

鱼糜制品加热过程中过熟味的特征风味成分解析

杨姣, 安玥琦, 陈雨欣, 尹涛, 尤娟, 刘茹, 熊善柏, 陈加平, 胡杨

(华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 为探究鱼糜制品在二段式制备过程中及水浴复热方式中过熟味(Warmed-over flavor, WOF)形成过程及变化趋势, 采用采用(40℃加热60 min预煮)不同二段式水浴温度(85、90、100℃加热30 min)、不同二段式水浴时间(90℃加热5、10、15、20、25、35、40、45 min)制备鱼糜凝胶; 对(40℃加热60 min+90℃加热30 min)制备的鱼糜凝胶采用不同复热水浴温度(60、70、80、90、100℃加热30 min)、不同复热水浴时间(90℃加热2.5、5、7.5、10、15 min)进行处理, 并对水浴加热前后的鱼糜凝胶进行感官、电子鼻和气质联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)评价。结果表明: 不同水浴加热方式下鱼糜凝胶共检测到74种挥发性物质, 其中醛类15种、酮类6种、醇类15种、酯类10种、酚类4种、酸类2种、烃类7种、其他化合物15种; 结合OAV值及感官评价显示鱼糜凝胶 WOF 关键因子为己醛、壬醛、辛醛、1-辛烯-3-醇、庚醛、(E)-2-壬烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、香叶基丙酮以及(E)-2-辛烯-1-醇、苯乙酮、苯乙烯等, 且 WOF 表现为类似“酸败气味”、“陈腐气味”的异味。在二段式加热条件下(预煮40℃, 60 min; 鱼糕化90℃, 30 min)制备的鱼糜凝胶在复热条件80℃加热30 min开始产生 WOF, 并随温度升高, WOF 愈浓。本研究为鱼糜制品在二段式制备及后续熟化加工中 WOF 控制策略提供了理论参考。

关键词: 水浴加热; 鱼糜制品; 过熟味; 感官评价; 电子鼻; 挥发性风味组分

文章编号: 1673-9078(2020)08-265-280

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.8.0169

Characterization of Odorant Components in Surimi Products with Warmed-over Flavor during the Heating Process

YANG Jiao, AN Yue-qi, CHEN Yu-xin, YIN Tao, YOU Juan, LIU Ru, XIONG Shan-bai, CHEN Jia-ping, HU Yang

(College of Food Science and Technology Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: To investigate the formation of warmed-over flavor (WOF) in surimi gels and how the odorants changed during a two-step water-bath heating process and water-bath reheating process, surimi gels were prepared with a set of temperatures (heated at 85℃, 90℃, and 100℃ for 30 min) or lengths of time (heated at 90℃ for 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 35 min, 40 min, and 45 min) for the two-step water-bath heating process after a pre-incubation at 40℃ for 60 min. Meanwhile, the surimi gels, which were prepared by heating them at 40℃ for 60 min and 90℃ for 30 min, were reheated at a series of temperatures (60℃, 70℃, 80℃, 90℃, and 100℃ for 30 min) or for a series of durations (2.5 min, 5.0 min, 7.5 min, 10 min, and 15 min at 90℃). Thereafter, sensory evaluation, electronic nose sensing, and gas chromatography mass spectrometry (GC-MS) were conducted to analyze the odor properties of samples before and after the heating strategy. In total, 74 volatile components were successfully identified via GC-MS in surimi gels made using different water-bath heating methods, including 15 aldehydes, six ketones, 15 alcohols, ten esters, four phenols, two acids, seven hydrocarbons, and 15 other compounds. According to the odor activity values (OAVs) and sensory evaluation, the key odorant

引文格式:

杨姣,安玥琦,陈雨欣,等.鱼糜制品加热过程中过熟味的特征风味成分解析[J].现代食品科技,2020,36(8):265-280

YANG Jiao, AN Yue-qi, CHEN Yu-xin, et al. Characterization of odorant components in surimi products with warmed-over flavor during the heating process [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 265-280

收稿日期: 2020-02-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0901003)

作者简介: 杨姣(1995-),女,硕士,研究方向:食品科学

通讯作者: 胡杨(1987-),男,博士,副教授,研究方向:水产品加工及副产物综合利用

compounds that could affect the warmed-over flavor in surimi gels were hexanal, nonanal, octanal, 1-octen-3-ol, heptanal, (E)-2-nonenal, (E,Z)-2,6-nonadienal, (E)-6,10-dimethyl-5,9-undecadien-2-one, (E)-2-octen-1-ol, acetophenone, and styrene. Additionally, the warmed-over flavor presented "rancid-like" and "stale-like" odors. Additionally, the steps to generate the warmed-over flavor included pre-incubation at 40 °C for 60 min and heating at 90 °C for 30 min, followed by a reheating process at 80 °C for 30 min. With the increase in temperature, the WOF became more intense. This study provides some theoretical references for controlling the formation of warmed-over flavor in the manufacture of surimi products.

Key words: water-bath heating; surimi products; warmed-over flavor; sensory evaluation; electronic nose; volatile odorant compounds

鱼糜制品是将生鲜鱼糜或冷冻鱼糜经斩拌、加热使之凝胶化所制成的一种精深加工水产食品,常见的淡水鱼鱼糜制品评价指标涵盖凝胶强度、持水性、白度等^[1]。但随着研究深入,鱼糜制品加工温度过高及储藏时间过长时会产生被描述为“酸败气味”、“陈腐气味”、“纸板气味”的异味,即称之为过熟味(WOF)^[2]。

WOF 易被消费者感知,影响产品食用品质,不利于鱼糜制品消费市场的扩大。因此,开展鱼糜制品复热风味研究十分必要。目前,国外学者针对西式肉制品复热风味尤其是 WOF 形成、影响因素和控制措施开展了大量研究,研究表明 WOF 异味需要经过复热冷藏后产生,其关键风味因子多为戊醛、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃等脂质氧化降解产物,但其形成过程较普通自然脂肪氧化更具有破坏性^[3-10]。早年国内学者多围绕速冻调理制品复热品质开展研究,近年来也只研究了猪肉糜制品的 WOF 形成情况,对于鱼糜制品 WOF 风味形成、品质保持和 WOF 控制研究较少,仍有待深入^[11,12]。

近年来,感官评价结合电子鼻(electronic nose, EN)、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(Head-space solid-phase microextraction-gas chromatography mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)是快速全面测定肉制品风味的有效手段。感官评价指依赖于人的嗅觉器官(鼻子)来辨识食品的气味差异,但感官对象存在喜好、生理和心理状况差异,因此感官数据往往重复性、稳定性差。智能嗅觉识别系统(电子鼻)是一种模拟人生理嗅觉的传感技术,它采用传感器阵列获得被分析物质的响应信号,借助数据处理方法对多种气味进行识别,从而对气味质量进行分析与评定,能够避免生理嗅觉的缺陷,其重复性和稳定性好。电子鼻结合感官评价可全面客观地鉴定不同样品间风味差异^[13]。HS-SPME-GC-MS 分析效率高、操作简便且经济实用,能集挥发性成分采集、

富集、进样为一体^[14],已广泛应用于食品风味物质的分析^[15,16]、水中异味成分的测定^[17]等领域。气味活度值(odor activity value, OAV)是风味物质浓度与其阈值的比值,结合 GC-MS 可用来评价各化合物对样品总体风味的贡献,结合主成分分析(principal component analysis, PCA)可以确定主体风味物质对个别样品贡献占比^[18]。

本实验选择冷冻鲢鱼鱼糜为原料,经过不同复热方式处理的鱼糜凝胶为实验对象,以电子鼻、感官评价、顶空固相微萃取-气质联用(HS-SPME-GC-MS)为风味检测手段,同时结合气味活性值(odor activity value, OAV)和主成分分析(principal component analysis, PCA)确定常见鱼糜制品在凝胶成型及复热过程中过熟味产生的临界条件及典型过熟味物质种类,并且探明不同复热方式对鱼糜制品 WOF 关键风味因子和生产加工过程中产品品质保持规律,以期建立鱼糜制品 WOF 风味形成及控制策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

白鲢冷冻鱼糜,洪湖市井力水产食品股份有限公司。

食用盐,购于某超市;1,2-二氯苯标准品,购自 Sigma 公司。

1.2 试验设备

AUY220 型电子分析天平,日本岛津公司;HH-4 型数显恒温水浴锅,国华电器有限公司;Avanti J-26XP 型冷冻离心机,美国贝克曼库尔特有限公司;电子鼻 Fox 4000,法国 Alpha M.O.S 公司;50/30 μ m DVB/CAR on PDMS 手动固相微萃取头,上海安谱实验科技股份有限公司;Agilent 7890A/5975C 气相色谱质谱仪(GC-MS),美国安捷伦公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼糜凝胶复热样品制备方法

取冷冻鱼糜流水解冻 3 h。用卤素水分仪测水分含量，重复测三次，随后调节水分含量至 80%。将控制好水分的鱼糜进行斩拌，其中空斩 1 min，盐斩 3 min，斩拌完后装入真空袋内抽真空，然后用手动灌肠机灌肠，用手动封口机封口。将鱼糜肠置于 40 ℃ 水浴环境中加热 1 h，再于不同温度（85、90、100 ℃）

水浴环境中不同时间（5、10、15、20、25、30、35、40、45 min）二段式加热，完成之后的鱼肠于水中迅速冷却，为第一组样品；将鱼糜肠置于 40 ℃ 水浴环境中加热 1 h，于 90 ℃ 水浴环境中加热 30 min，4 ℃ 过夜冷藏（12 h），于不同温度（60、70、80、90、100 ℃）水浴环境中不同时间（2.5、5、7.5、10、15、30 min）复热，复热完成之后的鱼肠于水中迅速冷却，为第二组样品。

