LIU Y, XU X L, ZHOU G H. Changes in taste compounds of duck during processing. *Food Chemistry*, 2007, 102(1): 22-26.
- 孙亚男. 扬州狮子头菜肴的中央厨房加工机理及品质调控研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
SUN Y N. Study on processing mechanism and quality control of Yangzhou lion head cuisine in central kitchen [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021. (in Chinese)
- 王卫, 张佳敏, 赵志平, 张锐, 白婷, 张崑. 川菜肉类菜肴工业化及其关键技术. *肉类研究*, 2020, 34(5): 98-103.  
WANG W, ZHANG J M, ZHAO Z P, ZHANG R, BAI T, ZHANG Y. Recent progress in industrialization of Sichuan-style meat dishes and related key technologies. *Meat Research*, 2020, 34(5): 98-103. (in Chinese)
- 蔡悦. 浅谈我国餐饮产业链中央厨房中预制菜的发展趋势. *食品安全导刊*, 2021(23): 187-188.  
CAI K. A discussion of prefabricated dishes' development trend in China's catering chain's central kitchen. *China Food Safety Magazine*, 2021(23): 187-188. (in Chinese)
- 罗霜霜, 康建平, 张星灿, 杨健, 刘建. 方便米饭品质改良研究进展. *粮油食品科技*, 2020, 28(3): 78-84.  
LUO S S, KANG J P, ZHANG X C, YANG J, LIU J. Research progress on quality improvement of instant rice. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2020, 28(3): 78-84. (in Chinese)
- MAJUMDAR R K, ROY D, SAHA A. Textural and sensory characteristics of retort-processed freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) in curry medium. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(11): 2487-2498.
- LIU F, WANG D Y, DU L H, ZHU Y Z, XU W M. Diversity of the predominant spoilage bacteria in water-boiled salted duck during storage. *Journal of Food Science*, 2010, 75(5): M317-M321.
- TIMS M J, WATTS B M. Protection of cooked meats with phosphates. *Food Technology*, 1958(12): 240-243.
- 张哲奇, 臧明伍, 张凯华, 李丹, 王守伟, 李笑曼. 熟制、高压灭菌和复热对粉蒸肉挥发性风味物质的影响. *食品科学*, 2019, 40(10): 187-192.  
ZHANG Z Q, ZANG M W, ZHANG K H, LI D, WANG S W, LI X M. Effect of cooking, autoclaving and reheating on the volatile components of steamed pork with rice flour. *Food Science*, 2019, 40(10): 187-192. (in Chinese)
- 袁先铃, 彭先杰, 陈崇艳, 万晓玉, 林洪斌. 高压蒸汽灭菌时间对冷吃兔风味物质的影响. *现代食品科技*, 2022, 38(3): 257-265.  
YUAN X L, PENG X J, CHEN C Y, WAN X Y, LIN H B. Effect of the time of high pressure steam sterilization on the changes of flavor substance in cold-eating rabbits. *Modern Food Science & Technology*, 2022, 38(3): 257-265. (in Chinese)
- ST ANGELO A J, VERCELLOTTI J R, LEGENDRE M G, VINNELLT C H, KUAN J W, JAMES C, DUPUY H P. Chemical and instrumental analyses of warmed-over flavor in beef. *Journal of Food Science*, 1987, 52(5): 1163-1168.
- AJUYAH A O, FENTON T W, HARDIN R T, SIM J S. Measuring lipid oxidation volatiles in meats. *Journal of Food Science*, 1993, 58(2): 270-273.
- ANTONY S, RIECK J R, DAWSON P L. Effect of dry honey on oxidation in Turkey breast meat. *Poultry Science*, 2000, 79(12): 1846-1850.
- AN Y Q, WEN L, LI W R, ZHANG X Z, HU Y, XIONG S B. Characterization of warmed-over flavor compounds in surimi gel made from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) by gas chromatography-ion



- mobility spectrometry, aroma extract dilution analysis, aroma recombination, and omission studies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(30): 9451-9462.
- [15] ZANG M W, WANG L, ZHANG Z Q, ZHANG K H, LI D, LI X M, WANG S W, CHEN H Z. Changes in flavor compound profiles of precooked pork after reheating (warmed-over flavor) using gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry with chromatographic feature extraction. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(3): 978-987.
