

doi:10.12301/spxb202201052

文章编号:2095-6002(2024)02-0142-14

引用格式:王嘉楠,刘洋,李凯旋,等.炸鸡翅营养组分变化及关键香气成分分析[J].食品科学技术学报,2024,42(2):142-155.



WANG Jia'nan, LIU Yang, LI Kaixuan, et al. Analysis of changes in nutritional compositions and key aroma compounds in fried chicken wings[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(2): 142-155.

炸鸡翅营养组分变化及关键香气成分分析

王嘉楠, 刘洋, 李凯旋, 谢建春*

(北京工商大学轻工科学与工程学院, 北京 100048)

摘要:将鸡翅裹面并采用棕榈油炸,分析炸制前后鸡翅中脂肪酸和氨基酸组成变化及炸鸡翅的关键香气成分。研究发现,油炸后鸡翅肉中脂肪酸和氨基酸总含量均升高,尤其必需氨基酸与总氨基酸的比值及必需氨基酸与非必需氨基酸的比值达到了43.23%和76.16%,营养指标提高。以二氯甲烷为溶剂,采用溶剂辅助蒸发提取炸鸡翅样品中的挥发性风味物质,结合气相色谱-质谱分析鉴定出80种挥发性化合物,频率法气相色谱-嗅闻分析鉴定出51种风味物质是油炸鸡翅的气味活性化合物,GC-O检测的强势气味化合物(NIF $\geq$ 55%)为2,5-二甲基-吡嗪、己醛、3-甲硫基丙醛、3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪、2-甲基丁醛、(E)-2-壬烯醛、 γ -丁内酯等36种,对这些化合物计算OAV值,确定炸鸡翅关键香气化合物(OAV $\geq$ 1)25种,分别为2-甲基-3-呋喃硫醇、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫、(E,E)-2,4-癸二烯醛、2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪、1-辛烯-3-酮、(E)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、2-甲基丁醛、(E)-2-壬烯醛、3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪、3-甲硫基丙醛、糠醛、己醛、辛醛、二甲基二硫醚、壬醛、癸醛、苯乙醛、2-戊基呋喃、2-丁酮、2,5-二甲基-吡嗪、(E)-2-庚烯醛、2,3,5-三甲基-吡嗪、2-甲基-吡嗪、乙偶姻25种。希望研究结果可为鸡肉的烹饪加工和肉味香精的研制提供理论参考。

关键词:油炸鸡翅;香气成分;溶剂辅助蒸发;含硫化合物;脂肪酸;氨基酸**中图分类号:** TS251.5**文献标志码:** A

鸡肉因肉质细嫩、低胆固醇、低脂肪而深受大众喜爱。生肉没有香味,肉在烹饪加工过程中,主要组分脂肪酸和氨基酸发生变化,由此带来营养指标的变化,同时形成人们喜好的香味。例如,研究表明牛肉、猪肉、鸡肉烤制后饱和脂肪酸含量均增加,煮制后必需氨基酸含量均增加^[1]。早期研究人员采用气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)分析肉的挥发性风味组成,虽然鉴定出大量的醛类、酮类、醇类、酸类、酯类、烃类化合物^[2-5],但在被检测出的众多挥发性成分中,只有少

数具有香气活性的物质对总体香气有贡献,大多数挥发性物质对香气并没有贡献。

随着研究手段的丰富,气相色谱-嗅闻(gas chromatography-olfactometry, GC-O)分析成为筛选食品香气成分的有效方法。GC-O分析中常采用频率法、时间-强度法、芳香提取物稀释分析法(aroma extract dilution analysis, AEDA)进行检测^[6]。频率法是由多位评价员嗅闻分析同一样品,统计嗅闻的每种气味或化合物的频率;时间-强度法是随保留时间记录嗅闻的每种气味的强度;芳香提取物稀释

收稿日期:2022-11-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32372462);北京市自然科学基金面上项目(6172004)。

Foundation: National Natural Science Foundation of China (32372462); Beijing Natural Science Foundation(6172004)。

第一作者:王嘉楠,女,硕士研究生,研究方向为食品风味化学和热反应肉味香精。

*通信作者:谢建春,女,教授,博士,主要从事食品风味化学和香料香精领域的研究。

分析法是将提取物逐级稀释进行 GC-O 分析,化合物被嗅闻到的最高稀释倍数记为稀释因子。在3种检测方法中,化合物被检出的频率越高、强度越大或稀释因子越大,则表明其为气味强势化合物,并很有可能对食品的总体香气贡献大^[7-9]。对 GC-O 筛选出的气味强势化合物,计算其气味活性值(odor activity value, OAV)^[8],若化合物的 OAV ≥ 1 ,一般认为该化合物是关键香气成分。如 Cannon 等^[10]使用 GC-O 分析,在炸鸡腿中鉴定出噻吩甲醛类化合物。Fan 等^[8]通过 GC-O 分析结合 OAV 计算,得出乙偶姻、二甲基二硫醚、己醛、2-甲基-3-呋喃硫醇、庚醛、3-甲硫基丙醛等22种化合物为北京油鸡炖煮肉汤的关键香气化合物。油炸鸡翅为消费者非常喜爱的食品,虽然已有文献报道过油炸鸡翅的香气成分,但研究结果仍以 GC-MS 分析挥发性化合物为主^[11-12]。

本研究拟通过测定脂肪酸、氨基酸组成,评价鸡翅油炸前后营养指标变化;采用溶剂辅助蒸发(solvent-assisted flavor evaporation, SAFE)结合 GC-MS 和 GC-O,及计算 OAV 的方法,分析鉴定油炸鸡翅的关键香气成分。希望研究结果可为鸡肉的烹饪加工及鸡肉香精的研制提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鸡翅中(白羽鸡),北京华都肉鸡食品有限公司;棕榈超级液油,天津市聚龙粮油有限公司;面粉,北京特味浓生物技术开发有限公司。