鱼糜凝胶二段式加热（第二段）参数如下：

表 1 不同鱼糜凝胶样品的二段式水浴加热（第二段）参数

Table 1 Parameters of two-step water-bath heating (the second stage) for different surimi gels

样品代码	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
水浴温度/℃	/	85	90	100	90	90	90	90	90	90	90	90
水浴时间/min	/	30	30	30	5	10	15	20	25	35	40	45

鱼糜凝胶水浴复热参数如下：

表 2 不同鱼糜凝胶样品的水浴复热参数

Table 2 Parameters of water-bath reheating for different surimi gels

样品代码	Sa	Sb	Sc	Sd	Se	Sf	Sg	Sh	Si	Sj	Sk
水浴温度/℃	-	60	70	80	90	100	90	90	90	90	90
水浴时间/min	-	30	30	30	30	30	2.5	5	7.5	10	15

1.3.2 感官评价

样品切成 5 mm 厚的薄片并进行编号。感官评价小组由 10 名人员组成，成员均具有食品专业背景且接受过专业的感官培训，拥有丰富的食品感官评价经

验。评价过程在 25 ℃ 的专业感官评价实验室进行，评定标准见下表。其中外观、组织状态、滋味、气味权重占比分别为 0.2、0.2、0.3、0.3。

表 3 鱼糜凝胶的感官评价标准表

Table 3 Sensory evaluation criteria of surimi gels

感官评分	外观（0.2）	组织状态（0.2）	滋味（0.3）	气味（0.3）
9~10	外表非常平整，光滑	断面密实，无大气孔，有许多微小且均匀的小气孔；中指力压，明显凹陷而不破裂，放手即可复原	有明显鱼鲜味	具浓郁鱼香味
7~8	外表较平整，有少许小凹坑	断面密实，无大气孔，有少量小气孔；中指力压，凹陷而不破裂，放手即可复原	有鱼鲜味	具鱼香味
5~6	外表较粗糙，有较多小凹坑	断面基本密实，无大气孔，有少量小气孔；中指力压，凹陷而不破裂，放手不能完全恢复原状	无鱼鲜味，略带苦涩酸味	无鱼肉香味，有轻微异味
3~4	外表较粗糙，有较多大凹坑	切面较松软，有少量不均匀小孔；中指力压即裂	无鱼鲜味，带苦涩酸味	无鱼肉香味，有明显异味
1~2	外表很粗糙，凹坑很多且大	切面呈浆状，松软无密实感；中指轻压即破裂	有明显苦涩酸味	无鱼肉香味，有浓郁异味

1.3.3 电子鼻分析

电子鼻检测分析参照文献所述方法，并稍作修改^[19]。称取斩碎的鱼肠 2.0 g 于 10 mL 顶空瓶中，顶空产生时间 120 s；顶空产生温度 50 ℃；搅动速度 500 r/min；顶空注射体积 2.5 mL；注射针温度 60 ℃；测试获取时间 120 s；延滞时间 300 s。每种样品平行测 4 次。

1.3.4 固相微萃取-气相色谱-质谱分析

挥发性风味组分的测定参照的方法，并略作修改^[20]。取 3.0 g 斩碎的鱼肠放入 30 mL 顶空气相瓶中，加入 200 μL 内标 1,2-二氯苯液（10 μg/mL），再加入 7 mL 饱和氯化钠溶液混合均质后，放入微型磁力搅拌转子，用聚四氟乙烯隔热垫密封。将已活化好的 DVB/CAR/PDMS 50/30 μm 萃取头插入顶空瓶中，并置于水浴加热搅拌器中，60 ℃ 下平衡 3 min 后顶空吸附 50 min，将萃取头插入 GC 进样口，解析 5 min。

气相色谱柱: DB-Wax 毛细管柱 (60 m×0.25 mm ID×0.25 μm)。气相色谱升温程序: 柱初温 40 ℃, 保持 3 min, 以 4 ℃/min 升温至 140 ℃, 保持 2 min, 再以 4 ℃/min 升至 230 ℃, 保持 2 min。进样口温度为 230 ℃; 热解吸 5 min; 载气: He 气, 流量 1.5 mL/min, 不分流。

质谱条件: EI 离子源; 电子能量 70 eV; 离子源温度为 230 ℃; 四级杆温度 150 ℃; 检测器温度为 250 ℃, 气质接口温度为 280 ℃; 检测器电压 1.2 kV; 扫描质量范围为 50~350 u。

1.3.5 挥发性物质定性分析

挥发性风味物质主要由 NIST14 标准谱库检索定性, 且仅报道正反匹配度均大于 80 的化合物, 选用 C7~C40 的正构烷烃计算各挥发物的保留指数 (retention index, RI), 并与文献中的 RI 值进行比对, RI 的计算公式如下式:

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

式中: Rt(x)、Rt(n)及 Rt(n+1)分别为待测挥发性成分、含 n 个碳原子正构烷烃及 n+1 个碳原子正构烷烃的保留时间, min。

1.3.6 挥发性物质定量分析

样品在动态顶空吸附前加入 200 μL 1,2-二氯苯液 (10 μg/mL) 作为内标, 根据峰面积比计算待测样品中挥发性风味物质的含量, 计算公式如下式:

$$C_x = \frac{C_o \times V_o \times S_x}{m \times S_o}$$

式中: C_x 为未知挥发性风味物质含量, μg/kg; C_o 为内标化合物质量浓度, μg/mL; V_o 为内标化合物进样体积, μL; S_x 为未知风味化合物的峰面积, AU·min; S_o 为内标化合物峰

面积, AU·min; m 为试样的质量, kg。

1.3.7 气味活性值 (OAV) 值计算

气味活性值 (Odorant Activity Value, OAV) 指嗅感物质的绝对浓度与其感觉气味阈值的比值。当物质的 OAV>1 时, 整体气味特征会因该物质浓度高低而不同; OAV<1 时, 则该物质不是决定总体气味特征的主要组分, 且在一定范围内, OAV 越大说明该组分对总体气味贡献越大^[21]。其计算公式如下式:

$$OAV = \frac{C}{T}$$

式中: C 为风味物质含量, μg/kg; T 为该风味物质在水中的感觉阈值, μg/kg。

1.3.8 数据处理

三次重复实验, 实验数据经 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 23.0 (IBM) 软件进行分析, 采用 ANOVA 进行邓肯氏 (Duncan's) 差异分析, 以 $p<0.05$ 表示差异显著。电子鼻数据处理、GC-MS 数据采用主成分分析 (PCA) 和线性判别分析 (Linear Discriminant Analysis, LDA) ^[22]。

2 结果与分析

2.1 感官评价

从表 4 可以看出, 经过不同二段式水浴复热温度和时间的水浴复热样品的凝胶组织结构评分有着显著性变化, 随着温度升高, 时间加长, 呈先上升后下降趋势, 经过第二段为 90 ℃加热 30 min 的样品凝胶强度最好; 其滋味和气味特性评分上也呈现相同的变化, 且表现出显著性差异 ($p<0.05$), 其中气味特性评分变化更为明显。

表 4 不同二段式水浴加热处理样品的感官评价测定结果

Table 4 Sensory evaluation results of primary reheating samples

样品编号	外观	组织状态	滋味	气味	整体感觉
S1	0.00±0.00 ^e (未成型)	0.00±0.00 ^e (未成型)	0.00±0.00 ^e (未成型)	1.25±0.25 ^g	0.38±0.08 ^g
S2	6.92±0.84 ^b	6.67±0.99 ^b	6.25±0.69 ^{bc}	7.17±0.62 ^{ab}	6.74±0.38 ^{bc}
S3	8.58±0.73 ^a	8.67±0.75 ^a	8.00±1.04 ^a	8.17±0.75 ^a	8.30±0.40 ^a
S4	7.50±0.41 ^b	7.67±0.55 ^{ab}	6.50±0.71 ^{bc}	6.42±0.45 ^{bc}	6.91±0.28 ^{bc}
S5	1.42±0.34 ^d	1.42±0.19 ^d	0.00±0.00 ^e (未成型)	2.00±0.00 ^{fg}	1.17±0.07 ^f
S6	2.25±0.38 ^d	1.92±0.53 ^d	0.00±0.00 ^e (未成型)	2.25±0.63 ^{fg}	1.51±0.31 ^f
S7	2.5±1.15 ^d	3.33±1.62 ^c	3.75±1.44 ^d	2.60±0.86 ^f	3.07±1.04 ^e
S8	5.42±0.34 ^c	6.58±1.02 ^b	6.92±0.67 ^{abc}	5.92±1.24 ^{cd}	6.25±0.37 ^{bcd}
S9	6.58±0.73 ^b	6.83±1.31 ^b	7.17±1.52 ^{ab}	7.42±0.79 ^{ab}	7.06±0.76 ^b
S10	7.17±1.49 ^b	7.17±1.40 ^b	6.33±1.46 ^{bc}	5.25±0.48 ^{de}	6.34±0.81 ^{bcd}
S11	7.00±1.38 ^b	6.83±1.03 ^b	5.92±1.06 ^{bc}	5.08±1.37 ^{de}	6.07±0.89 ^{cd}
S12	6.92±0.67 ^b	7.33±1.90 ^b	5.50±1.61 ^c	4.42±1.54 ^e	5.83±0.90 ^d