- [16] 何苗, 陈洁, 曾茂茂, 何志勇, 秦防, 张志刚. 高温杀菌对福建风味鸭风味的影响. *食品与机械*, 2014, 30(3): 29-34.  
HE M, CHEN J, ZENG M M, HE Z Y, QIN F, ZHANG Z G. Effects of high temperature sterilization on volatiles in Fujian flavor duck. *Food & Machinery*, 2014, 30(3): 29-34. (in Chinese)
- [17] CHEN J H, TAO L N, ZHANG T, ZHANG J J, WU T T, LUAN D L, NI L, WANG X C, ZHONG J. Effect of four types of thermal processing methods on the aroma profiles of acidity regulator-treated tilapia muscles using E-nose, HS-SPME-GC-MS, and HS-GC-IMS. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 147: 111585.
- [18] 李聪, 徐宝才, 李世保, 郝敬芝. 市售盐水鸭挥发性风味物质研究分析. *现代食品科技*, 2016, 32(12): 350-358.  
LI C, XU B C, LI S B, HAO J Z. Analysis of volatile flavor compounds in commercially available salted duck. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(12): 350-358. (in Chinese)
- [19] ZHOU X X, CHONG Y Q, DING Y T, GU S Q, LIU L. Determination of the effects of different washing processes on aroma characteristics in silver carp mince by MMSE-GC-MS, e-nose and sensory evaluation. *Food Chemistry*, 2016, 207: 205-213.
- [20] CHEN X, LUO J, LOU A H, WANG Y, YANG D W, SHEN Q W. Duck breast muscle proteins, free fatty acids and volatile compounds as affected by curing methods. *Food Chemistry*, 2021, 338: 128138.
- [21] 何聪聪, 苏柯冉, 刘梦雅, 刘建彬, 刘野, 宋焕禄. 基于 AEDA 和 OAV 值确定西瓜汁香气活性化合物的比较. *现代食品科技*, 2014, 30(7): 279-285.  
HE C C, SU K R, LIU M Y, LIU J B, LIU Y, SONG H L. Identification of aroma-active compounds in watermelon juice by AEDA and OAV calculation. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(7): 279-285. (in Chinese)
- [22] 徐渊, 韩敏义, 陈艳萍, 李春保, 邓绍林, 李凌云, 刘源. 三个品种白切鸡食用品质评价. *食品工业科技*, 2021, 42(1): 89-95.  
XU Y, HAN M Y, CHEN Y P, LI C B, DENG S L, LI L Y, LIU Y. Comparative analysis of edible quality of three varieties of boiled chicken. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(1): 89-95. (in Chinese)
- [23] 裴正钰, 张香美, 卢涵, 李鑫, 张玉, 冯浩桐. 风味分析技术在发酵肉制品中的应用研究进展. *食品科技*, 2021, 46(2): 91-96.  
PEI Z Y, ZHANG X M, LU H, LI X, ZHANG Y, FENG H T. Application of flavor analysis technology in fermented meat products. *Food Science and Technology*, 2021, 46(2): 91-96. (in Chinese)
- [24] 刘登勇, 赵志南, 吴金城, 邹玉峰, 王道, 李明倩. 基于 SPME-GC-MS 分析熏制材料对熏鸡腿挥发性风味物质的影响. *食品科学*, 2019, 40(24): 220-227.  
LIU D Y, ZHAO Z N, WU J C, ZOU Y F, WANG X, LI M Q. Effects of different smoking materials on volatile flavor compounds in smoked chicken thighs. *Food Science*, 2019, 40(24): 220-227. (in Chinese)
- [25] 顾赛麒, 吴浩, 张晶晶, 王锡昌. 固相萃取整体捕集剂-气相色谱-质谱联用技术分析中华绒螯蟹性腺中挥发性成分. *现代食品科技*, 2013, 29(12): 3019-3025, 3058.  
GU S Q, WU H, ZHANG J J, WANG X C. Analysis of volatile components in gonad of *Eriocheir sinensis* by monolithic material sorptive extraction coupled with gas chromatography and mass spectrometry. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(12): 3019-3025, 3058. (in Chinese)
- [26] 彭子宁, 郑昌江. 酱卤肉制品品质与风味研究进展. *现代食品*, 2020(6): 30-33.  
