

刘明宇, 蒋家乐, 朱清澄, 等. 不同杀菌方式油浸秋刀鱼软罐头贮藏期脂肪酸和挥发性物质的变化 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 359–369. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010026

LIU Mingyu, JIANG Jiale, ZHU Qingcheng, et al. Effects of Sterilization Methods on the Changes in Fatty Acid and Volatile Compounds of Oil-impregnated Soft Canned Saury during Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 359–369. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010026

· 贮运保鲜 ·

不同杀菌方式油浸秋刀鱼软罐头贮藏期 脂肪酸和挥发性物质的变化

刘明宇¹, 蒋家乐¹, 朱清澄^{2,3}, 王晓栋^{2,3}, 陶宁萍^{1,4,5,*}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

2. 国家海洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

4. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;

5. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要: 本文采用超高压杀菌 (UHPSO)、传统杀菌 (RSO) 和微波辅助杀菌 (MTSO) 三种灭菌技术处理橄榄油浸秋刀鱼软罐头, 研究了其在常温贮藏期 (1 月、3 月和 6 月) 脂肪酸组成的变化和挥发性风味物质变化规律和它们间的联系。结果表明: 秋刀鱼软罐头中橄榄油中的脂肪酸尤其是不饱和脂肪酸向鱼肉中发生了迁移, 改善了鱼肉的营品质, MTSO 组贮藏品质最佳, UHPSO 组品质最差。三个处理组油浸秋刀鱼软罐头的挥发性物质主要来源是醛类、醇类、烃类, 其中醛类化合物占比较高, 是主要的香味贡献物质 (如己醛、壬醛、十三醛等), 醛类化合物的变化与油酸和亚油酸含量呈较高相关性。橄榄油浸处理能够有效降低秋刀鱼肉中腥味物质的含量 (如 1-辛烯-3-醇、三甲胺等)。随贮藏时间的延长, UHPSO 组和 MTSO 组秋刀鱼软罐头挥发性物质种类和丰富度均呈现先增加后减少的趋势, RSO 组中醛类物质不断增加。综上, 油浸处理可以改善秋刀鱼肉营品质, 在贮藏过程中 MTSO 组的风味物质更丰富, 这为秋刀鱼食品的加工和处理提供了理论依据。

关键词: 油浸秋刀鱼, 软罐头, 杀菌方式, 脂肪酸, 挥发性物质

中图分类号: S986.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)20-0359-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010026



本文网刊:

Effects of Sterilization Methods on the Changes in Fatty Acid and Volatile Compounds of Oil-impregnated Soft Canned Saury during Storage

LIU Mingyu¹, JIANG Jiale¹, ZHU Qingcheng^{2,3}, WANG Xiaodong^{2,3}, TAO Ningping^{1,4,5,*}

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China;

3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic-Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China;

5. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering, Shanghai 201306, China)

Abstract: This study investigated the potential relationships between the composition changes of fatty acid and volatile flavor substances in soft canned saury in olive oil which treated with three various sterilization techniques including: Ultra-high pressure sterilization (UHPSO), traditional sterilization (RSO) and microwave-assisted sterilization (MTSO). These

收稿日期: 2023-01-05

基金项目: 浙江省“领雁”研发攻关计划项目 (2022C02025)。

作者简介: 刘明宇 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与品质评价, E-mail: 2307463593@qq.com。

* 通信作者: 陶宁萍 (1968-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与品质评价, E-mail: npta@shou.edu.cn。

results showed that fatty acids in olive oil infiltrated into the fish, especially the unsaturated fatty acids migrate into the meat, improved its nutritional quality. The MTSO group owned the best storage quality, while the UHPSO group performed the worst. Aldehydes, alcohols, and hydrocarbons were the main sources of volatile compounds in soft canned saury in oil in the three treatment groups, with aldehydes accounting for a large proportion and being the main contributors to the aroma (e.g. hexanal, nonanal, tridecanal, etc.). Changes in aldehyde compounds were strongly correlated with oleic acid and linoleic acid content. Olive oil treatment could effectively reduce the content of fishy odor compounds in saury (e.g. 1-octen-3-ol, trimethylamine, etc.). With increasing of storage time, the variety and richness of volatile compounds in soft canned saury in oil in UHPSO group and MTSO group displayed a trend of first rising and then decreasing, while aldehydes substances in RSO group kept increasing. In summary, oil immersion treatment could improve the nutritional quality of saury flesh, and the MTSO group had more flavor substance during storage, provide a theoretical basis for the processing and treatment of saury food products.

Key words: soak saury in oil; soft canned food; sterilization method; fatty acid; volatile substances

秋刀鱼(*Cololabis saira*)属颌针鱼亚目, 又称竹刀鱼, 是广泛分布于西北太平洋公海及其沿岸海域的中上层洄游性鱼类^[1], 不仅价格低廉、味道鲜美, 还含有大量的长链单不饱和脂肪酸和 ω -3 系脂肪酸, 如二十碳五烯酸(Eicosapentaenoic Acid, EPA)和二十二碳六烯酸(Docosahexaenoic Acid, DHA)^[2], 在预防心血管疾病方面具有很高的营养价值。但较高的不饱和脂肪酸含量使得秋刀鱼易腐败变质, 起初鲜度损失主要由酶和化学反应引起, 随着贮藏时间延长, 开始产生微生物腐败, 这也是其变质的主要因素^[3]。随着秋刀鱼加工产品的开发和生产, 延缓其腐败变质并延长其货架期是迫切需要解决的问题。罐藏是一种常见的延长食品保质期的贮藏方法, 它能在保证食品安全的前提下最大限度地保留营养成分。杀菌是罐头制品生产过程中的关键环节, 其目的是杀灭微生物以及降低酶活, 从而保持食品品质, 延长食品货架期^[4]。传统杀菌在 121 ℃ 的条件下能够杀灭包括耐热型芽孢杆菌在内的腐败微生物, 但高温会导致鱼肉组织呈纤维状而影响口感^[5]。而超高压杀菌能够减少高温对食物造成的影响, 其利用介质使食品在高于 100 MPa 的压力下使细胞损伤、酶失活和杀灭微生物的非热杀菌技术, 能有效减少热敏性功能营养成分损失^[6]。微波杀菌是近年来兴起的一种杀菌方式, 原理是对食品施加特定频率的电磁波产生热效应或非热效应以达到杀灭微生物的目的, 其有杀菌时间短、消耗能量低等优点^[7]。软罐头是罐藏食品的一种形式, 其具有易携带、成本低、设计更精美等特点, 将软罐头应用于秋刀鱼的包装中便于产品流通, 同时也能满足消费者对方便食品的需求^[8]。

此前, 已有大量研究报道了关于植物油的抗氧化能力^[9-11]。橄榄油是世界公认的最健康的脂肪来源之一, 富含油酸(C18:1)以及多种其他活性物质^[12-13], 如角鲨烯、生育酚和多酚化合物, 这使得橄榄油具有良好的抗氧化性和抗炎性^[14]。王永进^[15]发现橄榄油对高脂牛肉消化过程中脂质氧化有明显的抑制效果, 可以改善牛肉的营养价值。橄榄油中富含的不饱和脂肪酸具有良好的稳定性也使得其在高温环境下表现出卓越的抗氧化能力^[16]。目前我国食品

罐头工业安全问题被广泛关注^[17], 不同处理方式和灭菌方式会影响罐头中脂质和挥发性物质的变化, 其变化规律有待进一步研究。王朝阳等^[18]发现油浸鲑鱼罐头贮藏过程中呋喃类化合物、含氮类化合物为主要挥发性成分, 构成罐头脂香、肉香的呋喃类化合物的含量会随着时间的延长而降低, 从而导致罐头气味发生变化。近年来, 随着秋刀鱼加工食品的大量开发, 对其的处理和贮藏方式逐渐成为行业较为关切的问题, 但现有研究中缺乏对秋刀鱼杀菌处理方式的关注, 有待进一步更系统的研究。

本文探究了橄榄油浸结合不同杀菌方式在常温贮藏期间对秋刀鱼软罐头品质的影响。秋刀鱼软罐头经过杀菌后货架期延长, 不同的杀菌方式会对秋刀鱼中的脂肪酸组成和挥发性风味物质产生较大的改变, 所以研究不同杀菌方式结合油浸处理的秋刀鱼软罐头在贮藏期间的脂肪酸及挥发性风味物质组成变化规律, 可为秋刀鱼软罐头的生产加工提供一定的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷冻秋刀鱼 福建悠鲜食品有限公司(西北太平洋海捕), 真空包装冷冻运输至实验室, 体重(107.58±10.98)g, 体长(30.03±1.53)cm; 橄榄油 金龙鱼粮油食品股份有限公司; 石油醚、NaOH、硼酸、苯酚、三氯甲烷、甲醇、五水合硫酸铜、硫酸钾、盐酸、浓硫酸、三氯乙酸 分析纯, 上海柯灵试剂有限公司; 正己烷、正构烷烃(95%)、三氟化硼-甲醇 色谱纯, 国药集团化学试剂有限公司; 17 种混合氨基酸标品 美国 Sigma-Aldrich 公司; 37 种脂肪酸甲酯标准品、十九烷酸及十九烷酸甲酯标准品 上海安谱科技股份有限公司; 单磷酸腺苷(AMP)、肌苷酸(IMP)、2,4,6-三甲基吡啶(TMP) 标准品(纯度 ≥ 99%), 美国 Sigma 公司; 其他试剂 均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