C₅~C₂₉ 正构烷烃(色谱纯)、二氯甲烷(色谱纯)、无水硫酸钠(分析纯),国药集团北京化学试剂有限公司;13种脂肪酸甲酯标准品,上海安谱实验科技股份有限公司;17种氨基酸混合标准品、二甲基二硫醚(质量分数为95%,以下标准品括号内均为质量分数)、4-甲基噻唑(95%)、2-甲基-3-呋喃硫醇(98%)、3-甲硫基丙醛(98%)、2-乙酰基噻唑(95%)、苯并噻唑(99%)、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫(95%)、4-甲基-5-噻唑乙醇(98%)、2-甲基-吡嗪(95%)、2,5-二甲基-吡嗪(95%)、2-乙基-吡嗪(95%)、2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪(95%)、2-乙酰基-吡嗪(99%)、2-戊基呋喃(95%)、糠醛(98%)、麦芽酚(99%)、己醛(98%)、庚醛(98%)、辛醛(98%)、(E)-2-庚烯醛(95%)、(E,E)-2,4-庚二烯醛(98%)、癸醛(95%)、苯甲醛(98%)、(E)-2-壬烯醛

(98%)、苯乙醛(95%)、(E)-2-癸烯醛(98%)、(E,E)-2,4-壬二烯醛(98%)、(E)-2-十一烯醛(98%)、(E,E)-2,4-癸二烯醛(98%)、乙偶姻(95%)、1-辛烯-3-酮(95%)、苯甲醇(95%)、己酸(98%)、辛酸(98%)、壬酸(98%)、 γ -丁内酯(99%)、柠檬烯(95%)、N-(叔丁基二甲硅烷基)-N-甲基三氟乙酰胺,分析纯,北京百灵威科技有限公司;壬醛,分析纯,美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

SAFE 装置,莘县玻璃仪器有限公司;九阳电磁炉,杭州九阳生活电器有限公司;7890A-5975C 型气相色谱-质谱联用仪、7890A 型气相色谱仪,美国 Agilent 公司;气味嗅闻仪,美国 DATU Inc 公司;N-EVAP-12 型氮吹仪,美国 Organomation Associates 公司;KQ-500DE 型数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 油炸鸡翅的制备

鸡翅室温下缓慢解冻,清洗干净,均匀裹上面粉。锅中倒入适量棕榈油,控制油温 143~163℃,炸 15 min 取出,使用数字探头温度计测量肉的中心温度最高为 75℃。冷却,去除包裹的面层、鸡皮、骨和结缔组织,取鸡翅的肉进行分析。

1.3.2 脂肪酸组成分析

脂肪提取。取生鸡翅或炸制后鸡翅的肉,使用绞肉机搅碎。称取 6 g 加入 20 mL 二氯甲烷和甲醇的混合溶液[V(二氯甲烷):V(甲醇)=2:1],25℃超声提取 15 min,滤出提取液。重复以上提取操作 4 次,合并 4 次的提取液,旋转蒸发去除溶剂,得到脂肪样品。

脂肪酸衍生化。参考 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》测定脂肪酸组成。向脂肪样品中加入 2 mL 内标十三烷酸甲酯(5 mg/mL),加入 4 mL 异辛烷和 100 μ L 氢氧化钾-甲醇溶液(2 mol/L),猛烈振摇溶解。再加入 1 g 硫酸氢钠,猛烈振摇,静置,取上清液进行 GC-MS 分析。

GC-MS 分析条件。HP-5 型色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m),起始温度 100℃,保持 5 min;以 4℃/min 升至 300℃;载气 He,流速 1 mL/min;进样口温度 250℃,进样 1 μ L;分流比 20:1。电子轰击离子源,能量 70 eV,离子源温度 230℃,辅助加热线温度 250℃,四极杆温度 150℃,全扫描模式,扫描质量范围 30~450 u。

1.3.3 氨基酸组成分析

盐酸水解。取生鸡翅或炸制后鸡翅的肉,使用绞肉机搅碎。称取 0.5 g 加入耐压瓶中,加入 25 mL 6 mol/L 盐酸水溶液,加入内标 L-正缬氨酸 100 μL (质量浓度 1 mg/mL,溶于 0.1 mol/L HCl 水溶液),在 110 ℃ 下水解 24 h,过滤,取液体,用去离子水定容至 50 mL,即为氨基酸提取液。

氨基酸衍生化。参照文献[13]的方法进行氨基酸衍生。取 100 μL 氨基酸提取液,加入玻璃小瓶中,氮气吹干,加入 100 μL 乙腈和 100 μL *N*-(叔丁基二甲硅烷基)-*N*-甲基三氟乙酰胺混合均匀,加盖密封,在烘箱中 78 ℃ 下反应 35 min。冷却至室温,进行 GC-MS 分析。

GC-MS 分析条件。HP-5 型色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm),起始温度 80 ℃,保持 1 min;以 20 ℃/min 升到 140 ℃,再以 3.5 ℃/min 升到 290 ℃,保持 15 min;载气 He,流速 1.2 mL/min;进样口温度 280 ℃,进样量 1 μL;不分流。电子轰击离子源,能量 70 eV,离子源温度 230 ℃,四极杆温度为 150 ℃,辅助加热线温度 250 ℃,溶剂延迟 8 min,选择离子扫描模式检测,氨基酸定性定量分析的扫描离子见表 1。

表 1 气-质联机选择离子模式分析衍生化氨基酸的保留时间及扫描的特征离子

Tab.1 Retention times and scanned characteristic ions of amino acids after derivatization during GC-MS analysis in selected ions monitoring detection