PENG Z N, ZHENG C J. Research progress on the quality and flavor of sauce stewed meat products. *Modern Food*, 2020(6): 30-33. (in Chinese)
- [27] DUAN Z L, DONG S L, SUN Y X, DONG Y W, GAO Q F. Response of Atlantic salmon (*Salmo salar*) flavor to environmental salinity while culturing between freshwater and seawater. *Aquaculture*, 2021, 530: 735953.
- [28] CHMIEL M, ROSZKO M, HAĆ-SZYMAŃCZUK E, ADAMCZAK L, FLOROWSKI T, PIETRZAK D, CEGIEŁKA A, BRYŁA M. Time evolution of microbiological quality and content of volatile compounds in chicken fillets packed using various techniques and stored under different conditions. *Poultry Science*, 2020, 99(2): 1107-1116.
- [29] HE Y X, ZHOU M Y, XIA C L, XIA Q, HE J, CAO J X, PAN D D, SUN Y Y. Volatile flavor changes responding to heat stress-induced lipid oxidation in duck meat. *Animal Science Journal*, 2020, 91(1):

- e13461.
- [30] 孙圳, 韩东, 张春晖, 李海, 李侠, 刘志斌, 徐世明. 定量卤制鸡肉挥发性风味物质剖面分析. *中国农业科学*, 2016, 49(15): 3030-3045. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2016.15.017.
- SUN Z, HAN D, ZHANG C H, LI H, LI X, LIU Z B, XU S M. Profile analysis of the volatile flavor compounds of quantitative marinated chicken during processing. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(15): 3030-3045. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2016.15.017. (in Chinese)
- [31] IGLESIAS J, MEDINA I, BIANCHI F, CARERI M, MANGIA A, MUSCI M. Study of the volatile compounds useful for the characterisation of fresh and frozen-thawed cultured gilthead sea bream fish by solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry. *Food Chemistry*, 2009, 115(4): 1473-1478.
- [32] 朱文政, 严顺阳, 徐艳, 王秋玉, 张慢, 张慧敏, 周晓燕, 杨章平. 顶空固相微萃取-气质联用分析不同烹制时间红烧肉挥发性风味成分. *食品与发酵工业*, 2021, 47(2): 247-253.
- ZHU W Z, YAN S Y, XU Y, WANG Q Y, ZHANG M, ZHANG H M, ZHOU X Y, YANG Z P. Analysis of volatile flavor components of braised pork with different cooking time by SPME-GC-MS. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(2): 247-253. (in Chinese)
- [33] 孟凡冰, 刘达玉, 向茂德, 李云成, 王卫, 孙凤鸣, 谭馨怡. 不同卤制方法对白鹅腿肉质及挥发性风味成分的影响. *食品工业科技*, 2018, 39(5): 272-279.
- MENG F B, LIU D Y, XIANG M D, LI Y C, WANG W, SUN F M, TAN X Y. Effects of different bitter process on volatile flavor compounds of white goose thigh. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(5): 272-279. (in Chinese)
- [34] 强宇, 姜薇, 刘成江, 黄峰, 韩东, 张春晖. 风冷与冷藏过程中酱卤牛肉风味逸散行为研究. *中国农业科学*, 2022, 55(16): 3224-3241. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2022.16.013.
- QIANG Y, JIANG W, LIU C J, HUANG F, HAN D, ZHANG C H. Flavor escape behavior of stewed beef with soy sauce during air-cooling and refrigeration. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(16): 3224-3241. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2022.16.013. (in Chinese)
- [35] ZHANG L, HU Y Y, WANG Y, KONG B H, CHEN Q. Evaluation of the flavour properties of cooked chicken drumsticks as affected by sugar smoking times using an electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME/GC-MS. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 140: 110764.
- [36] WALLER G R, FEATHER M S. *Maillard Reaction in Foods and Nutrition*. Washington, D.C.: American Chemical Society, 1983.
- [37] ZANG M W, WANG L, ZHANG Z Q, ZHANG K H, LI D, LI X M, WANG S W, CHEN H Z. Changes in flavour compound profiles of precooked pork after reheating (warmed-over flavour) using gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry with chromatographic feature extraction. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(3): 978-987.
- [38] 石泽雨, 孙志刚, 曹传爱, 孔保华, 夏秀芳, 陈倩, 刘睿. 关键工艺点对四喜丸子软罐头高温蒸煮异味形成的影响. *食品工业科技*, 2023, 44(12): 62-72.