DZ-260 真空包装机 青岛康普食品包装机械有限公司; L2-700/1 超高压设备 天津华泰森森超高压装备工程技术有限公司; HX-320 柜式高压灭菌

锅 德国塞斯泰克公司; 896 MHZ 微波辅助热杀菌系统 上海海洋大学; TRACE GC ULTRA 气相色谱仪 美国 Thermo Fisher 公司; 6890-5975B 气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 质谱公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品前处理 秋刀鱼解冻后去除鱼头尾和内脏, 用水洗净并分割为约 6 cm 的鱼段。鱼段按固液比为 1:2(g/mL) 的比例于 12% 的食盐水中浸渍 40 min。腌制后的鱼段置于蒸锅中蒸制 15 min。将加热到 180~200 °C 的橄榄油冷却至 80~90 °C 备用。样品为一块鱼段与橄榄油(10.00 g)置于经紫外杀菌的耐高温蒸煮真空袋(9×13 cm)进行真空密封。为了使其常温保质期达 1 年左右, 样品分别进行超高压杀菌(600 MPa, 10 min)、高压蒸汽杀菌(121 °C, 5 min)以及微波辅助热杀菌。通过上海海洋大学制造的微波辅助热杀菌系统(896 MHz)进行秋刀鱼软罐头的微波辅助热杀菌, 该设备主要结构如图 1^[19]。经过优化后的参数条件为: 样品以 1.5 cm/s 的速度在传送带上依次通过微波辐射箱(净功率 7 kW, 运行 160 s)、保温箱(温度 121 °C, 运行 240 s)和冷却箱(运行 120 s), 该条件下的产品可以达到食品工业中低酸食品的热灭菌要求($F_0 \geq 3$ min)。实验分组如下: 微波辅助热杀菌的橄榄油浸渍(MTSO)组, 超高压杀菌的橄榄油浸渍(UHPSO)组, 高压蒸汽杀菌的橄榄油浸渍(RSO)组。每隔 90 d 随机取三块鱼段, 拆除包装, 取肉搅碎后进行相关指标的测定, 脂肪酸含量测定采取未加橄榄油且未经过杀菌处理的样品作为对照组。

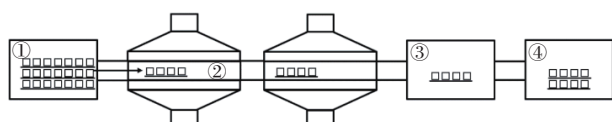


图 1 单模式工业微波杀菌系统

Fig.1 Single mode industrial microwave sterilization system
注: ①样品载入区; ②微波加热腔; ③保温区; ④冷却区。

1.2.2 脂肪酸的测定 样品中总脂的提取参考 Zhang 等^[20] 的方法, 取 20 mL 1.2.1 中搅碎的秋刀鱼样品与 400 mL 氯仿/甲醇(2:1, v/v)均匀混合后稳定 24 h (4 °C), 加入 10 mL NaCl 溶液(0.9%, w/w, 蒸馏水配制)摇匀后在 4 °C 下静置分层并除去上层有机试剂, 可重复 2~3 次。收集到的下层试剂使用旋转蒸发仪(40 °C)去除, 旋干后得到的物质即为总脂。取 0.08~0.10 g 上述脂肪于圆底烧瓶中, 沸水浴对脂肪酸进行甲酯化(采用三氟化硼-甲醇法), 经有机相膜(孔径为 0.22 μm)过滤后, 于气相色谱仪中进行分析。

低胆固醇血症和高胆固醇血症比例(h/H), 动脉粥样硬化指数(AI)和血栓形成指数(TI)通过以下公式计算^[21]:

$$h/H = \frac{\sum n-3 + \sum n-6 + C18:1}{C14:0 + C16:0}$$

$$AI = \frac{C12:0 + 4C14:0 + C16:0}{\sum n-3 + \sum n-6 + \sum MUFA}$$

$$TI = \frac{C14:0 + C16:0 + C18:0}{0.5 \sum MUFA + 3 \sum n-3 + 0.5 \sum n-6 + \sum n-3 / \sum n-6}$$

式中: $\sum n-3$ 表示油脂中 n-3 PUFA 之和, %; $\sum n-6$ 表示油脂中 n-6 PUFA 之和, %; $\sum MUFA$ 表示油脂中单不饱和脂肪酸之和, %; C18:1 表示油酸, %; C14:0 表示肉豆蔻酸, %; C16:0 表示棕榈酸, %; C12:0 表示月桂酸, %; C18:0 表示硬脂酸, %。

1.2.3 挥发性成分萃取 准确称量 2.5 g 秋刀鱼糜于 20 mL 顶空瓶中, 并加入 10 μL (1 mg/mL) 2,4,6-三甲基吡啶(TMP), 将 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头于顶空瓶中上方在 60 °C 水浴中萃取 45 min, 随后于进样器解吸 5 min。

1.2.4 GC-MS 分析 气相色谱条件: DB-5MS 色谱柱(60 m×0.32 mm×1 μm); 升温程序: 40 °C 保持 1 min; 5 °C/min 升至 100 °C; 3 °C/min 升至 180 °C, 5 °C/min 升至 220 °C; 7 °C/min 升至 240 °C, 保持 5 min。

质谱条件: 电子电离源; 解吸时间 5 min; 解吸温度 250 °C; 电子能量 70 eV; 灯丝发热电流 200 μA; 离子源温度 230 °C; 四极杆温度 150 °C; 传输线温度 280 °C; 检测器电压 1.2 kV; 质量扫描范围 m/z 30~350。

定性分析: 挥发性物质通过 NIST 17.0 和 Wiley-MS 质谱库确定, 仅报道正反匹配度大于 700 的物质。并通过正构烷烃计算各挥发性物质的保留指数(Retention Index, RI)。计算公式如下:

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

式中: $Rt(x)$ 表示被测组分保留时间, min; $Rt(n)$ 表示碳数为 n 的正构烷烃保留时间, min; $Rt(n+1)$ 表示碳数为 n+1 的正构烷烃保留时间, min; n 表示正构烷烃的碳原子数。

定量分析: 每种挥发性化合物的浓度可通过与 TMP 峰面积的比率来确定, 校准系数均假定为 1.00, 秋刀鱼肉中每种挥发性化合物的估计浓度计算如下, 每个样品重复 3 次。

$$C_x(\mu\text{g/g}) = \frac{(A_x/A_s) \times m_s}{m_0}$$

式中: C_x 表示各挥发性化合物的浓度, μg/g; A_x 表示各挥发性化合物的峰面积; A_s 表示 TMP 的峰面积; m_s 表示 TMP 的质量, μg; m_0 表示鱼肉的质量, g。

1.2.5 特征风味的确定与分析 关键风味成分的确定: 采用气味活度值法(Odor Activity Value, OAV), 通过各组分浓度(C_x)与其气味阈值(OT_x)之比计算得到, 公式如下, 当 $OAV \geq 1$ 时, 该物质为特征性风味化合物对样品总体风味起关键性作用; $0.1 \leq$

OAV<1 为重要风味成分,对样品总体风味具有重要的修饰作用^[22]。

$$OAV_x = \frac{C_x}{OT_x}$$

1.3 数据处理

以上所有实验均重复三次,实验结果均以平均值±标准偏差(mean±SD)表示。用 SPSS 19.0(SPSS Institute, Inc., USA)对数据进行 Duncan's 多重比较并分析差异性($P<0.05$ 表示差异显著,否则为差异不显著)。使用 Origin 2018(Origin Lab, USA)对图形进行制作。

2 结果与分析

2.1 脂肪酸组成的变化

不同杀菌方式处理的油浸秋刀鱼罐头在各贮藏阶段的脂肪酸组成如表 1 所示,结果表明,橄榄油中主要成分是油酸和棕榈酸,还有少量的硬脂酸、棕榈油酸、亚油酸、 α -亚麻酸等。前期研究结果表明^[23],秋刀鱼软罐头是一种优质的脂质来源,具有均衡的必需脂肪酸,EPA 和 DHA 含量丰富。比较不同杀菌处理组的饱和脂肪酸(SFA)组成发现,秋刀鱼软罐头中主要 SFA 为肉豆蔻酸(C14:0)、棕榈酸(C16:0)和硬脂酸(C18:0),在第 1、3、6 个月贮藏期内,肉豆蔻酸

的含量呈现先增加后降低的趋势,而棕榈酸和硬脂酸在整个贮藏期内均呈现增加的趋势,可能的原因是油浸过程中橄榄油中的棕榈酸和硬脂酸进入鱼肉,导致整个贮藏期间 SFA 呈现逐渐增加的趋势。与此同时,杀菌处理组在第 1 个月 MUFA 的含量相较对照组显著增加,n-6 PUFA 的含量没有显著差异,n-3 PUFA 的含量降低,PUFA 的含量从高到低为:UHPSO 组>MTSO 组>RSO 组。这与黄甜等^[24]研究结果一致,其中指出的 300 MPa 以上压力以及热处理会使磷脂和游离脂肪酸发生明显的降解作用。以上分析表明,橄榄油处理一定程度上能够改善秋刀鱼的营养价值,传统杀菌会导致油浸秋刀鱼软罐头脂肪酸氧化降解严重。

比较不同杀菌处理组的不饱和脂肪酸(UFA)组成发现,除油酸(C18:1)和亚油酸(C18:2n-6)呈现不断增加的趋势外,几乎所有 UFA 在整个贮藏期内含量均呈现降低的趋势,这再次说明了随贮藏时间的增加,橄榄油中的脂肪酸不断进入鱼肉内,使得秋刀鱼软罐头中油酸和亚油酸含量一直维持在较高的水平。如图 2,从 EPA 和 DHA 的变化来看,不同杀菌处理组在贮藏期间都呈现不断下降的趋势,在第 1 个月时,UHPO 组(17.34 mg/g)>MTSO 组(16.61 mg/g)>

表 1 贮藏期间秋刀鱼软罐头脂肪酸的变化(mg/g,湿重,means±SD,n=3)

Table 1 Changes of fatty acid content in soft canned saury during storage (mg/g, wet weight, means±SD, n=3)