氨基酸	保留时间/ min	特征离子(<i>m/z</i>)		
		定性离子	定量离子	
丙氨酸 Ala	8.139	232	260	158
甘氨酸 Gly	9.982	246	189	218
缬氨酸 Val	11.576	260	288	186
亮氨酸 Leu	12.938	274	302	200
异亮氨酸 Ile	13.638	302	274	200
脯氨酸 Pro	14.457	258	286	184
蛋氨酸 Met	19.298	292	272	218
丝氨酸 Ser	19.449	390	288	363
精氨酸 Arg	19.830	231	288	345
苏氨酸 Thr	20.815	404	376	303
苯丙氨酸 Phe	22.967	336	234	302
半胱氨酸 Cys	23.070	178	235	292
天冬氨酸 Asp	24.289	418	316	390
谷氨酸 Glu	27.134	432	358	330
赖氨酸 Lys	29.564	329	272	300
组氨酸 His	33.990	440	280	338
酪氨酸 Tyr	34.574	466	364	302
L-正缬氨酸	11.966	174	231	288
L-norvaline(内标)				

氨基酸含量计算方法。将氨基酸混合标准溶液使用 0.1 mol/L HCl 系列稀释后进行衍生、GC-MS 分析,纵坐标(*y*)为各氨基酸与内标的峰面积之比,横坐标(*x*, μg/mL)为各氨基酸的质量浓度,17 种氨基酸的标准曲线回归方程,见表 2。由表 2 可知,方程的相关系数 *R*² 均达到 0.99 以上,表明 17 种氨基酸标准曲线的线性关系良好。

表 2 17 种氨基酸的 GC-MS 标准曲线

Tab.2 Standard curves of 17 amino acids by GC-MS analysis

氨基酸	线性方程	<i>R</i> ²
丙氨酸 Ala	$y = 2.08 \times 10^{-2}x$	0.990 7
甘氨酸 Gly	$y = 15.32x$	0.999 0
缬氨酸 Val	$y = 3.20 \times 10^{-2}x$	0.999 0
亮氨酸 Leu	$y = 5.12x$	0.998 7
异亮氨酸 Ile	$y = 6.98x$	0.991 2
脯氨酸 Pro	$y = 15.14x$	0.999 6
蛋氨酸 Met	$y = 2.09 \times 10^{-2}x$	0.998 4
丝氨酸 Ser	$y = 2.77 \times 10^{-1}x$	0.998 1
苏氨酸 Thr	$y = 4.12x$	0.990 5
苯丙氨酸 Phe	$y = 8.11 \times 10^{-3}x$	0.992 1
天冬氨酸 Asp	$y = 2.88 \times 10^{-1}x$	0.999 0
谷氨酸 Glu	$y = 1.51x$	0.998 8
赖氨酸 Lys	$y = 1.81x$	0.990 6
组氨酸 His	$y = 1.09x$	0.992 4
酪氨酸 Tyr	$y = 1.73x$	0.994 9
精氨酸 Arg	$y = 2.40 \times 10^{-3}x$	0.997 3
半胱氨酸 Cys	$y = 9.19 \times 10^{-1}x$	0.999 0

1.3.4 关键香气成分分析

1.3.4.1 挥发性风味物质的提取

将炸鸡翅的肉切成 0.1 cm 见方小块。称取 165 g 置于 1 L 圆底烧瓶中,加入 1 μL 内标邻二氯苯的二氯甲烷溶液[*ρ*(邻二氯苯) = 1 mg/mL],均匀混合,分别用 450 mL 二氯甲烷萃取 3 次,合并萃取液,进行 SAFE 处理。

SAFE 装置的超级恒温水槽和蒸馏头夹层回流水温度为 35 ℃,采用液氮进行冷却,小心滴入样品,使整个过程保持系统内压力约为 1 × 10⁻⁵ Pa。收集蒸馏液,无水硫酸钠干燥,Vigreux 柱浓缩至 2 mL,再氮吹至 0.5 mL,待 GC-MS 和 GC-O 分析。

1.3.4.2 挥发性风味物质的气-质联机分析

气相条件:DB-Wax 色谱柱(30 m × 0.25 mm ×

0.25 μm),起始柱温 35 $^{\circ}\text{C}$,4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 120 $^{\circ}\text{C}$,然后 6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 200 $^{\circ}\text{C}$,再以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 220 $^{\circ}\text{C}$;溶剂延迟 4 min;载气为 He,流速 1 mL/min;进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$,进样 1 μL 。

质谱条件:电子轰击离子源,能量 70 eV,离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$,四极杆温度为 150 $^{\circ}\text{C}$,质量扫描范围 30~450 u,全扫描模式,辅助加热线温度 250 $^{\circ}\text{C}$ 。

按式(1)方法计算挥发性风味化合物含量,并以平均值 $\pm$ 标准差表示,取两个样品的均值。

$$m_i = \left(\frac{A_i}{A_0} \times m_0 \right) / m \quad (1)$$

式(1)中, m_i 为化合物的质量比,ng/g; A_i 为化合物的峰面积; A_0 为内标的峰面积; m_0 为内标的质量,ng; m 为所用炸鸡翅的肉的质量,g。

在相同 GC-MS 条件下进样 $\text{C}_5 \sim \text{C}_{29}$ 正构烷烃,按式(2)计算保留指数(retention index, RI)。

$$RI = 100 \times \left(n + \frac{t_i - t_n}{t_{n+1} - t_n} \right) \quad (2)$$

式(2)中, t_n 和 t_{n+1} 分别为碳数为 n 、 $n+1$ 正构烷烃的保留时间; t_i 是出峰在 n 和 $n+1$ 的正构烷之间的化合物的保留时间。