注：将未成型未做滋味评定的样品定为 0，同列上标字母不同代表差异具有统计学意义 ($p<0.05$)。

表 5 不同水浴复热处理样品的感官评价测定结果

Table 5 Sensory evaluation results of secondary reheating samples

样品编号	外观	组织状态	滋味	气味	整体感觉
Sa	8.58±0.53 ^{abc}	8.75±0.48 ^{ab}	8.00±0.29 ^a	8.08±0.19 ^a	8.29±0.20 ^a
Sb	8.75±0.38 ^{ab}	8.83±0.37 ^{ab}	6.17±0.62 ^b	6.25±0.56 ^{bc}	7.24±0.42 ^b
Sc	9.25±0.25 ^a	9.00±0.29 ^a	5.83±0.99 ^b	6.25±1.03 ^{bc}	7.28±0.63 ^b
Sd	8.50±0.50 ^{bc}	8.42±0.45 ^{abc}	5.50±0.58 ^b	4.67±0.69 ^{de}	6.43±0.44 ^{cd}
Se	8.33±0.37 ^{bc}	8.17±0.37 ^{bc}	5.42±0.79 ^b	4.08±0.98 ^e	6.15±0.50 ^d
Sf	8.00±0.76 ^c	8.00±0.76 ^c	5.42±0.79 ^b	3.42±1.13 ^e	5.85±0.65 ^d
Sg	8.75±0.38 ^{ab}	8.75±0.25 ^{ab}	5.58±0.98 ^b	7.17±0.85 ^{ab}	7.33±0.27 ^b
Sh	8.75±0.38 ^{ab}	8.58±0.45 ^{abc}	5.17±1.34 ^b	6.75±0.69 ^{bc}	7.04±0.56 ^{bc}
Si	8.58±0.34 ^{abc}	8.75±0.38 ^{ab}	5.75±0.75 ^b	5.75±0.69 ^{cd}	6.92±0.42 ^{bc}
Sj	8.58±0.45 ^{abc}	8.58±0.34 ^{abc}	5.50±0.71 ^b	4.58±1.02 ^{de}	6.46±0.52 ^{cd}
Sk	8.33±0.55 ^{bc}	8.33±0.80 ^{abc}	5.42±0.61 ^b	4.17±1.37 ^e	6.21±0.58 ^d

注：同列上标字母不同代表差异具有统计学意义 ($p<0.05$)。

从表 5 可以看出，较对照组而言，经过不同水浴复热温度和时间的鱼糜凝胶样品的凝胶组织结构变化并不显著；其滋味特性评分呈现显著性下降 ($p<0.05$)，且经过 70℃及以上温度复热的样品滋味特性评分变化不明显且达到最低；其气味特性评分总体也呈现显著性下降 ($p<0.05$)，且复热温度越高、时间越长，气味特性评分越低。综上可知，气味特征是区分不同复热方式处理的鱼糜凝胶样品的重要特征。

将感官评价描述与气味特征打分结合在一起做出图 1 的趋势图。由图 1a 可知在二段式中第二段水浴加热温度达到 85℃，时间达到 30 min 的样品即开始形成完整的凝胶网络结构，有鱼肠特征香味产生，温度为 90℃，时间 30 min 时鱼糜凝胶样品鱼肠香味最为宜人，一旦水浴加热温度达到 100℃，时间 30 min 时样品则开始有轻微过熟味产生；当二段式中第二段水浴加热时间过短时，即少于 15 min，鱼糜凝胶网络结构形成不完整，此时样品的不良气味更多偏鱼糜的生腥味，只有水浴加热时间达到 35 min 以上时，样品产生的不良风味开始偏向于“蒸煮味”、“纸板味”即 WOF。此外，随着水浴复热温度的升高，时间的加长，鱼糜凝胶样品将产生不良气味，此时的不良气味只是明显的 WOF。由此可见，通常在二段式第二段水浴加热时，鱼糜凝胶样品有从鱼腥味到宜人的鱼香味再过渡到类似“油脂酸败”的 WOF 的全过程风味变化趋势，在 100℃水浴水浴加热 30 min 便开始产生 WOF，在 90℃时时间达 35~40 min 时 WOF 较明显。而由图 1b 可知，在水浴复热时，80℃加热 30 min，90℃

复热时间达到 10 min，鱼糜凝胶样品便开始产生 WOF 且愈来愈浓郁。

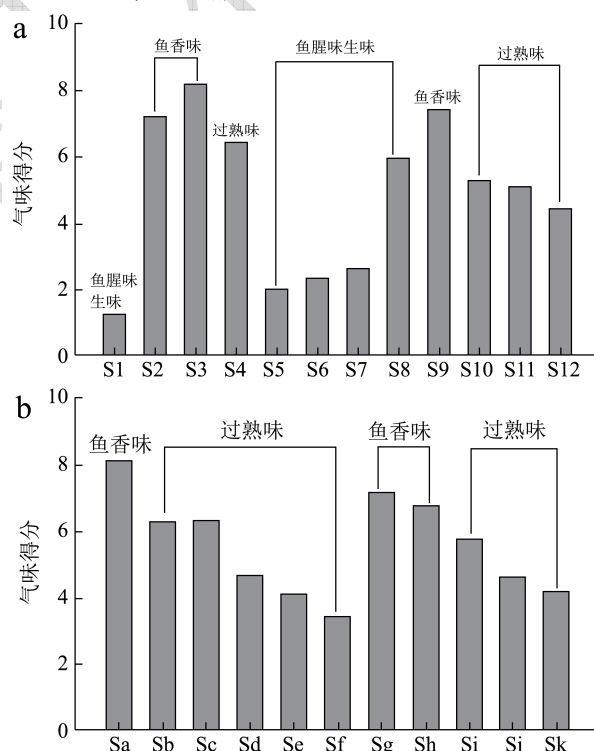


图 1 不同水浴加热方式处理样品的气味特征感官评价图

Fig.1 Sensory evaluation of odor characteristics of samples in different water-bath heating methods

2.2 电子鼻分析

经过不同二段式水浴加热温度和时间处理的样品对传感器的响应雷达图如图 2 (a、b) 所示，经过不同二段式水浴加热方式处理的样品风味轮廓相似，说明不同样品间主体气味特征变化不大，

其响应值存在显著差异 ($p<0.05$), 说明挥发性物质含量有所变化。雷达图中主要涉及六个传感器 P10/1 (烃类)、P10/2 (氮氯化合物、酸类)、PA/2 (酮类、醇类、氨水、胺类化合物、含硫化物)、P30/1 (氨类、醇类)、P40/2 (硫化氢、氯、氟化物)、P30/2 (醇类、醛类、硫化氢) 响应值的变化。如图 2 (a、b) 所示, 在 P10/2、PA/2、P30/1 传感器上随温度升高、时间加长先急剧变大后趋于稳定, 说明在一次复热过程中, 鱼肠的醛类、酮类、醇类胺类化合物的种类和数量增加。结合感官评价结果, 鱼糜凝胶样品的 WOF 更多的是醛类、酮类、醇类胺类化合物含量增多导致的。

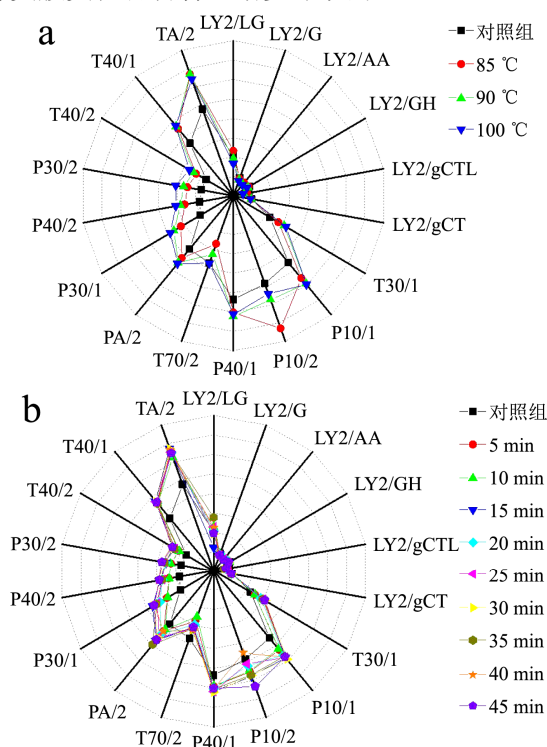


图 2 不同二段式水浴加热方式制备样品电子鼻雷达图

Fig.2 Radars chats of samples prepared with different two-step water-bath heating methods

Fisher 判别方法是根据方差分析的思想建立起来的一种能较好区分各个总体的线性判别法。由图 3 (a、b) 可知, 第一判别函数 (LDA1) 和第二判别函数 (LDA2) 的累积贡献率分别为 99.7% 和 92.4%, 不同样品在 LDA 图中的分布呈现明显的变化趋势, 可以达到区分对照组及经不同二段式水浴加热方式处理的鱼糜凝胶样品目的。在图 3a 中, 对照组与所有处理组均能分开, 说明不同二段式水浴加热中第二段加热温度会导致鱼糜凝胶样品气味特征产生变化; 在图 3b 中, 对照组与所有处理组均能分开, 不同二段式水浴加热中第二

段加热时间也会导致鱼糜凝胶样品气味特征产生变化, 并且随着不同二段式水浴加热中第二段加热时间加长, 样品越来越远离对照组, 并且 5、10、15 min 组接近, 20、25、30、35 min 组接近, 40、45 min 组接近, 说明随着第二段加热时间加长, 样品挥发性气味种类和含量呈单向变化, 且变化存在区段性。结合雷达图和感官评价, 随着第二段加热温度升高, 时间加长, 鱼糜凝胶样品风味发生阶段性变化。在第二段加热温度时间低于 15 min 时样品会有不良风味为鱼糜凝胶形成不完整时的生腥味; 达到一定值 (90 °C, 30 min) 时会有典型鱼糜凝胶特性宜人香味; 但温度一旦高达 100 °C 加热 30 min, 90 °C 时间长达 40 min 时, 鱼糜凝胶样品 WOF 特征明显。