脂肪酸	橄榄油	对照组	MTSO 组			UHPSO 组			RSO 组		
			1 月	3 月	6 月	1 月	3 月	6 月	1 月	3 月	6 月
C14:0	—	4.24±0.13	4.49±0.14 ^{bc}	4.64±0.11 ^{bc}	4.59±0.17 ^{bc}	4.37±0.13 ^c	5.82±0.94 ^a	3.97±0.03 ^c	4.52±0.05 ^b	5.21±0.08 ^{ab}	4.24±0.09 ^c
C16:0	9.15±0.33	8.38±0.25	8.82±0.03 ^c	9.08±0.68 ^{bc}	10.32±0.26 ^b	8.75±0.06 ^c	10.11±1.22 ^{bc}	11.88±0.12 ^a	9.19±0.12 ^{bc}	9.94±1.28 ^{bc}	10.51±0.10 ^b
C18:0	2.53±0.05	2.05±0.04	2.11±0.09 ^c	2.58±0.37 ^{abc}	2.73±0.18 ^a	2.11±0.05 ^c	2.49±0.21 ^{abc}	2.84±0.03 ^a	2.17±0.08 ^{bc}	2.57±0.21 ^{abc}	2.66±0.38 ^{ab}
C20:0	—	0.22±0.02	0.23±0.05 ^a	0.22±0.02 ^a	0.21±0.01 ^a	0.22±0.01 ^a	0.16±0.09 ^a	0.19±0.02 ^a	0.25±0.04 ^a	0.22±0.05 ^a	0.20±0.01 ^a
C22:0	—	0.56±0.76	0.58±0.01 ^a	0.40±0.00 ^{ab}	0.54±0.05 ^a	0.57±0.07 ^a	0.31±0.00 ^b	0.54±0.02 ^a	0.58±0.01 ^a	0.30±0.27 ^b	0.61±0.00 ^a
SFA	—	15.45±0.49	16.23±0.15 ^{de}	16.92±0.93 ^{bcd}	18.38±0.06 ^{abc}	16.04±0.06 ^c	18.88±2.04 ^{ab}	19.42±0.09 ^a	16.72±0.13 ^{bcd}	18.24±1.35 ^{abcd}	18.22±0.56 ^{abcd}
C16:1	0.65±0.02	1.57±0.04	1.50±0.06 ^{ab}	1.57±0.25 ^{ab}	0.92±0.12 ^c	1.53±0.03 ^{ab}	1.80±0.26 ^a	0.74±0.03 ^c	1.45±0.02 ^b	1.34±0.02 ^b	0.84±0.22 ^c
C18:1	56.29±0.75	6.93±0.05	7.12±0.08 ^f	8.45±0.60 ^e	11.11±0.62 ^c	7.11±0.40 ^f	8.32±0.53 ^c	13.36±0.42 ^a	7.28±0.02 ^f	9.77±0.59 ^d	12.20±0.50 ^b
C20:1	—	5.83±0.22	5.51±0.08 ^a	4.87±0.04 ^{bc}	3.46±0.53 ^{de}	5.67±0.15 ^a	4.75±0.14 ^c	3.04±0.16 ^c	5.37±0.21 ^{ab}	3.97±0.51 ^d	3.25±0.22 ^c
C22:1	—	6.22±0.44	7.26±0.12 ^b	7.12±0.46 ^{bc}	6.80±0.31 ^{bc}	7.28±0.38 ^b	7.48±0.12 ^b	6.08±0.69 ^c	9.56±0.29 ^a	7.10±0.29 ^{bc}	6.45±1.02 ^{bc}
C24:1	—	0.48±0.08	0.46±0.03 ^a	0.42±0.01 ^a	0.13±0.02 ^b	0.48±0.00 ^a	0.14±0.02 ^b	0.09±0.01 ^b	0.43±0.01 ^a	0.12±0.07 ^b	0.14±0.01 ^b
MUFA	—	21.03±0.21	21.85±0.03 ^b	22.43±0.05 ^b	22.42±0.31 ^b	22.07±0.91 ^b	22.48±0.28 ^b	23.32±0.97 ^{ab}	24.09±0.51 ^a	22.31±0.12 ^b	22.87±1.51 ^{ab}
C18:2n-6	4.58±0.09	1.16±0.14	1.12±0.04 ^c	1.46±0.01 ^b	1.78±0.02 ^{ab}	1.10±0.11 ^c	1.66±0.11 ^{ab}	1.94±0.22 ^a	1.11±0.01 ^c	1.69±0.22 ^{ab}	1.64±0.28 ^{ab}
C18:3n-6	—	0.17±0.02	0.17±0.01 ^a	0.11±0.02 ^{bc}	0.08±0.01 ^{cd}	0.16±0.00 ^a	0.14±0.01 ^{ab}	0.08±0.00 ^{bc}	0.15±0.00 ^{ab}	0.11±0.04 ^{bc}	0.08±0.01 ^d
C18:3n-3	0.47±0.02	0.46±0.02	0.45±0.01 ^{bc}	0.84±0.00 ^a	0.74±0.03 ^a	0.49±0.13 ^{bc}	0.83±0.14 ^a	0.40±0.02 ^c	0.41±0.01 ^c	0.82±0.20 ^a	0.66±0.13 ^{ab}
C20:2	—	1.90±0.09	1.80±0.08 ^{ab}	2.04±0.07 ^a	1.73±0.09 ^{ab}	1.97±0.04 ^{ab}	2.23±0.36 ^a	1.05±0.02 ^c	1.64±0.05 ^{ab}	1.91±0.67 ^{ab}	1.42±0.00 ^{bc}
C20:3n-3	0.20±0.01	0.25±0.00	0.25±0.01 ^{ab}	0.34±0.23 ^a	0.10±0.00 ^b	0.24±0.00 ^{ab}	0.24±0.01 ^{ab}	0.09±0.01 ^b	0.23±0.02 ^{ab}	0.17±0.01 ^{ab}	0.11±0.00 ^b
C22:2	—	0.48±0.01	0.39±0.01 ^{ab}	0.37±0.03 ^{abc}	0.27±0.01 ^{bcd}	0.48±0.04 ^a	0.33±0.14 ^{bcd}	0.23±0.02 ^d	0.39±0.01 ^{ab}	0.30±0.09 ^{bcd}	0.25±0.03 ^{cd}
C20:5n-3	—	4.30±0.03	4.14±0.06 ^a	4.08±0.25 ^a	3.56±0.02 ^{bc}	4.26±0.05 ^a	4.30±0.10 ^a	3.16±0.45 ^c	4.07±0.14 ^a	3.84±0.31 ^{ab}	3.36±0.14 ^c
C22:6n-3	—	13.34±0.12	12.47±0.24 ^{ab}	11.34±0.80 ^{bc}	8.25±0.70 ^{cf}	13.08±0.35 ^a	10.18±0.89 ^{cd}	6.81±0.42 ^e	11.37±0.29 ^{bc}	9.39±0.76 ^{de}	7.59±0.04 ^{fe}
PUFA	—	22.06±0.28	20.78±0.33 ^{ab}	20.58±0.77 ^{ab}	16.51±0.65 ^d	21.77±0.38 ^a	19.92±1.44 ^b	13.75±1.11 ^c	19.36±0.42 ^{bc}	18.23±0.09 ^c	15.09±0.48 ^{de}
EPA+DHA	—	17.64±0.14	16.61±0.29 ^{ab}	15.42±0.55 ^{bc}	11.81±0.68 ^c	17.34±0.40 ^a	14.48±0.99 ^{cd}	9.97±0.87 ^f	15.44±0.43 ^{bc}	13.23±1.07 ^d	10.94±0.10 ^{ef}
Σn-3 PUFA	—	18.35±0.14	17.31±0.27 ^{ab}	16.60±0.78 ^{bc}	12.65±0.71 ^c	18.08±0.27 ^a	15.56±0.84 ^{cd}	10.46±0.89 ^f	16.08±0.45 ^{bc}	14.22±0.86 ^d	11.71±0.23 ^c
Σn-6 PUFA	—	1.33±0.15	1.28±0.05 ^c	1.56±0.03 ^{bc}	1.86±0.02 ^{ab}	1.26±0.12 ^c	1.80±0.10 ^{ab}	2.01±0.22 ^a	1.25±0.01 ^c	1.80±0.18 ^{ab}	1.72±0.27 ^{ab}
Σn-6/Σn-3	—	0.07±0.01	0.07±0.00 ^{de}	0.09±0.00 ^d	0.15±0.01 ^b	0.07±0.01 ^c	0.12±0.00 ^{bc}	0.19±0.00 ^a	0.08±0.00 ^{de}	0.13±0.02 ^{bc}	0.15±0.02 ^b
h/H	—	2.11±0.02	1.93±0.01 ^{ab}	1.94±0.07 ^{ab}	1.72±0.00 ^c	2.01±0.03 ^a	1.63±0.20 ^c	1.63±0.05 ^c	1.79±0.01 ^{bc}	1.71±0.16 ^c	1.74±0.09 ^c
AI	—	0.62±0.01	0.66±0.01 ^{cd}	0.68±0.01 ^{bcd}	0.78±0.02 ^{ab}	0.63±0.01 ^d	0.84±0.11 ^a	0.78±0.00 ^{ab}	0.66±0.01 ^{cd}	0.80±0.06 ^a	0.76±0.05 ^{ab}
TI	—	0.18±0.00	0.20±0.00 ^d	0.23±0.00 ^d	0.31±0.01 ^{bc}	0.19±0.00 ^d	0.27±0.02 ^c	0.38±0.02 ^a	0.22±0.00 ^d	0.28±0.04 ^{bc}	0.32±0.01 ^b