1.3.4.3 GC-O 分析香气活性成分

GC-O 分析装置由 7890A 型 GC 仪和气味嗅闻仪构成,色谱柱为 DB-WAX (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm),起始柱温 40 $^{\circ}\text{C}$,5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 230 $^{\circ}\text{C}$;载气为氮气,流速 1 mL/min,进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$,不分流模式,进样 1 μL 。

采用频率检测法。由 7 名成员组成评价小组,每人嗅闻 2 次,共嗅闻 14 次。每位评价员记录嗅闻的气味及保留时间。为避免嗅觉疲劳,每名成员的 2 次嗅闻保持一定的时间间隔。操作同 1.3.4.2 节,在相同条件下进样 $\text{C}_5 \sim \text{C}_{29}$ 正构烷烃,计算保留指数。嗅闻的频率表示为 NIF(nasal impact frequency)值^[14],NIF 值越大表示该化合物对样品整体香气贡献越大,NIF 值计算见式(3)。

$$NIF = \left(\frac{N_i}{n} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中, N_i 为某化合物被嗅闻到的总次数; n 为样品 GC-O 分析的总次数, $n=14$ 。

1.3.4.4 OAV 计算

OAV(odor activity value)是每种化合物的质量比(质量浓度)与其气味阈值之比。当 OAV 大于等于 1 时,认为该化合物是关键香气成分。OAV 的计

算公式见式(4)。

$$OAV = \frac{w_i}{OT_i} \quad (4)$$

式(4)中, w_i 是油炸鸡翅中挥发性风味化合物的质量比, OT_i 是该气味化合物水中的气味阈值。本研究中使用的气味化合物的阈值取自文献[15]。

1.4 数据处理

使用软件 Microsoft Excel 2016 进行数据分析和处理,以“平均值 $\pm$ 标准偏差”表示。GC-MS 分析通过检索 NIST 11 数据库、核对保留指数、进样标品鉴定化合物。GC-O 分析基于 GC-MS 分析结果、嗅闻的保留指数、气味特征及标准品鉴定化合物。

2 结果与分析

2.1 油炸前后脂肪酸组成变化

油炸过程中,油渗透到肉中的同时,也伴随着肉中汁水的流出,引起肉中脂肪含量的升高。本研究根据从生鸡翅和炸鸡翅肉中提取的脂肪样品质量,计算出生鸡翅肉中脂肪质量分数为 1.69% $\pm$ 0.04%,油炸后升高到 3.45% $\pm$ 0.17%。鸡翅油炸前后肉中的脂肪酸分析结果见表 3。

由表 3 可知,生鸡翅肉中主要脂肪酸是棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸,多不饱和脂肪酸占 35.34%,单不饱和脂肪酸占 28.21%,饱和脂肪酸占 36.44%。鸡肉的脂肪酸组成与鸡的品种有关^[16],本研究结果与 Fan 等^[8]分析白羽鸡胸肉和孔凡虎等^[17]分析白羽鸡腿肉的脂肪酸组成分析结果类似。由于油炸后肉的脂肪含量升高,造成油炸后鸡翅肉中的脂肪酸总量大幅增加^[18]。与本研究结果一致,Pawar 等^[19]将鸡肉裹粉油炸后肉的脂肪酸含量也上升,且油炸周期越长,脂肪酸含量增加幅度越大。

脂肪酸在人体中具有供能、储能、合成人体所需各种物质原料的作用。不饱和脂肪酸是人体不可缺少的营养物质,其中油酸和亚油酸具有调节血脂、降低胆固醇、抑制血栓形成等作用。Juarez 等^[20]采用橄榄油煎水牛肉、Ge 等^[1]采用菜籽油炸鸡腿肉,油炸后肉中不饱和脂肪酸的占比均明显升高。棕榈油有较好的油炸稳定性,是常用的工业油炸用油,本研究采用棕榈油作为油炸油,油炸后不饱和脂肪酸占比虽稍有增加,但增加较少,这可能与棕榈油中不饱和脂肪酸含量比橄榄油、菜籽油低有关。

2.2 油炸前后氨基酸组成变化

鸡翅油炸前后肉中的氨基酸组成分析结果见

表 3 鸡翅油炸前后肉中的脂肪酸分析结果

Tab.3 Analysis results of fatty acids in muscles of chicken wings before and after frying mg/g

w(脂肪酸)	生鸡翅	炸鸡翅
饱和脂肪酸(SFA)		
肉豆蔻酸(C _{14:0})	0.02 ± 0.00 ^a	0.05 ± 0.00 ^a
棕榈酸(C _{16:0})	2.20 ± 0.09 ^b	3.32 ± 0.02 ^a
硬脂酸(C _{18:0})	1.36 ± 0.02 ^b	2.07 ± 0.01 ^a
花生酸(C _{20:0})	0.02 ± 0.00 ^a	0.05 ± 0.00 ^a
山嵛酸(C _{22:0})	0.03 ± 0.00 ^b	0.52 ± 0.01 ^a
合计	3.63	6.01
单不饱和脂肪酸(MUFA)		
棕榈油酸(C _{16:1ω7})	0.21 ± 0.05 ^b	0.41 ± 0.00 ^a
油酸(C _{18:1ω9})	2.45 ± 0.23 ^b	4.31 ± 0.04 ^a
二十碳烯酸(C _{20:1ω11})	0.15 ± 0.01 ^a	0.10 ± 0.00 ^b
合计	2.81	4.82
多不饱和脂肪酸(PUFA)		
亚油酸(C _{18:2ω6})	2.25 ± 0.13 ^b	4.03 ± 0.09 ^a
花生三烯酸(C _{20:3ω6})	0.26 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^b
花生四烯酸(C _{20:4ω6})	0.74 ± 0.04 ^b	1.17 ± 0.01 ^a
二十二碳五烯酸(C _{22:5ω3})	0.19 ± 0.01 ^b	0.32 ± 0.01 ^a
二十二碳六烯酸(C _{22:6ω3})	0.08 ± 0.01 ^a	0.30 ± 0.22 ^a
合计	3.52	5.96
不饱和脂肪酸(UFA)合计	6.33	10.78
脂肪酸合计	9.96	16.79
SFA/%	36.44	35.80
UFA/%	63.55	64.20
MUFA/%	28.21	28.71
PUFA/%	35.34	35.50