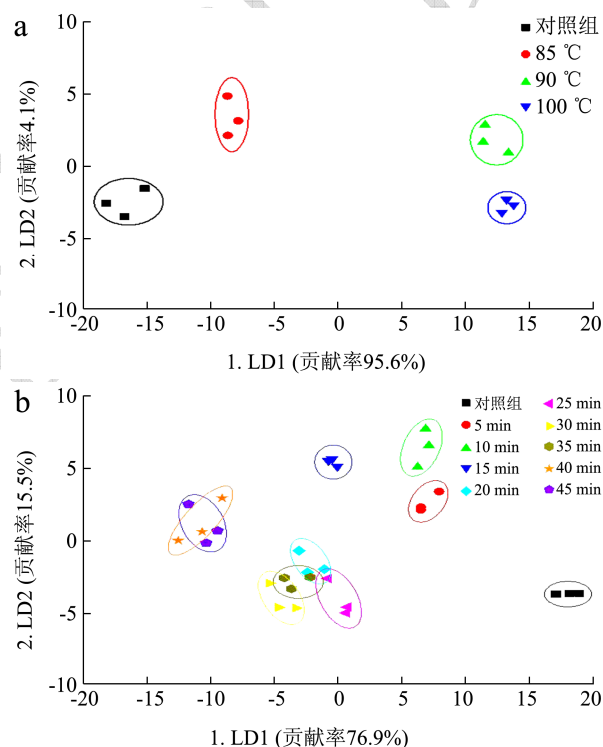
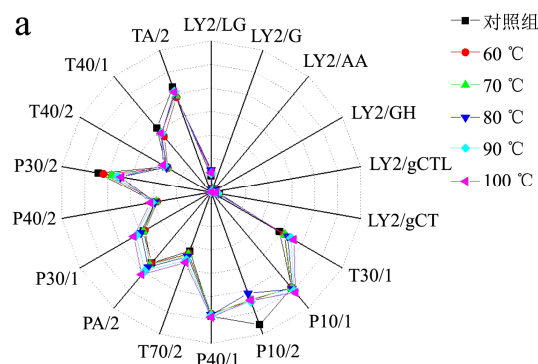


图 3 不同二段式水浴加热方式制备样品 LDA 分析图

Fig.3 Linear discriminant analysis for samples prepared with different two-step water-bath heating methods



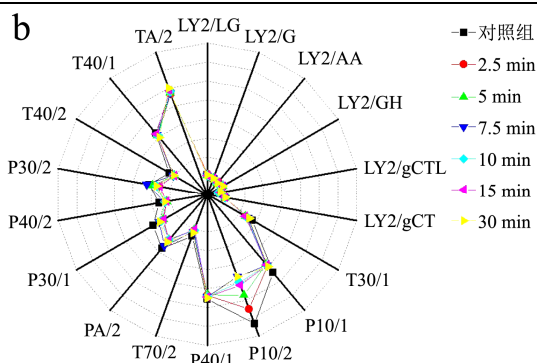


图4 不同水浴复热方式处理样品电子鼻雷达图

Fig.4 Radars charts of samples treated with different water-bath reheating methods

经过不同水浴复热温度和时间处理的样品对传感器的响应雷达图如图4(a、b)所示,经过不同水浴复热方式处理的样品风味轮廓更为相似,说明不同样品间主体气味特征变化较小,但仍在P10/2、PA/2、P30/1传感器上响应值有所增大,说明在水浴复热过程中,仍是鱼糜凝胶的醛类、酮类、醇类胺类化合物的种类和数量增加。以上结果与感官评价结果一致。

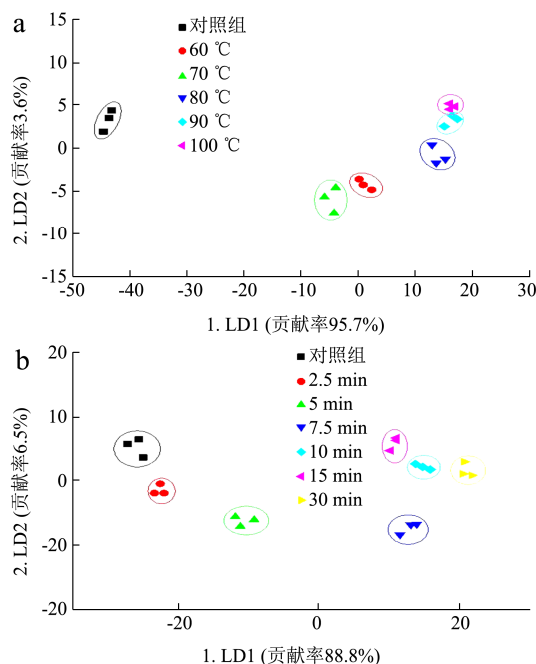


图5 不同水浴复热方式处理样品 LDA 分析图

Fig.5 Linear discriminant analysis for samples treated with different water-bath reheating methods

由图5(a、b)可知,第一判别函数(LDA1)和第二判别函数(LDA2)的累积贡献率分别为99.3%和95.2%,不同样品在LDA图中的分布呈现明显的变化趋势,可以达到区分对照组及经不同水浴复热方式处理的鱼糜凝胶样品目的。在图5a中,对照组与所有水浴复热组均能分开,说明不同水浴

复热温度会导致鱼糜凝胶样品气味特征产生变化;在图5b中,对照组与所有水浴复热组均能分开,不同水浴复热时间也会导致鱼糜凝胶样品气味特征产生变化。随着水浴复热温度升高和时间加长,鱼糜凝胶样品气味特征皆发生显著性变化,但一旦水浴复热温度高达80 °C复热30 min,90 °C复热时间长达10 min时,其后样品气味特征则变化不明显。结合雷达图和感官评价,随着水浴复热温度升高,时间加长,鱼糜凝胶样品则开始产生WOF,且水浴复热温度和时间到达一定值时WOF变化则不明显。

2.3 挥发性组分分析

基于SPME-GC-MS,鱼糜经40 °C加热1 h后,二段式水浴加热中第二段加热过程共鉴定出挥发性风味物质40种,其中醛类5种、酮类3种、醇类8种、酯类4种、酚类2种、酸类2种、烃类4种、其他化合物12种(表6)。经二段式水浴加热中第二段加热处理,鱼糜凝胶样品的醇类、醛类风味物质含量显著增加,风味物质总含量也显著增加,并且其醇类、醛类风味物质含量与复热温度和时间呈正相关,说明二段式加热中第二段加热是形成鱼糜凝胶过程,也是鱼糜凝胶风味形成过程,并且无明显的新的风味物质生产,进一步表明从生鱼糜的腥味到鱼肠的宜人香味风味再到鱼糜凝胶过熟味这一系列风味的改变依赖于主体风味物质含量的变化。鱼糜经40 °C加热1 h,第二段90 °C水浴加热30 min后,再经水浴复热阶段共鉴定出挥发性风味物质55种,其中醛类14种、酮类5种、醇类11种、酯类6种、酚类4种、酸类2种、烃类4种、其他化合物9种(表7)。经水浴复热处理,鱼糜凝胶样品的醇类、醛类风味物质含量先显著增加后趋于稳定,风味物质总含量也显著增加后趋于稳定,说明水浴复热鱼糜凝胶是一个简单的鱼糜凝胶劣化的过程,并且也无明显的新的风味物质生成,说明主体风味物质含量的变化是已成型的鱼糜凝胶制品在经过水浴复热逐渐产生WOF的内在表现。以上结果表明,推测鱼糜凝胶因二段式水浴加热方式和水浴复热方式(温度、时间)不同而产生WOF极有可能更多依赖于鱼肉主体风味物质各自的含量增加而不是风味物质种类变化造成。

结合相关风味物质阈值^[23,24],将表8和表9中将列出鱼糜凝胶中OVA值大于1的主要风味物质及其随复热方式不同的OAV变化。OAV值大于1,说明该物质可能对总体风味有直接影响;在一定范

围内,某中物质对总体风味贡献值与其 OAV 值呈正相关^[25]。由表 8 可以看出,二段式水浴加热中第二段加热鱼糜凝胶样品中己醛、1-戊烯-3-醇、异丙基苯、辛醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、(E)-2-辛烯-1-醇、苯乙酮对总体风味均有贡献,二段式水浴加热第二段温度达到 100℃,时间达到 40 min 的鱼糜凝胶中测得的辛醛、壬醛对其风味贡献较大(OAV 值存在 20 以上), (E)-2-辛烯-1-醇的 OAV 值也随第二段加热温度和时间呈上升状态,接近 10;水浴复热鱼糜凝胶样品中己醛、庚醛、辛醛、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、癸醛、(E)-2-壬烯醛、1-辛烯-3-醇、(E)-2-辛烯-1-醇、香叶基丙酮、苯乙烯对总体风味贡献较大,其中辛醛、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛对其风味贡献较大(OAV 值存在 20 以上),且(E)-2-辛烯-1-醇的 OAV 值也随水浴复热温度和时间呈上升状态,在水浴复热温度达到 80℃,时间 10 min,经此处理的鱼糜凝胶中的(E)-2-辛烯-1-醇的 OAV 值接近 10, (E)-2-壬烯醛也在此临界点突然生成。由此可见二段式加热制备方式和水浴复热方式的不同会极大地影响鱼糜凝胶的风味变化,并且辛醛、壬醛、(E)-2-辛烯-1-醇、(E)-2-壬烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛是鱼糜凝胶产生 WOF 时的主要风味物质,故其被视为鱼糜凝胶制品 WOF 的关键风味因子,多与脂质氧化降解有关^[26]。辛醛是油酸的氧化产物,推测与复热过程中样品温度不断升高加速脂质氧化有关^[27]。(E)-2-壬烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛则是亚油酸的氧化产物^[28]。