注: MUFA 为单不饱和脂肪酸; PUFA 为多不饱和脂肪酸; 同行不同小写字母表示不同贮藏期的脂肪酸差异显著 ($P<0.05$)。

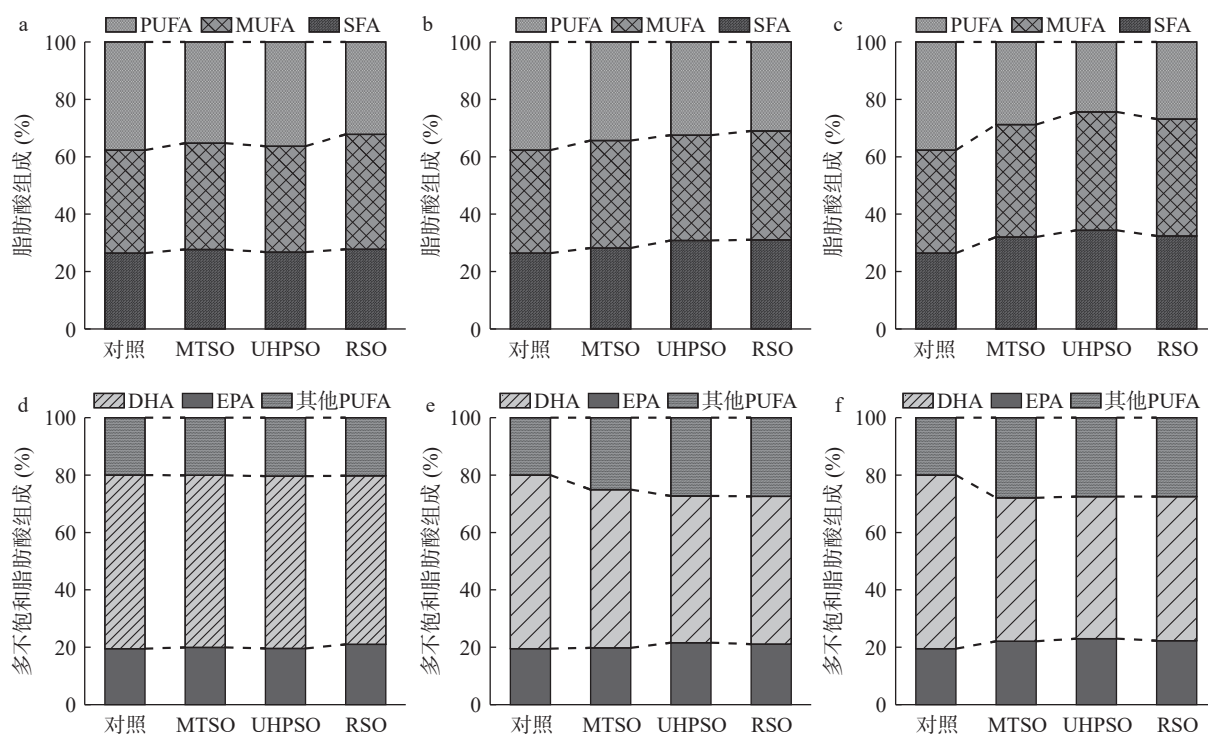


图 2 贮藏期间秋刀鱼软罐头的脂肪酸组成及多不饱和脂肪酸的变化

Fig.2 Changes of fatty acid composition and polyunsaturated fatty acids in soft canned saury during storage

注: a、d: 第 1 个月; b、e: 第 3 个月; c、f: 第 6 个月。

RSO 组 (15.44 mg/g), 在贮藏的第 6 个月时, MTSO 组 (11.81 mg/g) > RSO 组 (10.94 mg/g) > UHPSO 组 (9.97 mg/g)。灭菌时, 在较高温度的作用下, 鱼肉中抗氧化活性物质 (如谷胱甘肽或过氧化氢酶) 会急剧降低^[25], 另外高压会导致鱼肉中膜结构的变化致使某些抗氧化成分的破坏, 从而导致 UHPSO 组和 RSO 组的不饱和脂肪酸更容易发生氧化^[26]。综合来说, MTSO 组秋刀鱼软罐头具有最佳的贮藏品质^[27]。

值得注意的是秋刀鱼中 n-6/n-3 不饱和脂肪酸的比值在整个贮藏期间逐渐增加, 这是贮藏过程中 n-3 不饱和脂肪酸的含量随着贮藏氧化降低, 而鱼肉中亚油酸呈现上升趋势而导致的。这可能是在贮藏期间橄榄油中脂肪酸向鱼肉中发生了迁移, 而橄榄油中富含的亚油酸随之进入到鱼肉中。通过 h/H、AI 和 TI 指数对贮藏期间秋刀鱼软罐头膳食脂肪的营养价值进行进一步评价^[21]。当膳食脂肪指数 AI 和 TI 的比值 < 1 时具有更大的预防冠心病的潜力, 对人体健康有利^[28]。从表 1 可知, 所有处理组 AI 和 TI 指数均小于 1, 均为优质的膳食脂肪来源。当 h/H 的比值高于 2 时被认为是具有理想脂肪酸组成的产品^[29], 在整个贮藏期间, 不同杀菌处理组 h/H 的比值均在 2 左右, 表明杀菌后的秋刀鱼软罐头膳食脂肪营养良好, 在贮藏第 3 个月时, 仅 MTSO 组 h/H 的比值增加至 1.94, UHPSO 组和 RSO 组分别降低至 1.63 和 1.71, 说明 MTSO 组产品在贮藏第 3 个月时具有较理想的脂肪酸组成, 营养价值高。这是由于三个处理组的棕榈酸和肉豆蔻酸的含量和变化相近, 而 MTSO 组的鱼肉处理后组织纤维的断裂导致其组

织破裂^[30], 使得在贮藏过程中不饱和脂肪酸更容易进入到鱼肉组织当中。

2.2 挥发性成分的变化

大多数的秋刀鱼捕捞后会经过传统杀菌的方式加工成罐头产品^[31], 而这无法满足市场对货架期稳定性以及产品风味与日俱增的需求^[32]。上文脂肪酸分析表明, 橄榄油浸的方式能较好地改善鱼肉的品质, 而在贮藏期间不同杀菌方式可能会导致油浸秋刀鱼罐头挥发性物质存在差异, 本节将对 UHPSO 组、MTSO 组同 RSO 组不同时期的挥发性物质变化进行比较。

2.2.1 不同处理方式秋刀鱼软罐头挥发性成分的比较分析

采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用 (SPME-GC-MS) 法对 MTSO 组、UHPSO 组以及 RSO 组三种不同杀菌方式的油浸秋刀鱼软罐头在不同贮藏阶段 (第 1、3、6 个月) 的挥发性成分进行了测定分析 (表 2)。如表 3 所示, MTSO 组、UHPSO 组以及 RSO 组的油浸秋刀鱼软罐头在贮藏的第 1 个月分别检测出 37、18、31 种挥发性化合物, 在贮藏的第 3 个月分别检测出 40、24、32 种挥发性化合物, 在贮藏的第 6 个月分别检测出 39、23、35 种挥发性化合物。同时可以发现不同处理组秋刀鱼软罐头以及橄榄油中的醛类物质的种类丰富并且含量高, 对风味起到主要的贡献作用。其中 UHPSO 组中挥发性物质的数量整体小于其他两组, 主要差异来源于醛类数量, 这是由于醛类物质主要来源于脂肪酸的受热降解、氧化^[33], 而该组的处理过程中温度明显低于其他

表 2 贮藏期间秋刀鱼软罐头挥发性成分含量的变化($\mu\text{g/g}$, 湿重, means $\pm$ SD, n=3)Table 2 Changes of volatile components in soft canned saury during storage ($\mu\text{g/g}$, wet weight, means $\pm$ SD, n=3)