不同字母表示同行数据差异显著($P < 0.05$)。

表 4。由表 4 可知,生的鸡翅肉中含量最多的氨基酸为谷氨酸,其次为亮氨酸、苯丙氨酸、天冬氨酸、精氨酸。鸡翅油炸后,多数氨基酸的含量升高,氨基酸总量(total amino acids,TAA)也升高,这主要与油炸过程失水使肉的蛋白质含量升高有关^[21]。Kim 等^[22]报道,经油炸后鸡翅中总氨基酸含量上升了 2.50 g/100 g,与本研究结果一致。表 4 中有的氨基酸(如半胱氨酸),在油炸后含量下降,这可能与油炸过程中该氨基酸随汁液流失或其发生降解反应有关^[23]。Wilkinson 等^[24]报道煮后猪肉的组氨酸和丙氨酸含量明显降低,是因组氨酸和丙氨酸存在于水溶性的小肽中,水溶性的肽在水煮时随汁液流失造

表 4 鸡翅油炸前后肉中的氨基酸组成分析结果

Tab.4 Analysis results of amino acid composition in muscles of chicken wings before and after frying g/100g

<i>w</i> (氨基酸)	生鸡翅	炸鸡翅	
必需氨基 酸(EAA)	苏氨酸 Thr	0.51 ± 0.00 ^b	0.81 ± 0.16 ^a
	缬氨酸 Val	0.15 ± 0.04 ^a	0.12 ± 0.03 ^a
	亮氨酸 Leu	2.14 ± 0.35 ^a	2.38 ± 0.39 ^a
	异亮氨酸 Ile	0.82 ± 0.13 ^a	0.91 ± 0.13 ^a
	苯丙氨酸 Phe	1.73 ± 0.42 ^b	2.45 ± 0.20 ^a
	赖氨酸 Lys	1.09 ± 0.14 ^b	1.28 ± 0.17 ^a
	蛋氨酸 Met	0.02 ± 0.00 ^b	0.07 ± 0.00 ^a
	合计	6.46	8.02
非必需氨 基酸 (NEAA)	谷氨酸 Glu	3.31 ± 0.41 ^a	3.73 ± 0.48 ^a
	天冬氨酸 Asp	1.61 ± 0.23 ^a	1.85 ± 0.25 ^a
	丝氨酸 Ser	0.30 ± 0.03 ^b	0.40 ± 0.04 ^a
	脯氨酸 Pro	0.55 ± 0.08 ^b	0.70 ± 0.11 ^a
	甘氨酸 Gly	0.45 ± 0.00 ^a	0.44 ± 0.09 ^a
	丙氨酸 Ala	1.28 ± 0.22 ^a	1.24 ± 0.16 ^a
	酪氨酸 Tyr	0.11 ± 0.02 ^b	0.16 ± 0.04 ^a
	组氨酸 His	0.60 ± 0.07 ^b	0.81 ± 0.08 ^a
	精氨酸 Arg	1.44 ± 0.58 ^a	1.18 ± 0.26 ^a
	半胱氨酸 Cys	0.08 ± 0.04 ^a	0.02 ± 0.00 ^b
合计	9.73	10.53	
氨基酸总量(TAA)	16.19	18.55	
(EAA/TAA)/%	39.90	43.23	
(EAA/NEAA)/%	66.39	76.16	

不同小写字母表示同行数据差异显著($P < 0.05$)。

成。Ge 等^[1]报道油炸后鸡腿肉中各个氨基酸含量均降低,这可能与炸制过程中未包裹面粉,汁液流失多或肉吸油多造成肉的蛋白质含量下降,以及肉在油的高温下直接炸制时氨基酸发生降解程度高有关。

氨基酸具有维持人体正常新陈代谢、调节生理功能的作用,是人体第一营养要素。氨基酸的种类和含量是评价肉营养品质的指标之一,必需氨基酸(essential amino acids,EAA)为人体中必不可少而自身又不能合成的营养物质,必须从食物中补充;非必需氨基酸(non-essential amino acids,NEAA)可以在人体内合成,作为营养源不需要从外部补充。EAA 的比例、种类和数量对蛋白质的营养价值具有极大影响。表 4 中油炸后鸡翅的 EAA/TAA 和 EAA/NEAA 值显著增高($P < 0.05$),分别达到 43.23% 和 76.16%,高于 FAO/WHO 理想蛋白质推荐标准(40% 和 60%),表明本研究鸡翅油炸后营养指标得到提高。

2.3 挥发性风味物质分析结果

采用SAFE对油炸后鸡翅肉中的挥发性风味物质进行提取,GC-MS和GC-O分析结果见表5。根据表5结果绘制GC-MS和GC-O分析鉴定化合物的比较图,见图1。由表5可知,共鉴定出83种挥发性风味物质,其中GC-MS鉴定出80种,GC-O鉴定出51种,

包括含硫化合物、含氮杂环化合物、含氧杂环化合物、醛类、酮类、醇类、酸类、酯类、烷烃以及其他类。表5中GC-O鉴定出的少数化合物(2-甲基-3-呋喃硫醇等)GC-MS全扫描时未鉴定出(表5定性方法中未标MS),但通过提取离子可发现其存在,这是由于色谱分离时,这些化合物与其他化合物共流出造成的。

表5 溶剂辅助蒸发结合GC-MS及GC-O分析鉴定的油炸鸡翅挥发性风味化合物

Tab.5 Volatile flavor compounds in fried chicken wings identified by solvent-assisted flavor evaporation combined with GC-MS and GC-O analysis