对经不同二段式加热方式制备和水浴复热方式处理的鱼糜凝胶中主要风味物质(OAV>1)进行主成分分析,得到风味成分载荷图及样品成分得分图。由图 7(a、b)可知,不同二段式水浴加热中第二段加热温度和时间鱼糜凝胶样品 PC1 和 PC2 贡献率分别为 99.79%和 97.24%,能够较好反映样品特征;各个样品组分别分布在不同的象限,说明二段式加热制备方式不同会导致鱼糜凝胶风味存在很大的差异性;且经过二段式水浴加热中第二段加热温度达 100℃加热 30 min, 90℃加热时间达 35~40 min 的鱼糜凝胶样品即有明显 WOF,即 S4、S10、S11、S12 为有 WOF 的样品,分别分布在图 7a 的第四象限、图 7b 的第一象限和第四象限,相对应的风味物质为己醛、(E)-2-辛烯-1-醇、辛醛、壬醛。由图 8(a、b)可知,不同水浴复热温度和时间鱼糜凝胶样品 PC1 和 PC2 贡献率分别为 93.03%和 95.73%,能够较好反映样品特征;各个样品组分别分布在不同的象限,说明水浴复热方式

不同同样会导致鱼糜凝胶风味存在很大的差异性;且经过水浴复热温度达 80℃复热 30 min, 90℃复热时间达 10 min 的鱼糜凝胶样品即有明显 WOF,即 Sd、Se、Sf、Sj、Sk 为有 WOF 的样品,分别分布在图 8a 的第一、四象限、图 8b 的第一象限,相对应的风味物质为己醛、(E)-2-辛烯-1-醇、辛醛、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛。即辛醛、壬醛、(E)-2-辛烯-1-醇、(E)-2-壬烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛是鱼糜凝胶制品在不同复热方式下的 WOF 关键风味。

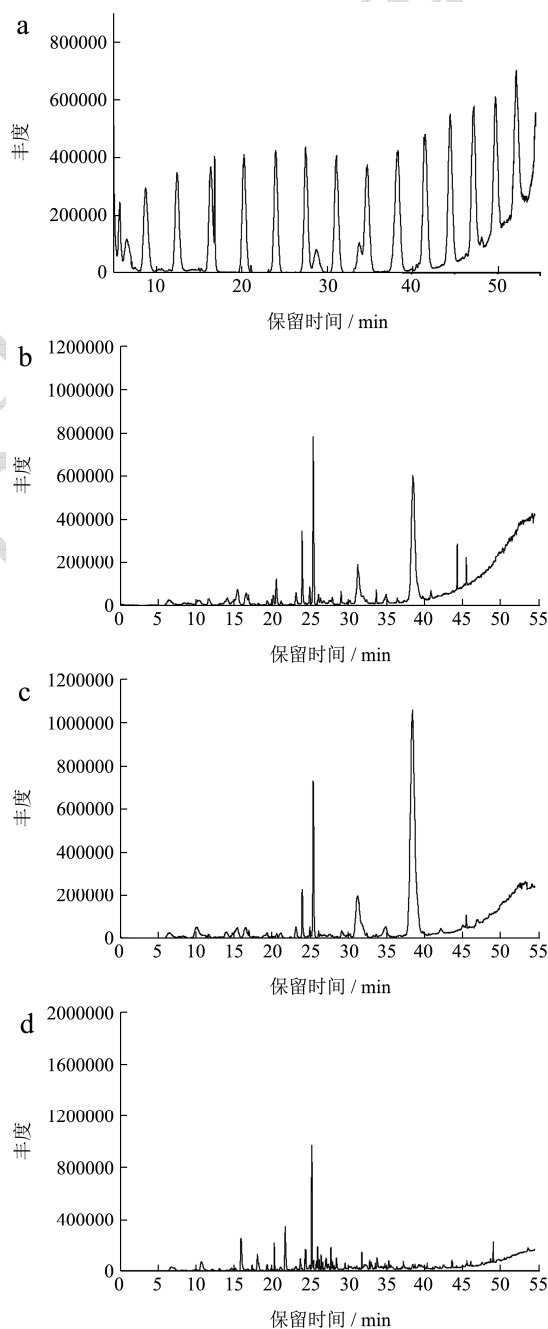


图 6 鱼糜凝胶样品挥发性物质 SPME-GC-MS 图谱
Fig.6 SPME-GC-MS chromatogram for the volatiles of surimi gel sample

表 6 不同二段式加热方式制备鱼糜凝胶挥发性风味成分 GC-MS 测定结果

Table 6 GC-MS analytical results of volatile compounds in surimi gels prepared with different two-step water-bath heating methods

分类	序号	保留指数	化学名	物质含量/(μg/kg)											
				对照组	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴
					(85±2) °C	(90±2) °C	(100±2) °C	(5±1) min	(10±1) min	(15±1) min	(20±1) min	(25±1) min	(35±1) min	(40±1) min	(45±1) min
醇类	1	1159	1-戊烯-3-醇	6.67	17.98	4.86	nd	11	19.72	29.39	10.5	4.12	4.32	4.14	4.31
	2	1450	1-辛烯-3-醇	137.34	282.73	306.45	387.06	214.09	211.1	198.03	268.51	321.17	500.47	722.61	722.18
	3	1557	1-辛醇	4.3	13.27	25.26	30.98	6.63	10.45	15.13	18.47	19.55	30.26	30.02	32.12
	4	1614	(E)-2-辛烯-1-醇	20.31	44.54	66.96	167.26	32.15	45.55	48.5	48.19	53.56	77.52	137.5	165.31
	5	1638	3-乙基-4-壬醇	4.69	7.98	11.98	12.43	9.35	10.72	11.19	10.3	12.34	10.38	13.94	15.39
	6	1906	苯乙醇	1.08	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	7	1966	1-十二烷醇	2.62	nd	16.32	15.31	9.31	8.95	10.25	nd	15.52	17.87	nd	23.25
	8	2121	2-苯氧基-乙醇	80.66	85.67	139.99	136.23	101.83	150.16	169.59	155.31	164.41	179.76	149.63	168.25
醛类	1	1083	己醛	2.44	3.94	9.84	22.83	6.41	7.03	7.83	8.44	10.76	14.08	22.89	24.22
	2	1289	辛醛	nd	2.21	11.98	16.52	7.86	6.25	4.65	6.91	6.24	13.2	16.82	17.56
	3	1391	壬醛	5.96	19.06	26.9	36.25	10.49	17.27	17.82	22.66	24.27	28.87	36.46	36.91
	4	1520	苯甲醛	31.14	32.48	92.47	33.98	33.14	40.91	85.39	89.43	85.27	91.16	97.2	98.43
	5	1705	3-乙基-苯甲醛	2.52	10.91	12.31	20.02	8.59	12.09	12.96	12.15	12.94	16.78	15.07	18.79
酮类	1	1196	1-庚烯-3-酮	0.68	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	1570	(E, E)-3,5-辛二烯-2-酮	17.71	23.6	44.72	42.18	25.29	27.18	37.73	45.07	44.08	44.2	45.6	47.32
	3	1647	苯乙酮	4.53	10.79	195.75	9.59	5.42	7.7	14.2	63.77	113.43	319.64	74.82	42.3
酯类	1	1008	甲基丙烯酸甲酯	nd	nd	157.13	nd	nd	nd	nd	nd	130.44	89.93	65.67	nd
	2	1306	正癸酸乙烯基酯	18.38	11.16	8.9	7.94	17.26	18.53	20.42	15.9	8.03	7.04	6.6	5.34
	3	1632	丁内酯	12	20.97	30.98	33.48	nd	14.87	24.04	28.2	28.28	30.22	41.75	45.56
	4	1817	乙二醇二甲丙烯酸酯	5.85	13.08	28.21	nd	6.42	nd	nd	nd	21.3	29.47	28.57	nd
酚类	1	2000	苯酚	4.15	8.49	14.92	19.41	9.03	9.2	10.34	10.46	13.8	20.61	18.22	25.67
	2	2318	2,4-二叔丁基苯酚	nd	16.64	37.34	33.33	7.18	16.81	29.5	32.59	37.84	44.63	44.73	43.77
酸类	1	2171	壬酸	nd	3.69	13.01	15.37	3.8	nd	9.8	8.01	8.55	16.92	17.67	16.05
	2	2498	十二酸	nd	nd	13.25	14.55	nd	nd	12.39	12.75	13.59	14.14	15.8	16.03
烯烃	1	1325	α-甲基苯乙烯	5.08	10.71	35.9	37.58	8.05	15.55	18.63	21.78	23.89	38.67	42.31	46.17
	2	1590	3,5,5-三甲基-2-己烯	68.08	166.73	179.04	239.22	95.55	105.19	161.72	168.54	162.77	191.85	221.73	226.13
	3	1817	茴香脑	1.49	13.08	19.16	nd	5.34	nd	11.97	13.75	14.98	18.37	19.8	19.9

转下页

接上页

其他	烷烃	1	1700	十七烷	0.96	28.09	113.18	124.06	23.59	62.84	61.63	49.13	50.13	125.19	121.36	101.41
		1	1129	乙苯	nd	nd	10.77	nd	nd	nd	nd	nd	6.55	nd	nd	nd
		2	1165	甲磺酸酐	nd	11.21	33.02	32.46	13.77	17.19	17.56	22.53	29.95	38.6	40.78	47.77
		3	1180	(1-甲基乙基)-苯	3.53	13.42	31.49	3.47	17.67	nd	54.25	117.82	104.73	28.93	22.7	18.05
		4	1573	[(甲基亚磺酰基)甲基]-苯	34.9	54.66	104.28	nd	62.97	124.72	106.14	117.82	109.85	124.48	132.15	132.67
		5	1587	1,1,3,3-四甲基脲	nd	nd	13.17	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		6	1730	甲氧基苯基脲	nd	33.43	32.08	134.31	nd	nd	nd	12.67	28.47	33.29	144.12	162.42
		7	1746	萘	3.61	12.49	5.62	7.28	5.03	4.18	6.51	5.58	5.29	6.54	5.74	11.35
		8	1757	N, N-二丁基甲酰胺	2.34	12.36	16.89	18.14	14.32	14.76	16.45	12.99	16.36	23.19	25.34	28.73
		9	1858	2-甲基-萘	3.61	6.06	9.41	9.69	5.03	6.35	6.51	5.58	6.45	9.43	11.49	11.35
		10	1955	1,2-苯并异噻唑	1.05	4.4	12.97	11.34	6.6	11.93	14.23	13.15	14.45	16.32	16.44	18.78
		11	2167	己内酰胺	93.4	108.13	356.97	362.52	102.33	166.66	232.85	251.93	295.2	366	366.19	389.21
		12	2445	吡啶	nd	6.41	20.34	20.3	7.77	9.27	10.59	11.93	15.81	21.74	23.86	26.64