名称	保留指数	CAS 号	橄榄油	MTSO组			UHPSO组			RSO组		
				1月	3月	6月	1月	3月	6月	1月	3月	6月
醛类												
反-2-戊烯醛	754	1576-87-0	—	—	—	0.97±0.25 ^a	—	—	—	—	—	0.67±0.29 ^a
己醛	800	66-25-1	5.89±0.55	4.85±2.52 ^{ab}	4.57±1.16 ^{ab}	5.60±2.53 ^{ab}	2.54±1.44 ^{ab}	4.67±0.13 ^{ab}	6.85±5.74 ^a	0.92±0.15 ^b	4.03±1.93 ^{ab}	4.22±1.11 ^{ab}
反-2-己烯醛	854	6728-26-3	0.88±0.15	5.30±3.40 ^a	4.30±1.18 ^{ab}	1.72±0.56 ^b	—	—	—	2.73±0.49 ^{ab}	1.57±0.22 ^b	1.21±0.15 ^b
反-2-庚烯醛	958	18829-55-5	2.73±0.56	—	—	0.65±0.09 ^a	—	—	0.36±0.21 ^a	—	—	0.60±0.17 ^a
苯甲醛	962	100-52-7	—	1.90±0.83 ^{ab}	1.08±0.13 ^b	2.38±0.44 ^{ab}	—	—	—	2.40±0.38 ^{ab}	1.43±0.05 ^b	3.18±0.93 ^a
辛醛	1003	124-13-0	3.02±0.23	3.67±3.68 ^a	5.76±5.12 ^a	3.55±1.09 ^a	—	1.18±0.40 ^a	1.14±0.68 ^a	—	0.57±0.08 ^a	1.94±0.07 ^a
反-2,4-庚二烯醛	1012	4313-03-5	2.22±0.19	7.84±7.75 ^{ab}	4.46±3.22 ^{abc}	2.19±0.71 ^{bc}	—	—	—	9.02±0.95 ^a	3.07±0.40 ^{bc}	2.16±0.51 ^{bc}
反-2-辛烯醛	1060	2548-87-0	2.28±0.52	1.93±0.70 ^a	1.26±0.13 ^a	1.45±0.57 ^a	—	—	0.62±0.37 ^b	—	—	1.19±0.35 ^a
壬醛	1104	124-19-6	5.27±0.56	—	—	0.86±0.10 ^b	3.58±0.77 ^a	3.16±0.74 ^a	3.36±1.64 ^a	—	—	1.27±0.61 ^b
4-乙基-苯甲醛	1180	4748-78-1	—	2.76±0.77 ^a	1.12±0.04 ^{bc}	2.25±0.48 ^{ab}	2.45±0.13 ^{ab}	0.86±0.14 ^c	—	2.89±0.13 ^a	1.57±0.22 ^{bc}	2.19±0.31 ^{ab}
癸醛	1206	112-31-2	—	3.82±0.67 ^a	3.75±0.41 ^a	2.74±1.01 ^a	—	—	—	3.55±0.52 ^a	1.05±0.03 ^b	1.46±0.39 ^b
十一醛	1307	112-44-7	0.22±0.02	4.29±2.85 ^a	3.37±3.06 ^a	2.05±0.88 ^a	—	—	—	—	—	—
十三醛	1512	10486-19-8	3.11±0.37	—	0.79±0.22 ^{cd}	1.47±0.43 ^b	—	0.42±0.22 ^d	1.13±0.08 ^{bc}	—	0.59±0.08 ^{cd}	2.13±0.07 ^a
醇类												
1-戊烯-3-醇	684	616-25-1	—	55.36±16.65 ^a	34.41±9.02 ^{bc}	8.71±1.64 ^d	19.77±2.42 ^{cd}	18.67±8.14 ^d	21.39±5.98 ^{cd}	48.66±0.99 ^{ab}	13.26±2.06 ^d	7.32±1.07 ^d
2-戊烯-1-醇	767	1576-95-0	—	5.60±0.46 ^a	3.10±3.07 ^a	—	6.07±2.52 ^a	2.4±1.45 ^a	—	—	—	—
4-甲基环己醇	928	589-91-3	—	—	—	—	16.31±2.53 ^a	13.99±3.06 ^a	15.97±4.81 ^a	—	—	—
1-辛烯-3-醇	980	3391-86-4	—	12.98±2.80 ^a	2.55±0.22 ^d	2.19±0.89 ^d	5.23±0.92 ^c	3.09±0.30 ^d	1.42±0.49 ^c	7.01±1.00 ^b	3.67±0.11 ^d	2.34±0.34 ^d
2,4-癸二烯-1-醇	1264	14507-02-9	—	5.25±1.43 ^a	3.75±0.91 ^{ab}	2.26±0.71 ^b	—	—	—	3.17±0.64 ^{ab}	2.58±0.35 ^b	2.57±0.97 ^b
2-十一醇	1307	1653-30-1	—	13.36±0.22 ^a	10.68±7.89 ^b	1.74±0.74 ^b	—	—	—	7.32±1.17 ^{ab}	2.22±0.31 ^b	0.89±0.02 ^b
烃类												
1,4-戊二烯	464	591-93-5	—	7.63±3.95 ^a	6.18±4.46 ^a	2.78±1.19 ^b	—	—	—	—	—	—
正己烷	600	110-54-3	—	3.25±2.55 ^a	2.30±1.43 ^a	—	2.51±0.09 ^a	2.73±1.12 ^a	2.80±0.47 ^a	2.12±0.13 ^a	1.21±0.98 ^b	—
1,3-环己二烯	655	592-57-4	—	1.91±0.25 ^a	—	—	—	—	—	0.98±0.07 ^a	—	—
1,3-辛二烯	827	1002-33-1	—	8.40±0.20 ^a	2.70±2.32 ^{bc}	—	—	—	—	5.64±0.32 ^{ab}	0.76±0.45 ^c	—
苯乙烯	893	100-42-5	1.66±0.15	16.77±0.83 ^b	21.30±0.46 ^a	19.00±8.25 ^a	—	—	—	18.20±3.37 ^{ab}	18.99±2.61 ^{ab}	12.44±1.93 ^c
壬烷	900	111-84-2	8.67±0.56	—	3.53±1.87 ^d	5.56±2.37 ^c	11.66±1.78 ^b	22.38±18.75 ^a	12.59±2.12 ^b	—	6.05±1.21 ^c	2.89±0.08 ^d
2-亚基-环己烷	955	5749-72-4	—	—	—	—	—	—	—	3.81±0.71 ^a	1.72±1.23 ^b	1.43±0.06 ^b
3,5,5-三甲基-2-己烯	985	26456-76-8	—	3.10±0.84 ^{de}	1.54±0.42 ^c	3.31±0.86 ^{de}	9.76±1.29 ^{bc}	8.81±0.00 ^{bc}	16.88±5.98 ^a	12.26±2.27 ^b	6.32±1.74 ^{cd}	3.90±0.62 ^{de}
癸烷	1000	124-18-5	—	11.20±1.73 ^b	3.22±0.49 ^{cd}	1.88±0.18 ^d	11.80±1.52 ^b	13.09±0.84 ^b	20.49±5.85 ^a	7.99±0.53 ^{bc}	2.96±0.41 ^{cd}	2.29±0.34 ^d
十二烷	1200	112-40-3	0.60±0.04	1.66±0.42 ^{cd}	3.63±0.74 ^{abc}	0.64±0.18 ^d	4.71±0.49 ^{ab}	5.43±3.66 ^{ab}	5.95±1.71 ^a	3.87±0.72 ^{abc}	2.68±0.17 ^{bcd}	1.00±0.21 ^d
十三烷	1300	629-50-5	—	14.56±11.92 ^a	4.05±0.66 ^c	3.52±1.64 ^c	3.01±0.61 ^c	7.37±4.28 ^b	4.65±1.99 ^c	2.23±0.27 ^d	1.70±0.31 ^d	1.05±0.16 ^d
十五烷	1500	629-62-9	0.69±0.02	19.17±15.10 ^{ab}	8.34±4.02 ^c	4.40±0.97 ^c	11.29±1.68 ^{bc}	23.40±0.64 ^a	20.71±8.96 ^{ab}	7.52±1.86 ^c	5.39±0.77 ^c	1.05±0.17 ^d
酮类												
2,3-戊二酮	698	600-14-6	—	3.78±1.80 ^b	2.10±0.52 ^b	—	—	—	—	11.65±1.53 ^a	—	—
甲基庚烯酮	986	110-93-0	—	7.71±0.55 ^a	3.18±1.08 ^{bc}	—	2.14±0.37 ^{bc}	1.69±1.03 ^c	—	3.72±0.44 ^b	—	—
苯乙酮	1065	98-86-2	—	1.50±0.11 ^b	3.40±0.07 ^a	1.27±0.02 ^b	—	—	—	2.28±0.91 ^{ab}	—	—
3,5-辛二烯-2-酮	1073	30086-02-3	—	—	—	8.41±1.87 ^a	—	—	—	—	—	5.75±0.62 ^a
2-壬酮	1092	821-55-6	—	—	—	4.86±1.20 ^a	—	—	1.75±0.94 ^b	—	—	1.73±0.14 ^b
芳香族												
苯	654	71-43-2	1.83±0.44	18.58±6.08 ^b	36.39±7.05 ^a	14.42±6.15 ^{bcd}	3.02±0.79 ^c	16.05±10.62 ^{bc}	6.20±1.49 ^{cd}	6.46±0.54 ^{de}	11.63±4.08 ^{bcd}	4.58±0.12 ^{de}
乙苯	855	100-41-4	0.55±0.03	5.41±0.72 ^a	3.31±0.26 ^b	—	—	1.39±0.75 ^c	—	3.58±0.11 ^b	2.38±0.33 ^{bc}	2.27±0.31 ^{bc}
对二甲苯	865	106-42-3	2.03±0.09	3.80±0.31 ^c	4.79±0.67 ^{bc}	7.09±2.06 ^{bc}	—	8.27±3.53 ^b	5.35±1.42 ^{bc}	13.59±1.21 ^a	6.83±1.54 ^{bc}	12.67±0.34 ^a
萘	1182	91-20-3	0.21±0.03	19.71±6.93 ^a	8.85±7.59 ^b	7.72±0.67 ^b	—	—	—	10.87±0.66 ^{ab}	6.49±1.86 ^b	8.17±1.78 ^b
酯类												
丙位己内酯	1057	695-06-7	0.31±0.05	0.68±0.12 ^a	0.60±0.23 ^a	0.47±0.19 ^a	—	—	—	0.58±0.11 ^a	0.41±0.15 ^a	0.29±0.07 ^a
丙位辛内酯	1261	104-50-7	0.94±0.17	1.30±0.03 ^a	0.58±0.10 ^b	0.57±0.11 ^b	—	—	—	—	—	—
1-乙炔环己基氨基甲酸酯	1397	126-52-3	0.39±0.00	2.34±2.59 ^a	0.47±0.31 ^b	0.45±0.19 ^b	—	—	—	—	—	—
含氮、氧类												
三甲胺	502	75-50-3	—	59.26±4.57 ^a	30.32±8.16 ^b	1.28±0.86 ^c	58.04±9.90 ^a	38.26±5.46 ^b	7.55±0.89 ^c	27.42±0.96 ^b	2.18±0.48 ^c	—
3-甲基咪唑	614	930-27-8	—	4.04±1.99 ^a	2.21±0.97 ^a	2.52±0.36 ^a	—	—	—	3.59±0.05 ^a	2.26±0.81 ^a	2.52±1.28 ^a
2-乙基咪唑	703	3208-16-0	—	3.08±0.39 ^c	8.59±0.11 ^d	1.52±0.26 ^f	1.14±0.01 ^f	1.56±0.19 ^f	1.98±0.69 ^f	31.58±5.72 ^a	20.89±6.83 ^b	15.23±1.52 ^c
酸类												
棕榈酸	1968	57-10-3	5.27±1.11	—	0.47±0.27 ^b	2.08±0.27 ^a	—	0.95±0.00 ^b	2.09±0.52 ^a	—	0.69±0.21 ^b	2.13±0.62 ^a
油酸	2141	112-80-1	14.11±2.46	—	3.97±0.63 ^{bc}	11.11±4.29 ^a	—	2.09±0.50 ^c	7.97±0.44 ^{ab}	—	2.30±1.49 ^c	8.12±1.73 ^{ab}

注: —表示未检出。

表 3 贮藏期间秋刀鱼软罐头挥发性物质种类的比较
Table 3 Comparison of volatile substances in soft canned saury during storage

类别	橄榄油	MTSO组			UHPSO组			RSO组		
		1月	3月	6月	1月	3月	6月	1月	3月	6月
醛类	9	9	10	13	3	5	6	6	8	12
醇类	0	5	5	4	4	4	3	4	4	4
烃类	4	10	10	8	7	7	7	10	10	8
酮类	0	3	3	3	1	1	1	3	0	2
芳香族	4	4	4	3	1	3	2	4	4	4
酯类	4	3	3	3	0	0	0	1	1	1
含氮、氧类	0	3	3	3	2	2	2	3	3	2
酸类	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2
总计	23	37	40	39	18	24	23	31	32	35

两组导致的。 总体而言,贮藏期间,UHPSO 组和 MTSO 组秋刀鱼软罐头挥发性物质表现出先增加后减少的规律,RSO 组由于处理温度较高使得其醛类物质在不断增加。