化合物 编号	RI	化合物名称	w/(ng·g ⁻¹)	气味描述	NIF/%	定性方式
含硫化合物(8种)						
1	1 060	二甲基二硫醚 dimethyldisulfide	4.06 ± 0.56	肉香	57	MS, RI, odor, S
2	1 279	4-甲基噻唑 4-methylthiazole	8.02 ± 2.40	肉香	78	MS, RI, odor, S
3	1 363	2-甲基-3-呋喃硫醇 2-methyl-3-furanthiol	—	肉香	36	RI, odor, S
4	1 436	3-甲硫基丙醛 methional	17.50 ± 0.42	肉香、土豆香	93	MS, RI, odor, S
5	1 730	2-乙酰基噻唑 2-acetylthiazole	—	烤肉香	86	RI, odor, S
6	1 933	苯并噻唑 benzothiazole	2.93 ± 0.09	肉香	28	MS, RI, odor, S
7	2 165	双(2-甲基-3-呋喃基)二硫 bis(2-methyl-3-furyl) disulfide	—	酱香、肉香	71	RI, odor, S
8	2 291	4-甲基-5-噻唑乙醇 4-methyl-5-thiazoleethanol	1.96 ± 1.33	肉香	43	MS, RI, odor, S
小计			34.47			
含氮杂环化合物(16种)						
9	1 197	吡嗪 pyrazine	26.47 ± 2.16	烤肉香、坚果香	71	MS, RI, odor
10	1 251	2-甲基-吡嗪 2-methyl-pyrazine	80.52 ± 0.68	烤香、坚果香	57	MS, RI, odor, S
11	1 308	2,5-二甲基-吡嗪 2,5-dimethyl-pyrazine	30.34 ± 5.18	烤香	100	MS, RI, odor, S
12	1 319	2-乙基-吡嗪 2-ethyl-pyrazine	23.39 ± 0.55	咖啡、坚果香	57	MS, RI, odor, S
13	1 331	2,3-二甲基-吡嗪 2,3-dimethyl-pyrazine	16.99 ± 1.40	/	/	MS, RI
14	1 389	2,3,5-三甲基-吡嗪 2,3,5-trimethyl-pyrazine	32.53 ± 0.75	烤香、米香	57	MS, RI, odor
15	1 419	2-乙烯基-吡嗪 2-ethenyl-pyrazine	6.48 ± 0.68	烤坚果	57	MS, RI, odor
16	1 431	3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪 3-ethyl-2,5-dimethyl-pyrazine	17.78 ± 1.10	烤香	93	MS, RI, odor
17	1 446	2,6-二乙基-吡嗪 2,6-diethyl-pyrazine	23.23 ± 2.50	烤肉香	43	MS, RI, odor
18	1 458	2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪 2-ethyl-3,5-dimethyl-pyrazine	16.05 ± 0.46	烤香	71	MS, RI, odor, S
19	1 470	2-乙烯基-6-甲基-吡嗪 2-ethenyl-6-methyl-pyrazine	3.82 ± 1.16	/	/	MS, RI
20	1 600	2-乙酰基-吡嗪 2-acetylpyrazine	4.32 ± 0.45	烤香、米香	43	MS, RI, odor, S
21	1 778	1-甲基-2-哌啶酮 1-methyl-2-piperidinone	1.16 ± 0.99	/	/	MS, RI
22	1 882	1-甲基-2,5-吡咯二酮 1-methyl-2,5-pyrrolidinedione	2.78 ± 0.10	/	/	MS, RI
23	2 018	2-吡咯酮 2-pyrrolidinone	13.99 ± 4.34	/	/	MS, RI
24	2 096	2-哌啶酮 2-piperidinone	11.16 ± 2.63	臭味	71	MS, RI, odor
小计			311.01			
含氧杂环化合物(4种)						
25	1 277	2-戊基呋喃 2-pentyl-furan	10.32 ± 0.27	脂肪香	64	MS, RI, odor, S