注：“nd”表示未检出。

表 7 不同水浴复热方式处理鱼糜凝胶挥发性风味成分 GC-MS 测定结果

Table 7 GC-MS analytical results of volatile compounds in surimi gels treated with different water-bath reheating methods

分类	序号	保留指数	化学名	物质含量/(μg/kg)											
				对照组	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴	水浴
					(60±2) °C	(70±2) °C	(80±2) °C	(90±2) °C	(100±2) °C	(2.5±0.5) min	(5±0.5) min	(7.5±0.5) min	(10±0.5) min	(15±0.5) min	
醇类	1	1450	1-辛烯-3-醇	297.98	250.22	262.27	298.37	361.14	348.71	298.72	302.71	294.06	335.4	360.21	
	2	1491	异辛醇	106.42	32.80	45.34	63.51	56.16	77.85	99.61	56.29	61.18	54.56	49.29	
	3	1547	芳樟醇	nd	154.98	109.89	73.88	143.32	506.20	nd	42.54	117.18	16.34	366.65	
	4	1614	(E)-2-辛烯-1-醇	49.72	76.05	126.57	149.57	154.16	180.45	84.66	92.29	100.37	103.55	108.39	
	5	1652	2,4-二甲基-3-庚醇	16.59	17.53	17.94	21.45	26.8	24.84	18.31	18.80	19.13	24.7	26.07	
	6	1660	1-壬醇	14.14	nd	nd	37.85	21.72	32.78	20.02	nd	25.57	24.98	nd	
	7	1662	2,7-辛二烯-1-醇	269.82	207.99	nd	nd	372.95	383.56	283.54	297.66	312.64	352.85	357.66	
	8	1689	L-α-萜品醇	nd	51.44	42.4	40.65	50.16	200.84	13.42	19.27	26.02	34.3	42.12	
	9	1711	香茅醇	15.67	51.94	187.33	nd	27.86	147.13	nd	14.78	15.22	nd	5.62	
	10	1906	苯乙醇	5.24	5.24	13.80	18.23	nd	94.36	nd	nd	5.4	nd	nd	
	11	2121	2-苯氧基乙醇	13.19	16.74	11.18	16.79	nd	12.03	nd	nd	nd	nd	nd	

转下页

接上页

醛类	1	1083	己醛	nd	15.27	28.91	31.67	37.34	39.63	12.07	14.67	17.98	24.89	34.33
	2	1184	庚醛	nd	20.67	71.43	72.98	75.06	82.62	nd	13.01	13.97	55.16	65.87
	3	1190	己醛二甲基乙缩醛	46.91	nd	55.99	nd	nd	nd	nd	8.52	16.19	15.48	nd
	4	1240	(Z)-4-庚烯醛	8.09	9.55	12.14	13.39	7.61	19.53	9.58	8.66	7.07	9.71	10.92
	5	1289	辛醛	nd	26.02	41.36	46.48	49.94	63.08	10.14	31.14	34.14	38.67	37.17
	6	1391	壬醛	27.94	30.81	30.44	35.77	37.10	37.84	33.33	32.10	35.44	37.18	35.84
	7	1498	癸醛	7.25	9.90	13.98	14.85	19.03	21.20	13.35	15.25	15.87	17.28	17.05
	8	1514	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	17.00	16.39	16.87	16.68	20.26	20.21	18.27	18.43	18.96	18.59	20.04
	9	1520	苯甲醛	194.27	96.18	117.11	138.5	102.38	173.94	99.33	93.17	95.5	105.78	92.63
	10	1534	(E)-2-壬烯醛	nd	nd	12.66	23.97	68.69	70.74	nd	30.72	47.65	58.52	50.4
	11	1721	4-乙基-苯甲醛	37.31	34.65	44.61	48.8	35.12	69.49	nd	nd	33.63	34.30	36.1
	12	1790	3,4-二甲基-苯甲醛	nd	nd	nd	24.56	62.05	65.93	nd	8.99	8.87	11.26	15.28
	13	2011	4-甲氧基-苯甲醛	8.61	8.96	7.50	7.68	nd	39.44	6.61	5.25	3.45	nd	nd
	14	2089	铃兰醛	nd	27.94	31.77	140.4	22.73	278.7	nd	nd	46.54	nd	101.05
酮类	1	1302	3,6-二甲基哌嗪-2,5-二酮	36.20	37.87	nd	nd	46.06	13.50	39.50	32.16	43.74	34.69	43.82
	2	1338	6-甲基-5-庚烯-2-酮	53.07	59.47	63.84	68.07	74.55	94.57	63.9	67.58	74.87	82.83	52.45
	3	1570	(E, E)-3,5-辛二烯-2-酮	44.21	78.41	133.1	140.12	155.14	166.58	nd	65.01	84.98	70.92	92.80
	4	1647	苯乙酮	61.93	44.68	32.82	31.87	nd	29.08	38.63	20.79	22.05	25.18	18.53
	5	1841	(E)- 6,10 二甲基-5,9-十一碳二烯-2-酮	5.31	6.86	11.22	16.41	27.84	46.66	8.82	6.46	10.41	21.47	27.27
酯类	1	1628	邻乙基环己基乙酸酯 1	79.34	8.03	5.70	nd	16.6	nd	41.46	nd	36.58	19.36	13.13
	2	1670	α -甲基苄基乙酸酯	nd	37.56	27	23.89	nd	nd	nd	7.81	44.8	nd	109.2
	3	1717	乙酸苯甲酯	nd	54.41	15.91	19.56	nd	nd	nd	13.06	21.00	28.46	63.10
	4	1765	水杨酸甲酯	14.16	nd	nd	8.24	nd	6.44	nd	nd	4.07	nd	nd
	5	1767	α , α -二甲基苯乙醇乙酸酯	50.65	nd	13.36	79.21	nd	nd	44.89	31.25	19.14	nd	18.64
	6	1802	异丁酸-3-羟基-2,2,4-三甲基戊酯	311.78	29.17	23.18	20.73	nd	64.88	nd	nd	3.95	nd	nd
酚类	1	2000	苯酚	33.96	20.14	16.42	14.49	16.02	15.59	19.07	12.66	12.62	19.11	13.87
	2	2080	对甲酚	13.54	10.55	10.74	11.02	11.33	15.04	11.77	8.35	8.69	12.19	9.80
	3	2169	丁子香酚	74.11	76.36	82.71	81.11	78.67	95.08	78.4	73.48	76.08	79.55	88.60
	4	2318	2,4-二叔丁基苯酚	nd	nd	nd	109.53	106.27	460.74	89.1	33.34	55.25	103.87	66.84
酸类	1	2171	壬酸	7.49	17.30	nd	16.61	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	2498	十二酸	nd	13.48	nd	nd	nd	nd	nd	28.08	nd	nd	nd

转下页

接上页

烯烃	1	1250	D-柠檬烯	nd	94.41	102.93	123.27	86.82	609.78	nd	nd	66.33	70.47	85.61
	2	1261	苯乙烯	2839.22	1482.98	997.1	913.58	314.9	392.39	1128.95	886.07	733.35	704.73	366.22
烷烃	1	1400	十四烷	109.62	64.10	60.17	66.09	25.68	63.85	72.08	nd	129.05	74.63	34.94
	2	1700	十七烷	103.6	75.35	80.49	84.13	42.04	103.27	45.80	25.11	42.67	47.88	48.72
其他	1	1089	乙硫酰胺	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	6.09	nd	nd	nd
	2	1129	乙苯	318.44	196.82	150.71	93.38	57.46	62.90	118.8	63.27	31.63	40.50	48.54
	3	1140	对二甲苯	435.28	430.58	384.26	254.77	132.89	78.38	126.37	58.28	69.65	71.52	67.88
	4	1730	甲氧基苯基胍	304.15	166.90	222.66	227.15	789.18	nd	96.29	28.4	nd	35.32	nd
	5	1746	茶	89.29	60.92	64.38	64.79	65.18	87.22	88.03	91.16	91.21	85.11	86.85
	6	1757	N, N-二丁基甲酰胺	61.96	133.29	nd	116.69	nd	26.90	43.80	24.08	25.14	nd	30.79
	7	1858	2-甲基-茶	16.44	26.51	38.98	29.74	25.65	18.44	19.90	11.09	16.69	22.90	11.43
	8	1958	苯并噻唑	84.99	78.26	88.27	89.25	94.62	74.60	48.50	37.48	40.26	57.53	53.41
	9	2167	己内酰胺	76.90	65.01	65.25	55.54	76.08	44.90	42.30	53.35	64.39	91.82	62.01

注：“nd”表示未检出。

表 8 不同二段式水浴加热方式制备鱼糜凝胶挥发性风味物质 OAV

Table 8 OAV of volatile compounds in surimi gels prepared with different two-step water-bath heating methods