2.2.1.1 羰基类化合物 羰基化合物包括醛类及酮类,是水产品特征气味的重要指标,主要为不饱和脂肪氧化和蛋白质降解产生^[34],醛类阈值较低,对水产品风味贡献较大^[35]。本研究醛类物质检出种类较多,所占比例较大,其中第 6 个月时 MTSO 组和 RSO 组检出的醛类数量占比分别为 33.33% 和 34.29%,是秋刀鱼软罐头以及橄榄油风味的主要贡献物质。随着贮藏时间的增加,醛类物质种类呈不断上升的趋势,这是因为高油酸、亚油酸的油脂经过热处理后更

容易产生醛类、烯醛类物质,并且会随着时间的延长而增加^[36]。橄榄油进入鱼肉后部分脂肪酸自动氧化产生己醛等醛类^[37],并且随着时间的推移烯醛类物质在不断增加,导致贮藏期间经过热处理的秋刀鱼软罐头中醛类物质整体的种类和含量增加,MTSO 组相较于 RSO 组醛类物质更多,产品风味更丰富。

不同杀菌处理组的醛类种类由多到少分别为:MTSO 组、RSO 组、UHPSO 组,比如十一醛,呈现一定的花香和柑橘香,仅在 MTSO 组被检出,对 MTSO 组秋刀鱼软罐头风味具有重要的修饰作用,使得微波辅助热杀菌组油浸秋刀鱼软罐头的风味较其他两种杀菌处理更加丰富。辛醛、反-2,4-庚二烯醛、反-2-辛烯醛等对鱼腥味贡献较大的醛类在贮藏期间含量呈现逐渐降低的趋势,表明秋刀鱼软罐头鱼腥味在不同杀菌处理以及橄榄油油浸期间得以改善。

鱼肉中酮类物质主要来源于脂肪氧化或微生物的作用^[37],大部分酮类物质阈值较高,对鱼肉整体风味贡献不大。如表 4,本实验中仅 2,3-戊二酮(黄油、水果味)和 2-壬酮(甜味、水果香)等阈值较低,与其他物质作用对秋刀鱼软罐头的风味有一定的修饰作用,其中,2,3-戊二酮仅在 MTSO 组和 RSO 组被检出,UHPSO 组未检出,推测可能是由于超高压杀菌属于冷杀菌技术,没有热处理的环节会抑制部分羰基类物质的生成。

2.2.1.2 醇类物质 醇类物质主要是由于脂肪酸氧化酶作用于多不饱和脂肪酸以及羰基化合物的还原产物^[38]。在贮藏期间,所有处理组醇类物质含量均呈

表 4 贮藏期间秋刀鱼软罐头挥发性成分 OAV 值
Table 4 OAV value of volatile components in soft canned saury during storage

名称	阈值(ng/g)	气味描述	橄榄油	MTSO 组			UHPSO 组			RSO 组		
				1 月	3 月	6 月	1 月	3 月	6 月	1 月	3 月	6 月
己醛	5	青草味、脂香味	1.18	0.97	0.91	1.12	0.51	0.93	1.37	0.18	0.81	0.84
反-2-庚烯醛	13	肉香味、甜味	0.21	—	—	0.05	—	—	0.03	—	—	0.05
苯甲醛	41.7	苦杏仁味	—	0.05	0.03	0.06	—	—	—	0.06	0.03	0.08
辛醛	0.587	脂香味、辛辣味	5.14	6.25	9.81	6.05	—	2.01	1.94	—	0.97	3.30
反-2,4-庚二烯醛	15.4	脂香味、鱼腥味	0.14	0.51	0.29	0.14	—	—	—	0.59	0.20	0.14
反-2-辛烯醛	3	脂香味、鱼腥味	0.76	0.64	0.42	0.48	—	—	0.21	—	—	0.40
壬醛	1	脂香味、青草味	5.27	—	—	0.86	3.58	3.16	3.36	—	—	1.27
癸醛	0.1	青草味	—	38.20	37.50	27.40	—	—	—	35.50	10.50	14.60
十一醛	5	脂香味、柠檬香	0.04	0.86	0.67	0.41	—	—	—	—	—	—
十三醛	10	肥皂、蜡质味	0.31	—	0.08	0.15	—	0.04	0.11	—	0.06	0.21
1-戊烯-3-醇	358.1	烧焦味、肉香味	—	0.15	0.10	0.02	0.06	0.05	0.06	0.14	0.04	0.02
1-辛烯-3-醇	40	蘑菇味、土腥味	—	0.32	0.06	0.05	0.13	0.08	0.04	0.18	0.09	0.06
2,3-戊二酮	5.13	黄油、水果味	—	0.74	0.41	—	—	—	—	2.27	—	—
甲基庚烯酮	68	鱼腥味	—	0.11	0.05	—	0.03	0.02	—	0.05	—	—
苯乙酮	65	甜味、辛辣味	—	0.02	0.05	0.02	—	—	—	0.04	—	—
2-壬酮	5	甜味、水果香	—	—	—	0.97	—	—	0.35	—	—	0.35
对二甲苯	490	天竺葵、油脂味	0.00	0.01	0.01	0.01	—	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03
萘	6	香樟木、草药味	0.04	3.29	1.48	1.29	—	—	—	1.81	1.08	1.36
三甲胺	2.4	鱼腥味、哈喇味	—	24.69	12.63	0.53	24.18	15.94	3.15	11.43	0.91	—
2-乙基呋喃	2.3	甜味、麦芽味	—	1.34	3.73	0.66	0.50	0.67	0.86	13.73	9.08	6.62

注:—表示未检出,气味来源于<http://www.perflavory.com/search.ph>。

现逐渐降低的趋势,可能是因为贮藏期间产品脂质氧化、美拉德反应、酶促氧化等受到抑制,因此醇类物质可能会减少。多数醇类化合物风味阈值较高,但不饱和醇类化合物(如 1-辛烯-3-醇)阈值低,对鱼体风味贡献很大($0.1 < \text{OAV} < 1$)。1-辛烯-3-醇是亚油酸的氢过氧化物降解产物,具有蘑菇香气和土腥味^[39],其阈值低,含量高,对鱼肉整体风味有重要贡献作用,在三种杀菌处理组均有检出,随着贮藏期的增加,1-辛烯-3-醇在各处理组含量均显著降低($P < 0.05$)。2,4-癸二烯-1-醇(脂香味、柠檬香)和 2-十一醇(蜡质味)仅在 MTSO 组和 RSO 组被检出,对产品的风味有一定的修饰作用,这可能是不同杀菌处理组秋刀鱼软罐头风味存在差异的原因之一。

2.2.1.3 烃类及芳香族 烃类物质主要来自脂肪酸烷基自由基的分裂,阈值较高,对鱼肉风味的贡献不大^[40]。甲苯、苯类化合物一般由苯丙氨酸或酯类分解产生,可以反映鱼肉被氧化的程度^[41]。如表 2 所示,不同杀菌处理秋刀鱼软罐头中的烃类物质种类较多,其中烷烃、烯烃、芳香烃类分别为 7、5 和 4 种,1,4-戊二烯是 MTSO 组特有烃类物质,1,3-辛二烯,苯乙烯仅在 MTSO 组和 RSO 组被检出。RSO 组中烃类物质含量在贮藏期间基本呈现逐渐减少的趋势,其他两组中烃类物质含量波动较大,其中 MTSO 组在第一个月时烃类含量比其他两组低,而第三个月时烃类物质含量最高,这可能是因为在微波处理时橄榄油氧化程度小于其他两组,油酸、亚油酸产生的烷基自由基随着时间推移分裂成的烃类会逐步向鱼肉中扩散^[40],但随着贮藏时间继续增加,烃类含量到达一定阈值,其含量开始降低。

2.2.1.4 酯类、酸类和其他类物质 酯类物质是羧酸与醇发生酯化反应后形成的产物,是鱼肉特征香味主要贡献物质^[42],但在本实验中检测到的 3 种酯类阈值高且含量较低,故对秋刀鱼软罐头的风味贡献较小,同其他物质对产品风味有一定的修饰作用。酸类主要由脂肪酸甘油三酯的降解或者高级脂肪酸变为低级脂肪酸生成^[43]。本实验中共检出油酸和棕榈酸类两种长链酸,阈值较高,对秋刀鱼软罐头风味贡献较小。三甲胺是由氧化三甲胺在微生物和酶的作用下降解生成,具有鱼腥味。三种杀菌处理的油浸秋刀鱼软罐头在贮藏前期均检测到一定量的三甲胺,随着贮藏期的增加,三甲胺的含量逐渐降低,表明油浸贮藏可能在一定程度上改善秋刀鱼肉的风味。

本实验还检测到 3-甲基呋喃和 2-乙基呋喃两种呋喃类物质,呋喃类物质来源于美拉德反应和硫胺素的热降解^[44]。呋喃类化合物大都具有很强的肉香味以及极低的香气阈值,对产品风味有强烈的修饰作用。3-甲基呋喃仅在 MTSO 组和 RSO 组中被检出,2-乙基呋喃在三种杀菌处理组均被检出,且 RSO 组含量远高于其他两种杀菌组,推测是因为高压蒸汽杀菌热效应更强烈从而导致美拉德反应及硫胺素降解