续表 5

化合物 编号	RI	化合物名称	$w/(\text{ng}\cdot\text{g}^{-1})$	气味描述	NIF/%	定性方式
26	1 444	糠醛 furfural	28.04 ± 0.16	坚果香	71	MS, RI, odor, S
27	1 647	糠醇 2-furanmethanol	18.58 ± 3.04	/	/	MS, RI
28	1 936	麦芽酚 maltol	126.90 ± 1.56	焦糖香	78	MS, RI, odor, S
		小计	183.84			
		醛类(19 种)				
29	862	2-甲基丙醛 2-methylpropanal	58.95 ± 0.08	奶油香、烤香	43	MS, RI, odor
30	928	2-甲基丁醛 2-methylbutanal	127.91 ± 0.00	烤甜香	93	MS, RI, odor
31	998	戊醛 pentanal	83.87 ± 0.00	/	/	MS, RI
32	1 076	己醛 hexanal	233.57 ± 0.16	青香	100	MS, RI, odor, S
33	1 174	庚醛 heptanal	15.98 ± 0.58	脂肪香	28	MS, RI, odor, S
34	1 185	3-甲基-2-丁烯醛 3-methyl-2-butenal	1.57 ± 0.22	苦杏仁味	50	MS, RI, odor
35	1 264	辛醛 octanal	25.25 ± 0.29	青香、花果香	78	MS, RI, odor, S
36	1 309	(<i>E</i>)-2-庚烯醛(<i>E</i>)-2-heptenal	19.45 ± 2.10	脂肪香	64	MS, RI, odor, S
37	1 382	壬醛 nonanal	86.08 ± 4.91	脂肪香	57	MS, RI, odor, S
38	1 476	(<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛(<i>E,E</i>)-2,4-heptadienal	3.31 ± 0.03	青香	78	MS, RI, odor, S
39	1 486	癸醛 decanal	11.71 ± 0.39	脂肪香	78	MS, RI odor, S
40	1 497	苯甲醛 benzaldehyde	43.05 ± 0.11	苦杏仁味	71	MS, RI, odor, S
41	1 520	(<i>E</i>)-2-壬烯醛(<i>E</i>)-2-nonenal	11.35 ± 0.93	黄瓜味、青香	93	MS, RI, odor, S
42	1 613	苯乙醛 benzeneacetaldehyde	45.14 ± 0.12	玫瑰花	86	MS, RI, odor, S
43	1 623	(<i>E</i>)-2-癸烯醛(<i>E</i>)-2-decenal	93.48 ± 3.92	臭虫味	78	MS, RI, odor, S
44	1 678	(<i>E,E</i>)-2,4-壬二烯醛(<i>E,E</i>)-2,4-nonadienal	7.95 ± 0.11	脂肪香	57	MS, RI, odor, S
45	1 731	2-十一烯醛 2-undecenal	78.54 ± 2.42	脂肪香	28	MS, RI, odor, S
46	1 749	(<i>E,E</i>)-2,4-癸二烯醛(<i>E,E</i>)-2,4-decadienal	220.50 ± 4.10	油炸香	93	MS, RI, odor, S
47	2 337	十八醛 octadecanal	8.77 ± 0.56	/	/	MS, RI
		小计	1176.43			
		酮类(10 种)				
48	973	2-丁酮 2-butanone	161.74 ± 0.00	酸奶酪	71	MS,RI, odor
49	1 223	6-甲基-2-庚酮 6-methyl-2-heptanone	4.26 ± 0.04	/	/	MS, RI
50	1 257	乙偶姻 acetoin	53.06 ± 0.34	甜香	50	MS, RI, odor, S
51	1 261	2-辛酮 2-octanone	4.50 ± 0.37	/	/	MS, RI
52	1 288	1-辛烯-3-酮 1-octen-3-one	2.71 ± 0.05	蘑菇味	71	MS, RI, odor, S
53	1 341	3-辛烯-2-酮 3-octen-2-one	4.38 ± 0.28	/	/	MS, RI
54	1 378	2-壬酮 2-nonanone	3.22 ± 0.19	/	/	MS, RI
55	1 449	1-(乙酰氧基)-2-丙酮 1-acetyloxy-2-propanone	15.64 ± 0.09	/	/	MS, RI
56	1 482	2-癸酮 2-decanone	5.59 ± 0.42	/	/	MS, RI
57	1 585	2-十一酮 2-undecanone	3.92 ± 0.15	/	/	MS, RI
		小计	259.02			
		醇类(4 种)				
58	1 137	1-丁醇 1-butanol	11.74 ± 0.30	/	/	MS, RI
59	1 611	1,2-乙二醇 1,2-ethanediol	2.70 ± 0.19	/	/	MS, RI
60	1 859	苯甲醇 benzyl alcohol	14.01 ± 1.41	甜香	21	MS, RI, odor, S
61	2 391	1-十六醇 1-hexadecanol	17.00 ± 1.41	/	/	MS, RI

续表 5

化合物 编号	RI	化合物名称	<i>w</i> /(ng·g ⁻¹)	气味描述	NIF/%	定性方式
小计			45.45			
酸类(5 种)						
62	1 829	己酸 hexanoic acid	1.42 ±0.16	青香	57	MS, RI, odor, S
63	1 936	庚酸 heptanoic acid	6.51 ±1.00	青香	43	MS, RI, odor
64	2 044	辛酸 octanoic acid	9.57 ±2.13	汗味、酸臭	28	MS, RI, odor, S
65	2 151	壬酸 nonanoic acid	12.91 ±3.74	臭味	57	MS, RI, odor, S
66	2 686	十四酸 tetradecanoic acid	17.5 ±0.71	/	/	MS, RI
小计			47.91			
酯类(6 种)						
67	1 069	乙酸丁酯 acetic acid butyl ester	1.58 ±0.15	/	/	MS, RI
68	1 583	癸酸甲酯 decanoic acid methyl ester	43.39 ±1.41	/	/	MS, RI
69	1 601	γ-丁内酯 γ-butyrolactone	9.87 ±0.52	甜香	93	MS, RI, odor, S
70	1 678	γ-己内酯 γ-caprolactone	5.01 ±0.14	/	/	MS, RI
71	1 727	2(5 <i>H</i>)-呋喃酮 2(5 <i>H</i>)-furanone(γ-内酯)	2.77 ±0.06	烤香、甜香	86	MS, RI, odor
72	2 177	2 <i>H</i> -吡喃-2-酮 2 <i>H</i> -pyran-2-one(δ-内酯)	1.93 ±0.00	/	/	MS, RI
小计			64.55			
烷烃(5 种)						
73	1 199	十二烷 dodecane	24.10 ±0.78	/	/	MS, RI
74	1 398	十四烷 tetradecane	16.26 ±0.55	/	/	MS, RI
75	1 597	十六烷 hexadecane	12.22 ±1.07	/	/	MS, RI
76	2 099	二十一烷 heneicosane	39.49 ±2.03	/	/	MS, RI
77	2 399	二十四烷 tetracosane	99.28 ±5.98	/	/	MS, RI
小计			191.35			
其他类(6 种)						
78	1 115	乙苯 ethylbenzene	20.13 ±0.21	/	/	MS, RI
79	1 122	对二甲苯 p-xylene	20.81 ±0.27	/	/	MS, RI
80	1 170	间二甲苯 m-xylene	31.92 ±0.12	/	/	MS, RI
81	1 188	柠檬烯 limonene	3.33 ±0.08	柑橘香	50	MS, RI, odor, S
82	1 897	二丁基羟基甲苯 butylated hydroxytoluene	39.76 ±1.56	/	/	MS, RI
83	2 409	吲哚 indole	13.00 ±2.80	/	/	MS, RI
小计			128.95			
共计(83 种)			2 442.98			