- SHI Z Y, SUN Z G, CAO C A, KONG B H, XIA X F, CHEN Q, LIU Q. Effects of key process points on the formation of volatile components in soft canned braised pork balls in gravy. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(12): 62-72. (in Chinese)
- [39] FU L, DU L H, SUN Y Y, FAN X K, ZHOU C Y, HE J, PAN D D. Effect of lentinan on lipid oxidation and quality change in goose meatballs during cold storage. *Foods*, 2022, 11(7): 1055.
- [40] 常思焱, 惠腾, 刘毅, 邱保文, 戴瑞彤. 杀菌和复热工艺对黄焖鸡挥发性风味物质的影响. *肉类研究*, 2018, 32(4): 20-26.
- CHANG S A, HUI T, LIU Y, QIU B W, DAI R T. Effect of pasteurization and reheating on the volatile compounds of braised chicken product. *Meat Research*, 2018, 32(4): 20-26. (in Chinese)
- [41] YIN X Y, WEN R X, SUN F D, WANG Y, KONG B H, CHEN Q. Collaborative analysis on differences in volatile compounds of Harbin red sausages smoked with different types of woodchips based on gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111144.
- [42] 徐为民, 徐幸莲, 周光宏, 匡一峰, 王道营, 吴海虹. 风鹅加工过程中挥发性风味成分的变化. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2309-2315. doi: 10.3321/j.issn.0578-1752.2007.10.026.
- XU W M, XU X L, ZHOU G H, KUANG Y F, WANG D Y, WU H H. Changes of volatile flavor compounds in dry-cured goose during processing. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10): 2309-2315. doi: 10.3321/j.issn.0578-1752.2007.10.026. (in Chinese)
- [43] 张哲奇, 臧明伍, 张凯华, 李丹, 王守伟, 李笑曼, 薛丹丹. 关键工艺对粉蒸肉挥发性特征风味形成的影响. *食品科学*, 2019, 40(4): 222-228.
- ZHANG Z Q, ZANG M W, ZHANG K H, LI D, WANG S W, LI X M, XUE D D. Effect of key processing steps on formation of volatile flavor components in steamed pork with rice. *Food Science*, 2019,

- 40(4): 222-228. (in Chinese)
- [44] BI J C, LI Y, YANG Z, LIN Z Y, CHEN F S, LIU S X, LI C F. Effect of different cooking times on the fat flavor compounds of pork belly. *Journal of Food Biochemistry*, 2022, 46(8): e14184.
- [45] 陈君玉, 孙渊, 饶雷, 赵靛, 王永涛, 李全宏, 吴晓蒙, 廖小军. 基于不同杀菌方式的红烧肉内脂质和挥发性成分的差异分析. *食品工业科技*, 2022, 43(14): 345-353.
- CHEN J Y, SUN Y, RAO L, ZHAO L, WANG Y T, LI Q H, WU X M, LIAO X J. Comparison of lipids and volatile flavor components in Chinese braised pork in brown sauce with different sterilization methods. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(14): 345-353. (in Chinese)
- [46] XU Y J, ZHANG D Q, CHEN R X, YANG X Y, LIU H, WANG Z Y, HUI T. Comprehensive evaluation of flavor in charcoal and electric-roasted *Tamarix* lamb by HS-SPME/GC-MS combined with electronic tongue and electronic nose. *Foods*, 2021, 10(11): 2676.
- [47] 于跃, 袁玉梅, 彭先杰, 郑连强, 冯治平, 肖夏, 袁先铃. 高温肉制品风味物质的形成机理及其影响因素. *保鲜与加工*, 2020, 20(3): 210-216.
- YU Y, YUAN Y M, PENG X J, ZHENG L Q, FENG Z P, XIAO X, YUAN X L. Formation mechanism and influencing factors of flavor substances in high-temperature meat products. *Storage and Process*, 2020, 20(3): 210-216. (in Chinese)
- [48] 谭凤玲, 詹萍, 王鹏, 田洪磊. 基于感官评价及 GC-MS 结合 OPLS-DA 分析热杀菌对蟠桃汁呈香品质的影响. *中国农业科学*, 2022, 55(12): 2425-2435. doi: <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2022.12.013>.
- TAN F L, ZHAN P, WANG P, TIAN H L. Effects of thermal sterilization on aroma quality of flat peach juice based on sensory evaluation and GC-MS combined with OPLS-DA. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(12): 2425-2435. doi: <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2022.12.013>. (in Chinese)

(责任编辑 赵伶俐)