产生更多的 2-乙基呋喃。

2.2.2 主体风味物质分析 秋刀鱼软罐头的总体风味是挥发性成分的含量和阈值共同决定的,因此通过 OAV 进一步确定秋刀鱼软罐头中的主体风味物质($\text{OAV} \geq 1$ 的物质是主体风味物质,对产品整体风味有较大的贡献度, $0.1 \leq \text{OAV} < 1$ 的成分对产品的总体风味具有修饰作用^[45])。如表 4 所示,MTSO 组秋刀鱼软罐头中辛醛、癸醛、萘、三甲胺和 2-乙基呋喃的 OAV 在不同贮藏期大于 1,对整体风味有较大的贡献度,对整体风味具有重要修饰的物质为己醛、反-2,4-庚二烯醛、反-2-辛烯醛、十一醛、1-戊烯-3-醇和 2,3-戊二酮。UHPSO 组秋刀鱼软罐头己醛、辛醛、壬醛和三甲胺的 OAV 在不同贮藏期大于 1,对整体风味有较大的贡献度,对整体风味具有重要修饰的物质为反-2-辛烯醛、十三醛、1-辛烯-3-醇、2-壬酮和 2-乙基呋喃。RSO 组秋刀鱼软罐头中辛醛、壬醛、2,3-戊二酮、三甲胺、癸醛、萘和 2-乙基呋喃的 OAV 在不同贮藏期大于 1,对整体风味有较大的贡献度,对整体风味具有重要修饰的物质为己醛、反-2,4-庚二烯醛、反-2-辛烯醛、十三醛、1-辛烯-3-醇、2-壬酮。在 MTSO 组和 RSO 组中,OAV 值最大的均为癸醛,是秋刀鱼软罐头风味贡献度最高的风味物质,具有青草香味,其阈值较低,对秋刀鱼罐头的香气形成有较大的影响。UHPSO 组主要贡献的物质变化率较小,这可能是杀菌处理温度低于其他两组所导致的^[46]。MTSO 组和 RSO 组较大贡献气味的种类相当,2,3-戊二酮为 RSO 组中特有的贡献物,主要对其他风味物质起辅助作用,使肉类产品香味更加饱满^[47],但是由于其阈值较高,其对秋刀鱼肉的风味的影响不大。

2.3 脂肪酸与挥发性物质变化相关性分析

结合以上数据对脂肪酸和挥发性物质进行相关性分析(截取了呈显著相关的几种物质如图 3 所示)。2-乙基呋喃的来源可能是不饱和脂肪酸在加热时发生的氧化^[48-49],UHPSO 组中 2-乙基呋喃含量明显低于其他两组证明了这一点,且三个处理组的 2-乙基呋喃含量均与部分多不饱和脂肪酸成正比,而 RSO 组 2-乙基呋喃含量较高则可能与样品处理温度较高有关。在贮藏的过程中由于橄榄油进入到鱼肉中以及不饱和脂肪酸的转化,秋刀鱼中饱和脂肪酸的含量呈上升趋势,导致 RSO 组中癸醛与亚油酸成反比。与此同时不饱和脂肪酸如油酸、亚油酸等容易发生氧化分解成己醛、辛醛、癸醛等,故表现为 UHPSO 组中己醛与棕榈酸和硬脂酸成正比,与 DHA 成反比,MTSO 组中癸醛与 EPA 成正比。三甲胺是评价鱼肉新鲜度的重要指标^[50-51],由氧化三甲胺的还原和分解产生,是本实验秋刀鱼软罐头中主要的腥味来源,在本研究中三个处理组中三甲胺含量都随着贮藏期的增加而明显减少,这可能是三甲胺产生的同时部分溶解到了橄榄油中,这也是其与部分不饱和脂肪酸(如亚油酸)成反比的原因。

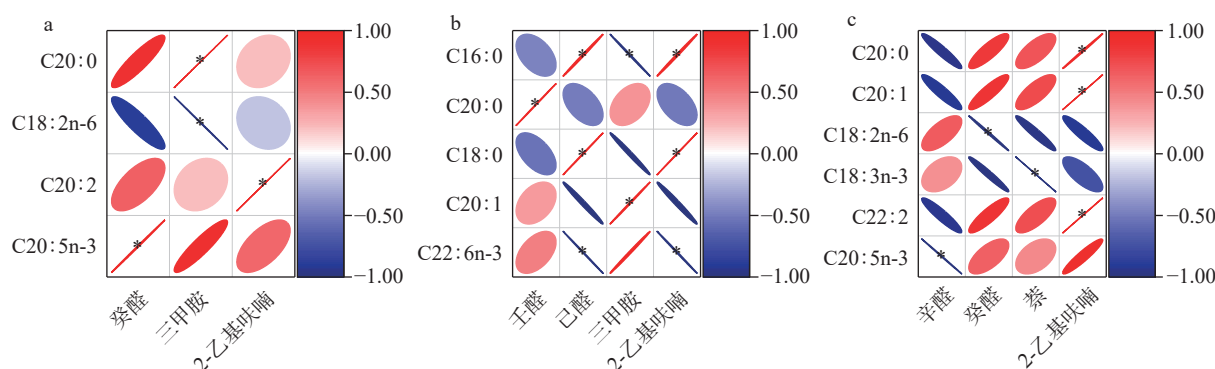


图 3 秋刀鱼软罐头脂肪酸和挥发性物质的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of fatty acids and volatile substances in soft canned saury

注: a: MTSO 组; b: UHPSO 组; c: RSO 组。

3 结论

本文探究了不同杀菌方式对油浸秋刀鱼软罐头在不同贮藏阶段脂肪酸组成以及挥发性成分的变化规律。结果表明:杀菌方式及橄榄油浸渍处理对贮藏期间秋刀鱼软罐头的脂肪酸组成有显著影响。贮藏期间,橄榄油和鱼肉之间存在脂肪酸交换,贮藏前期的多不饱和脂肪酸会从橄榄油中向鱼肉扩散,达到平衡后会随着发生脂质氧化而降低。同时挥发性物质也存在交换,不良气味物质如三甲胺等会从鱼肉向外扩散,从而使秋刀鱼肉的品质得到改善。但油浸方式对秋刀鱼肉的积极作用是有限的,当物质的交换达到平衡后,随着时间的推移鱼肉品质仍然会逐渐降低。不同处理组中,MTSO 组秋刀鱼软罐头挥发性物质种类最多且具有最佳品质,UHPSO 组挥发性物质种类最少且腥味物质含量高于其他两组,最不耐储藏。RSO 组中,OAV 值最大的均为癸醛,是秋刀鱼软罐头风味贡献度最高的风味物质。综上,微波辅助杀菌后的秋刀鱼软罐头脂肪酸和挥发性物质的组成和变化较为理想,杀菌结合油浸可以改善鱼腥味,并引入橄榄油中的特征风味物质,对秋刀鱼软罐头整体风味进行改善,为便携食品的包装和品质变化研究提供了一定的理论参考。

参考文献

- [1] 罗海波,陈伟,王锦富,等.秋刀鱼营养价值及其开发利用研究进展[J]. *水产科学*, 2016, 35(2): 179-184. [LUO H B, CHEN W, WANG J F, et al. Current advances on nutrition, exploitation and utilization of pacific saury *Cololabis saira*[J]. *Fisheries Science*, 2016, 35(2): 179-184.]
- [2] YANG Z H, AMAR M, SOROKIN A V, et al. Supplementation with saury oil, a fish oil high in omega-11 monounsaturated fatty acids, improves plasma lipids in healthy subjects[J]. *Journal of Clinical Lipidology*, 2020, 14(1): 53-65.
- [3] SALLAM K I, AHMED A M, ELGAZZAR M M, et al. Chemical quality and sensory attributes of marinated Pacific saury (*Cololabis saira*) during vacuum-packaged storage at 4°C[J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(4): 1061-1070.
- [4] 夏文水. 食品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007. [XIA W S. Food technology[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.]
- [5] 岑剑伟,孙万青,陈胜军,等.即食海蜇中铝检测、脱除与杀菌新技术研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(8): 268-275. [CEN J W, SUN W Q, CHEN S J, et al. New technology of aluminum detection, removal and sterilization for ready-to-eat jellyfish[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(8): 268-275.]
- [6] 戴浩然,冯雅,何诗行.食品超高压技术应用及装备研究进展[J]. *食品工业*, 2022, 43(9): 179-182. [DAI H R, FENG Y, HE S X, et al. Research progress of food high pressure technology and equipment[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(9): 179-182.]
- [7] 李蓉,林海滨.食品杀菌新技术应用研究进展[J]. *现代食品*, 2022, 28(12): 63-67. [LI R, LIN H B. Research progress on application of new food sterilization technology[J]. *Modern Food*, 2022, 28(12): 63-67.]
- [8] 阎玮.软罐头食品的工艺及前景展望[J]. *甘肃农业*, 2012(9): 53-55. [YAN W. Technology and prospect of soft canned food[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2012(9): 53-55.]
- [9] 黄帅,蒋瑞,王强,等.酶处理对初榨橄榄油品质及抗氧化活性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(8): 104-110. [HUANG S, JIANG R, WANG Q, et al. Effects of enzymes on quality and antioxidant activity of virgin olive oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(8): 104-110.]
- [10] 向方桃,李书华,陈封政.橄榄油抗氧化性能及抗氧化活性物质的研究[J]. *乐山师范学院学报*, 2020, 35(4): 29-32. [XIANG F T, LI S H, CHEN F Z. Research on antioxidant activity and material of olive oil[J]. *Journal of Leshan Teachers College*, 2020, 35(4): 29-32.]
- [11] 张文超,李会珍,张志军,等.8种不同植物油的脂肪酸组成及抗氧化性比较[J]. *中国油脂*, 2021, 46(4): 68-71,5. [ZAHNG W C, LI H Z, ZHANG Z J, et al. Fatty acid composition and antioxidant properties of eight different vegetable oils[J]. *China Oils and Fats*, 2021, 46(4): 68-71,5.]
- [12] CARAMIA G, GORI A, VALLI E, et al. Virgin olive oil in preventive medicine: From legend to epigenetics[J]. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 2012, 114(4): 375-388.
- [13] KYÇYK O, AGUILERA M P, GAFORIO J J, et al. Sterol composition of virgin olive oil of forty-three olive cultivars from the World Collection Olive Germplasm Bank of Cordoba[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(12): 4143-4150.
- [14] DONATO-TRANCOSO A, CORREA ATELLA G, ROMANA-SOUSA B. Dietary olive oil intake aggravates psoriatic skin inflammation in mice via Nrf2 activation and polyunsaturated fatty acid imbalance[J]. *International Immunopharmacology*, 2022, 108:

108851.