主体风味物质	气味描述	阈值/(μg/kg)	OAV 值											
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
己醛	青草味, 草腥味	4.5	0.50	0.90	2.20	5.10	1.40	1.60	1.70	1.90	2.40	3.10	5.10	5.40
1-戊烯-3-醇	辛辣味	4	1.70	4.50	1.20	0.00	2.80	4.90	7.30	2.60	1.00	1.10	1.00	1.10
异丙基苯	/	85	0.00	0.20	0.40	0.00	0.20	0.00	0.60	1.40	1.20	0.30	0.30	0.20
辛醛	油脂味, 辛辣味, 柑橘味	0.8	0.00	2.80	15.00	20.70	9.80	7.80	5.80	8.60	7.80	16.50	21.00	22.00
壬醛	油脂味, 青草味, 鱼腥味	1	6.00	19.10	26.90	36.30	10.50	17.30	17.80	22.70	24.30	28.90	36.50	36.90
1-辛烯-3-醇	土味, 蘑菇味, 鱼腥味	100	1.40	2.80	3.10	3.90	2.10	2.10	2.00	2.70	3.20	5.00	7.20	7.20
(E)-2-辛烯-1-醇	脂肪味、酸败味	20	1.00	2.20	3.30	8.40	1.60	2.30	2.40	2.40	2.70	3.90	6.90	8.30
苯乙酮	杏仁味, 坚果味	65	0.10	0.20	3.00	0.10	0.10	0.10	0.20	1.00	1.70	4.90	1.20	0.70

表 9 不同水浴复热方式处理鱼糜凝胶挥发性风味物质 OAV

Table 9 OAV of volatile compounds in surimi gels treated with different water-bath reheating times

主体风味物质	气味描述	阈值/($\mu\text{g/kg}$)	OAV 值										
			Sa	Sb	Sc	Sd	Se	Sf	Sg	Sh	Si	Sj	Sk
己醛	青草味, 草腥味	4.5	0.00	3.40	6.40	7.00	8.30	8.80	2.70	3.30	4.00	5.50	7.60
庚醛	鱼腥味	2.8	0.00	9.30	14.80	16.60	17.80	22.50	3.60	11.10	12.20	13.80	13.30
辛醛	青草香, 油脂, 腥味	0.8	0.00	32.50	51.70	58.10	62.40	78.90	12.70	38.90	42.70	48.30	46.50
壬醛	脂肪香, 青草香, 油脂, 鱼腥味	1	27.94	30.81	30.44	35.77	37.10	37.84	33.33	32.10	35.44	37.18	35.84
(E,Z)-2,6-壬二烯醛	黄瓜味, 油脂味, 蜡味, 青味	0.8	21.26	20.49	21.09	20.84	25.32	25.26	22.83	23.03	23.70	23.24	25.05
癸醛	青草味, 柑橘味	5	1.45	1.98	2.80	2.97	3.81	4.24	2.67	3.05	3.17	3.46	3.41
(E)-2-壬烯醛	青香, 脂肪气息	0.2	0.00	0.00	84.40	159.80	457.90	471.60	0.00	204.80	317.70	390.10	336.00
1-辛烯-3-醇	土味, 蘑菇味, 鱼腥味	100	3.00	2.50	2.60	3.00	3.60	3.50	3.00	3.00	2.90	3.40	3.60
(E)-2-辛烯-1-醇	脂肪味、酸败味	20	2.50	3.80	6.30	7.50	7.70	9.00	4.20	4.60	5.00	5.20	5.40
香叶基丙酮	脂肪味、青香、水果香	2	2.70	3.40	5.60	8.20	13.90	23.30	4.40	3.20	5.20	10.70	13.60
苯乙烯	芳香味	65	43.70	22.80	15.30	14.10	4.80	6.00	17.40	13.60	11.30	10.80	5.60

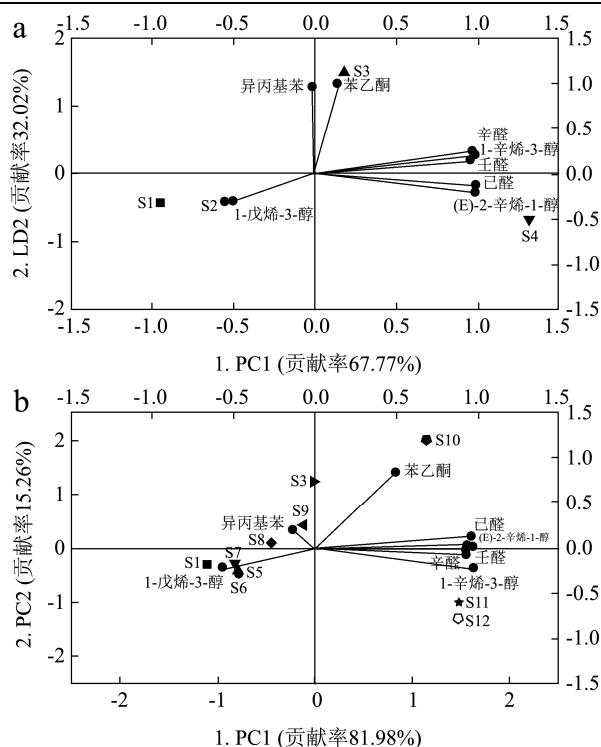


图7 不同二段式加热方式的鱼糜凝胶样品得分图及相关风味成分载荷图

Fig.7 Sample score chart and related flavor component loading chart of surimi gel with different two-step water-bath heating methods

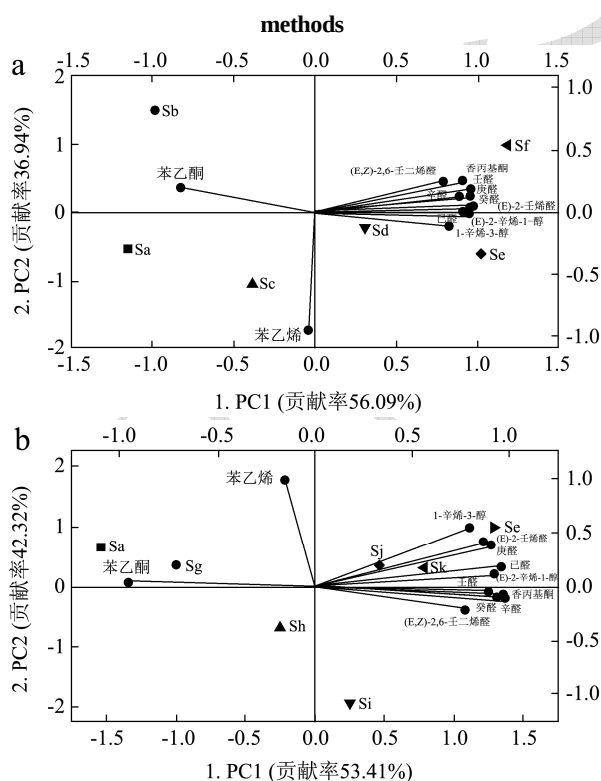


图8 不同水浴复热方式的鱼糜凝胶样品得分图及相关风味成分载荷图

Fig.8 Sample score chart and related flavor component loading chart of surimi gel with different water-bath reheating methods

3 结论

本实验室前期研究发现随着二段式水浴制备鱼糜凝胶条件不同,鱼糜凝胶会呈现不同风味特征,且温度过高和时间过长时,会有蒸煮过度的酸败气味;调查发现中国消费者习惯将制备好的鱼糜凝胶再加热后食用,且复热条件不同也会带来风味变化。本实验主要研究了不同二段式制备和不同水浴复热过程中对鱼糜凝胶 WOF 的影响情况。感官评价可以初步判断,二段式制备过程既是鱼糜凝胶的凝胶结构的形成过程也是其风味初步塑造过程,当温度达 100 ℃ 加热 30 min, 90 ℃ 加热时间达 35~40 min, 鱼糜凝胶的 WOF 则很明显,水浴复热过程是鱼糜凝胶的风味单一劣化过程,当温度达到 80 ℃ 复热 30 min, 90 ℃ 复热时间达 10 min, 鱼糜凝胶的 WOF 则很明显。电子鼻雷达图分析结果表明鱼糜凝胶经不同复热方式处理其气味轮廓相似,但 LDA 分析图显示,不同组样品风味也存在差异,且差异性结果与感官结果一致,即 WOF 极有可能是某类风味物质含量增加或减少造成的。GC-MS 测出鱼糜凝胶中共有 40~50 种挥发性化合物,主要以己醛、庚醛、辛醛、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、癸醛、(E)-2-壬烯醛、1-辛烯-3-醇、(E)-2-辛烯-1-醇、香叶基丙酮、苯乙烯、1-戊烯-3-醇、异丙基苯、苯乙酮等组分为主。GC-MS 结果结合 OAV 值进行主成分分析 (PCA) 可进一步得出己醛、(E)-2-辛烯-1-醇、辛醛、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛。即辛醛、壬醛、(E)-2-辛烯-1-醇、(E)-2-壬烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛极可能是鱼糜凝胶制品在不同复热方式下的 WOF 关键风味因子。本研究通过模拟与鱼糜凝胶制品相似的复热条件,探明其对鱼糜凝胶制品 WOF 关键风味因子生成的影响规律,为进一步研究鱼糜凝胶制品的 WOF 控制途径提供参考。

参考文献

- [1] 罗璨,姜泽东,胡阳,等.K-卡拉胶提取过程中碱处理时间对添加 K-卡拉胶的鱼糜性质影响[J].当代化工研究,2020,2: 135-138
- [2] LUO Can, JIANG Ze-dong, HU Yang, et al. The effect of alkali treatment time of k-carrageenan extraction on surimi properties [J]. Modern Chemical Research, 2020, 2: 135-138
- [3] Tims M J, Watts B M. Protection of cooked meats with phosphates [J]. Food Technology, 1958, 12: 240-243
- [4] Yang A, Brewster M J, Beilken S L, et al. Warmed-over flavor and lipid stability of beef: effects of prior nutrition [J]. Journal of Food Science, 2002, 67(9): 3309-3313