- [15] 王永进. 凉山24种橄榄油的组成分析及其对高脂牛肉消化过程中脂质氧化的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [WANG Y J. Composition analysis of 24 kinds of olive oil from Liangshan and its effect on lipid oxidation during high fat beef digestion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [16] 泮林. 现阶段烹饪工艺和食品营养之间的关系思考[J]. 食品安全导刊, 2022(29): 128-130. [PAN L. Thoughts on the relationship between cooking technology and food nutrition at present stage[J]. China Food Safety Magazine, 2022(29): 128-130.]
- [17] 姜启兴, 程程芳, 高沛, 等. 斑点叉尾鲷鱼软罐头杀菌工艺研究[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(3): 97-102. [JAING Q X, NIE C F, GAO P, et al. Study on sterilization technology of soft canned channel catfish[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(3): 97-102.]
- [18] 王朝阳, 王祖忠, 李晔, 等. 油浸鲑鱼罐头贮藏过程中挥发性成分的变化规律研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(8): 316-321. [WANG C Y, WANG Z X, LI Y, et al. Research on the detection of the volatile substances changes of canned oil skipjack during storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(8): 316-321.]
- [19] 潘志海, 郭长凯, 栾东磊. 即食小龙虾的微波杀菌工艺研究及品质评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 221-230. [PAN Z H, GUO C K, LUAN D L. Study on microwave sterilization process and quality evaluation of instant crayfish (*Procambarus clarkii*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 221-230.]
- [20] JING Z, TAO N, WANG M, et al. Characterization of phospholipids from Pacific saury (*Cololabis saira*) viscera and their neuroprotective activity[J]. Food Bioscience, 2018, 24: 120-126.
- [21] SANTOS-SILVA J, MENDES I A, BESSA R J B. The effect of genotype, feeding system and slaughter weight on the quality of light lambs: 1. Growth, carcass composition and meat quality[J]. Livestock Production Science, 2002, 76(1-2): 17-25.
- [22] ZHU J C, NIU Y, XIAO Z B. Characterization of the key aroma compounds in Laoshan green teas by application of odour activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC×GC-qMS)[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128136.
- [23] 张美, 蒋家乐, 朱清澄, 等. 不同杀菌处理对秋刀鱼软罐头营养及滋味的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 109-118. [ZHANG M, JIANG J L, ZHU Q C, et al. Effect of different sterilization treatments on the nutrition and taste of soft canned saury[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 109-118.]
- [24] 黄甜, 严成, 孙娟, 等. 超高压结合热处理对猪肉肌内脂肪酸组成的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 226-36, 321. [HUANG T, YAN C, SUN J, et al. Combined effects of high-pressure and thermal treatment on intramuscular fatty acid composition in pork[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(5): 226-36, 321.]
- [25] SONI A, SMITH J, THOMPSON A, et al. Microwave-induced thermal sterilization-A review on history, technical progress, advantages and challenges as compared to the conventional methods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 433-442.
- [26] CHOUHAN A, KAUR B P, RAO P S. Effect of high pressure processing and thermal treatment on quality of hilsa (*Tenualosa ilisha*) fillets during refrigerated storage[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 29: 151-160.
- [27] GÓMEZ-LIMIA L, COBAS N, FRANCO I, et al. Fatty acid profiles and lipid quality indices in canned European eels: Effects of processing steps, filling medium and storage [J]. Food Research International, 2020, 136.
- [28] BEZERRA C V, RODRIGUES A M D C, DE OLIVEIRA P D, et al. Technological properties of amazonian oils and fats and their applications in the food industry[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1466-1473.
- [29] GÓMEZ-LIMIA L, COBAS N, MARTÍNEZ S. Proximate composition, fatty acid profile and total amino acid contents in samples of the European eel (*Anguilla anguilla*) of different weights[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2021, 25: 100364.
- [30] COSTA D D S, BRAGAGNOLO N. Development and validation of a novel microwave assisted extraction method for fish lipids[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119: 1600108.
- [31] ANISHCHENKO O, SUSHCHIK N N, MAKHUTOVA O N, et al. Benefit-risk ratio of canned pacific saury (*Cololabis saira*) intake: Essential fatty acids vs. heavy metals[J]. Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association, 2017, 101: 8-14.
- [32] 丁凯辉. 微波高温杀菌处理对秋刀鱼脂脂肪酸的影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022. [DING K H. Study the effects of microwave high temperature sterilization processing on the fatty acid of the Pacific saury[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.]
- [33] 陈君玉, 孙渊, 饶雷, 等. 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[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 345-353. [CHEN J Y, SUN Y, RAO L, et al. Comparison of lipids and volatile flavor components in Chinese braised pork in brown sauce with different sterilization methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 345-353.]
- [34] 林婉玲, 丁莫, 李来好, 等. 调理脆肉鲩鱼片冷藏过程风味成分变化[J]. 南方水产科学, 2018, 14(4): 112-121. [LIN W L, DING M, LI L H, et al. Volatile components change in prepared crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) during chilling storage[J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(4): 112-121.]
- [35] 王虹, 周舟, 杜险峰, 等. SPME-GC-MS结合ROAV分析捞汁对富含蛋白质凉菜总体风味影响的研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(12): 174-180. [WANG H, ZHOU Z, DU X F, et al. Analysis of effect of compound dressing sauce on the overall flavor of protein-rich cold dishes by SPME-GC-MS combined with ROAV[J]. China Condiment, 2022, 47(12): 174-180.]
- [36] GUILLÉN M D, URIARTE P S. Aldehydes contained in edible oils of a very different nature after prolonged heating at frying temperature: Presence of toxic oxygenated α , β unsaturated aldehydes[J]. Food Chemistry, 2012, 131: 915-26.
- [37] TOLDRÁ F, FLORES M. The role of muscle proteases and lipases in flavor development during the processing of dry-cured ham[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 1998, 38(4): 331-352.
- [38] 钱琴莲, 李晔, 王求娟, 等. 基于GC-MS和电子鼻技术的金枪鱼胰脏酶解气味解析[J]. 食品科学, 2016, 37(8): 121-126. [QIAN Q L, LI Y, WANG Q J, et al. Analysis of volatile flavor compounds of tuna pancreatic protein hydrolysates produced by different proteases[J]. Food Science, 2016, 37(8): 121-126.]
- [39] 吴丽香, 张雯, 童秋霞, 等. 即食秋刀鱼加工过程中挥发性成分变化规律[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 29-36. [WU L X,

- ZHANG W, TONG Q X, et al. Study on the variation of volatile components of ready-to-eat Pacific saury (*Cololabis saira*) during processing[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(9): 29–36.]
- [40] 周明珠,熊光权,乔宇,等.复热处理的鲈鱼挥发性成分分析[J].*现代食品科技*, 2020, 36(4): 277–283. [ZHOU M Z, XIONG G Q, QIAO Y, et al. Volatile components of reheated *Lateolabrax japonicus* [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(4): 277–283.]
- [41] 李婷婷,丁婷,邹朝阳,等.顶空固相微萃取-气质联用技术结合电子鼻分析 4 ℃ 冷藏过程中三文鱼片挥发性成分的变化[J].*现代食品科技*, 2015, 31(2): 249–260. [LI T T, DING T, ZOU C Y, et al. Analysis of changes in volatile components of salmon fillets during refrigerated storage by the HS-SPME-GC-MS technique combined with electronic nose[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(2): 249–260.]
- [42] JIANG J J, ZENG Q X, ZHU Z W, et al. Chemical and sensory changes associated Yu-lu fermentation process-A traditional Chinese fish sauce[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(4): 1629–1634.]
- [43] 李晓朋,曾欢,林柳,等.不同煎炸用油制备河豚鱼汤挥发性风味成分的差异性[J].*食品与发酵工业*, 2021, 47(7): 251–259. [LI X P, ZENG H, LIN L, et al. Volatile compounds of puffer fish soup prepared with different frying oils[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(7): 251–259.]
- [44] 曹伟峰,张悦妍,向情儒,等.基于 HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 结合电子鼻分析真空冷却对酱牛肉风味的影响[J].*食品工业科技*, 2022, 43(9): 341–348. [CAO W F, ZHANG Y Y, XIANG Q R, et al. Analysis of the effect of vacuum cooling on the flavor of sauce beef based on HS-SPME-GC-MS and GC-IMS combined with electronic nose[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(9): 341–348.]
- [45] 周慧敏,赵冰,吴倩蓉,等.黑白胡椒腊肠贮藏期中气味活性物质演变及异味分析[J].*食品科学*, 2020, 41(24): 162–171. [ZHOU H M, ZHAO B, WU Q R, et al. Changes in odor-active compounds and analysis of off-flavor compounds in Chinese sausage added with black and white pepper during storage[J]. *Food Science*, 2020, 41(24): 162–171.]
- [46] 张根生,王军茹,岳晓霞,等.酱卤肉制品加工过程中风味物质形成机理和变化研究进展[J].*中国调味品*, 2021, 46(11): 195–200. [ZHANG G S, WANG J R, YUE X X, et al. Research progress on the formation mechanism and changes of flavor substances in the processing of braised meat products[J]. *China Condiment*, 2021, 46(11): 195–200.]
- [47] 孟凡冰,刘达玉,向茂德,等.不同卤制方法对白鹅腿肉品质及挥发性风味成分的影响[J].*食品工业科技*, 2018, 39(5): 272–279. [MENG F B, LIU D Y, XIANG M D, et al. Effects of different bitter process on volatile flavor compounds of white goose thigh[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(5): 272–279.]
- [48] BECALSKI A, SEAMAN S. Furan precursors in food: A model study and development of a simple headspace method for determination of furan[J]. *Journal of AOAC International*, 2005, 88(1): 102–106.]
- [49] PEREZ L C, YAYLAYAN V A. Origin and mechanistic pathways of formation of the parent furan-A food toxicant[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(22): 6830–6836.]
- [50] IKEDA S, CONNELL J J. Other organic components and inorganic components[J]. *Advances in Fish Science and Technology*, 1980, 13: 111–124.]
- [51] RAYMOND J A, DEVRIES A L. Elevated concentrations and synthetic pathways of trimethylamine oxide and urea in some teleost fishes of McMurdo Sound, Antarctica[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2004, 18: 387–398.]