- [4] O'Sullivan M G, Byrne D V, Jensen M T, et al. A comparison of warmed-over flavour in pork by sensory analysis, GC/MS and the electronic nose [J]. *Meat Science*, 2003, 65(3): 1125-1138
- [5] Nissen L R, Byrne D V, Bertelsen G, et al. The antioxidative activity of plant extracts in cooked pork patties as evaluated by descriptive sensory profiling and chemical analysis [J]. *Meat Science*, 2004, 68(3): 485-495
- [6] Tikik K, Haugen J E, Andersen H J, et al. Monitoring of warmed over flavour in pork using electronic nose-correlation to sensory attributes and secondary lipid oxidation products [J]. *Meat Science*, 2008, 80(4): 1254-1263
- [7] Hallenstvedt E, Kjos N P, Rehnerberg A C, et al. Fish oil in feeds for entire male and female pigs: changes in muscle fatty acid composition and stability of sensory quality [J]. *Meat Science*, 2010, 85(1): 182-190
- [8] Lepper-Bililie A N, Berg E P, Buchanan D S, et al. Effectiveness of oxygen barrier oven bags in low temperature cooking on reduction of warmed-over flavor in beef roasts [J]. *Meat Science*, 2014, 96(3): 1361-1364
- [9] Kim S, Li J L, Lim N R, et al. Prediction of warmed-over flavour development in cooked chicken by colorimetric sensor array [J]. *Food Chemistry*, 2016, 211: 440-447
- [10] Pearson A M, GRAY J I. The Maillard Reaction in Foods and Nutrition [M]. Washington, DC: American Chemical Society, 1983: 215-287
- [11] 马文睿,赵建新,严青,等.可微波冷冻预油炸鸡肉的风味物质研究[J].食品工业科技,2009,30(11):118-121
MA Wen-rui, ZHAO Jian-xin, YAN Qing, et al. Changes of aroma profile during the manufacturing and cooking of microwavable pre-fried chicken [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2009, 30(11): 118-121
- [12] 臧明伍,张凯华,王守伟,等.基于 SPME-GC-O-MS 的清真酱牛肉加工过程中挥发性风味成分变化分析[J].食品科学, 2016,37(12):117-121
ZHANG Ming-wu, ZHANG Kai-hua, WANG Shou-wei, et al. Changes in volatile flavor components during the processing of islamic spiced beef analyzed by solid phase micro-extraction coupled with gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry (SPME-GC-O-MS) [J]. *Food Science*, 2016, 37(12): 117-121
- [13] 易宇文,刘阳,彭毅秦,等.东坡肘子风味电子鼻分析与感官评价相关性探究[J].食品与发酵工业,2018,44(1):238-244
YI Yu-wen, LIU Yang, PENG Yi-qin, et al. Research on the correlation between electronic nose analysis and sensory evaluation of Dongpo pork [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(1): 238-244
- [14] Lorenzo Cecchi, Marzia Migliorini, Elisa Giambanelli, et al. Authentication of the geographical origin of virgin olive oils from the main worldwide producing countries: a new combination of HS-SPME-GC-MS analysis of volatile compounds and chemometrics applied to 1217 samples [J]. *Food Control*, 2020, 112. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107156
- [15] Chen Q, Song J, Bi J, et al. Characterization of volatile profile from ten different varieties of Chinese jujubes by HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose [J]. *Food Res Int*, 2018, 105: 605-615
- [16] 王毅,徐艳群,徐坤,等.HS-SPME-GC-MS 技术分析不同加工阶段的甲鱼腥味成分变化[J].食品与发酵工业,2016,42(12):189-193
WANG Yi, XU Yan-qun, XU Kun, et al. The variation of fishy odor at the different processing stage of soft-shelled turtle by HS-SPME-GC-MS [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(12): 189-193
- [17] 周雪,黄勇,李学艳,等.HS-SPME-GC-MS 法测定地表水中典型嗅味物质[J].中国给水排水,2012,28(20):146-148
ZHOU Xue, HUANG Yong, LI Xue-yan, et al. Determination of typical odor compounds in surface water by HS-SPME-GC/MS [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(20): 146-148
- [18] 张凯华,臧明伍,张哲奇,等.不同复热方式对猪耳朵制品挥发性风味和脂肪氧化的影响[J].食品科学,2018,39(14):242-248
ZHANG Kai-hua, ZANG Ming-wu, ZHANG Zhe-qi, et al. Effect of reheating methods on volatile flavor constituents and lipid oxidation in cooked pig ear [J]. *Food Science*, 2018, 39(14): 242-248
- [19] 陈东清.草鱼片调理处理及其贮藏过程中的品质变化研究[D].武汉:华中农业大学,2015
CHEN Dong-qing. Study on the processing technology of prepared grass carp fillets and changes of quality during storage [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015
- [20] 刘敬科.鲢鱼风味特征及热历史对鲢鱼风味的影响[D].武汉:华中农业大学,2009
LIU Jin-ke. Flavor character of silver carp and the influence of haeting history on tic silver carp flavor [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009
- [21] 党连魁,张龙,周纷,等.蒸制中华绒螯蟹可食部位在冷藏过程中腥味变化分析[J].食品工业科技,2019,40(6):230-236

- DANG Lian-kui, ZHANG Long, ZHOU Fen, et al. Analysis of fishy odor variations in edible parts of steamed Chinese mitten crab during cold storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 230-236
- [22] 蒋平香,戴欣玮,王勤志,等.广式烧鸭不同加工阶段挥发性风味成分研究[J/OL].食品工业科技: 1-11[2020-06-04]
- JIANG Ping-xiang, DAI Xin-wei, WANG Qin-zhi, et al. Study on volatile flavor components of Dantonese roast duck in different processing stages [J]. Science and Technology of Food Industry, 1-11[2020-06-04]
- [23] 卢祺,刘津延,刘芳芳,等.鱼类腥味物质及脱腥技术研究进展[J].食品工业科技,2019,40(8):285-291
- LU Qi, LIU Jin-yan, LIU Fang-fang, et al. Research progress on fishy smell and technology of removing off-odor [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 285-291
- [24] 孙宝国,陈海涛.食用调香术[M].第 2 版.化学工业出版社, 2010:25-32
- SUN Bao-guo, CHEN Hai-tao. Flavoring [M]. Version 2. Chemical Industry Press, 2010: 25-32
- [25] 何聪聪,苏柯冉,刘梦雅,等.基于 AEDA 和 OAV 值确定西瓜汁香气化合物的比较[J].现代食品科技,2014,30(7):279-285
- HE Cong-cong, SU Ke-ran, LIU Meng-ya, et al. Identification of aroma-active compounds in watermelon juice by AEDA and OAV calculation [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(7): 279-285
- [26] 张凯华,臧明伍,张哲奇,等.水浴复热时间对猪肉糜制品挥发性风味的影响[J].食品科学,2018,40(2):186-191
- ZHANG Kai-hua, ZANG Ming-wu, ZHANG Zhe-qi, et al. Effects of water-bath reheating time on volatile compounds in cooked minced pork [J]. Food Science, 2018, 40(2): 186-191
- [27] 王强.香肠脂肪氧化动力学特性及温度对其影响研究[J].食品科学,2013,34(11):130-133
- WANG Qiang. Kinetic Characteristics of lipid oxidation in sausages as affected by temperature [J]. Food Science, 2013, 34(11): 130-133
- [28] 张然然,郝丽宁,单素兰,等.不同结果部位黄瓜果实芳香物质含量和成分及相关因素分析[J].农业生物技术学,2015, 23(8):1031-1039
- ZHANG Ran-ran, HAO Li-ning, SHAN Su-lan, et al. Analyzing the contents and components of volatile compounds with relevant factors in cucumber (*Cucumis sativus*) fruits of different location [J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2015, 23(8): 1031-1039

(上接第 224 页)

- [12] 高献礼.高盐稀态酱油在发酵和巴氏杀菌过程中风味物质形成和变化的研究[D].广州:华南理工大学,2010
- GAO Xian-li. Study on the formation and changes of flavor compounds in high-salt and diluted-state soy sauce during fermentation and pasteurization [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010
- [13] Kusumah D, Kabuyama Y, Maeda I. Promotion of fungal growth, antibacterial and antioxidative activities in Tempe produced with soybeans thermally treated using steam pressure [J]. Food Science and Technology Research, 2018, 24: 395-402
- [14] Ling M Y, Chou C C. Biochemical changes during the preparation of soy sauce koji with extruded and traditional raw materials [J]. International Journal of Food Science and Technology, 1996, 31: 511-517
- [15] Wani I A, Farooq G, Qadir N, et al. Physicochemical and rheological properties of Bengal gram (*Cicer arietinum* L.) starch as affected by high temperature short time extrusion [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 31: 850-857
- [16] 冯云子,崔春,高献礼,等.中式酱油与日式酱油非挥发性成分的比较[J].食品与发酵工业,2010,36:62-66
- FENG Yun-zi, CUI Chun, GAO Xian-li, et al. Comparative study on non-volatile components in traditional Chinese-type soy sauce and Japanese-type soy sauce [J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36: 62-66
- [17] Lioe H N, Selamat J, Yasuda M. Soy sauce and its umami taste: a link from the past to current situation [J]. Journal of Food Science, 2010, 75: R71-R76
- [18] Devanthi P V P, Linforth R, Onyeaka H, et al. Effects of co-inoculation and sequential inoculation of *Tetragenococcus halophilus* and *Zygosaccharomyces rouxii* on soy sauce fermentation [J]. Food Chemistry, 2018, 240: 1-8