* MS 为质谱鉴定,RI 为保留指数鉴定,odor 为嗅闻气味,S 为标准品鉴定;- 表示 GC-MS 全扫描未检测到;/表示 GC-O 未检测到。

含硫化合物是构成肉香味的典型化合物^[25],共鉴定出 8 种。其中 GC-MS 检测到 5 种,3-甲硫基丙醛的含量最高,4-甲基噻唑次之;GC-O 检测到 8 种,NIF 值高的为 3-甲硫基丙醛(93%)、2-乙酰基噻唑(86%)、4-甲基噻唑(78%)、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫(71%)。其中,3-甲硫基丙醛产生于蛋氨酸 Strecker 降解反应,2-乙酰基噻唑、4-甲基噻唑、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫来源于半胱氨酸与核糖的

美拉德反应^[26]。
Silva 等^[4]通过顶空固相微萃取法(headspace solid-phase microextraction,HS-SPME)结合 GC-MS 分析炸干腌后的鸡胸肉的挥发性化合物,及 Takakura 等^[26]通过 AEDA/GC-O 分析从鸡汤萃取物中均曾鉴定出 3-甲硫基丙醛。张宁等^[27]采用同时蒸馏萃取(simultaneous distillation and extraction,SDE)结合 GC-MS 在肯德基吮指原味鸡中也曾鉴定出 2-乙酰

基噻唑。Fan等^[8]采用AEDA/GC-O分析在北京油鸡炖煮肉汤中也曾鉴定出3-甲基硫基丙醛、2-乙酰基噻唑、4-甲基噻唑、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫等香气化合物,与本实验结果一致。

含氮杂环化合物具有烤香香气特征,共鉴定出16种,主要为吡嗪类化合物^[28]。其中GC-MS检测到16种,以2-甲基-吡嗪含量最高,其次为2,3,5-三甲基-吡嗪。美拉德反应中两分子 α -氨基酮类化合物发生缩合反应可形成吡嗪类化合物^[29]。GC-O检测到11种,NIF值高的为2,5-二甲基-吡嗪(100%)、3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪(93%)、吡嗪(71%)、2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪(71%)、2-哌啶酮(71%)、2-甲基-吡嗪(57%)、2-乙基-吡嗪(57%)、2,3,5-三甲基-吡嗪(57%)、2-乙基-吡嗪(57%)。Tang等^[2]采用GC-MS从炸鸡胸肉中鉴定出2-甲基-吡嗪、2,5-二甲基-吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪。Cao等^[5]采用HS-SPME/GC-MS在炸鸡肉中鉴定出了2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪等多个烷基吡嗪类化合物。另外,Silva等^[4]通过HS-SPME分析炸鸡胸肉、张宁等^[27]在肯德基吮指原味鸡(SDE分析法)中也鉴定出2-甲基-吡嗪。

含氧杂环化合物共鉴定出4种,其中GC-MS检测到4种,麦芽酚的含量最高,其次是糠醛;GC-O检测到3种,NIF值高的包括麦芽酚(78%)、糠醛(71%)、2-戊基呋喃(64%)。段艳等^[30]采用SAFE/GC-MS/GC-O频率法在德州扒鸡中曾分析鉴定出麦芽酚、2-戊基呋喃。采用HS-SPME/GC-MS,Cao等^[5]在炸鸡胸肉、Qi等^[31]在炖黄羽母鸡汤中曾鉴定出2-戊基呋喃。Chang等^[32]曾采用HS-SPME/GC-MS在糖熏三黄鸡的鸡胸肉以及鸡皮中检测到糠醛。2-戊基呋喃一般来源于亚油酸的氧化降解,糠醛可由美拉德反应中的戊糖脱水环化生成^[29]。

醛类化合物为鸡肉的主体香气物质^[28],共鉴定出19种。GC-MS检测到19种,含量最高的为己醛、其次为(*E,E*)-2,4-癸二烯醛。GC-O检测到17种,NIF值最高的为己醛(100%),其次为2-甲基丁醛(93%)、(*E*)-2-壬烯醛(93%)、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛(93%)、苯乙醛(86%)、辛醛(79%)、(*E,E*)-2,4-庚二烯醛(79%)、癸醛(79%)、(*E*)-2-癸烯醛(79%)、苯甲醛(71%)、(*E*)-2-庚烯醛(64%)。己醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛等脂肪醛和苯甲醛主要来源于脂质氧化反应,其中己醛和(*E*)-2-壬烯醛来源于亚油酸氧化降解,而2-甲基丁醛为支链醛,来源

于异亮氨酸的Strecker降解反应^[33]。Silva等^[4]采用GC-MS分析炸鸡干腌后的鸡胸肉时,检测出2-甲基丁醛、己醛、辛醛、(*E*)-2-庚烯醛、癸醛、苯甲醛、(*E*)-2-壬烯醛、苯乙醛和(*E,E*)-2,4-癸二烯醛等挥发性化合物。Apriyantono和Indrawaty^[34]SDE/GC-MS分析炸鸡胸肉(家鸡和肉鸡),鉴定出(*E,E*)-2,4-庚二烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、苯甲醛等醛类化合物。张逸君等^[12]、Duan等^[35]采用SAFE/GC-MS法分析道口烧鸡、德州烧鸡,鉴定出己醛、苯甲醛、(*E*)-2-癸烯醛、(*E*)-2-庚烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛等化合物。

酮类化合物共鉴定出10种,其中GC-MS检测到10种,2-丁酮含量最高,乙偶姻次之;GC-O检测到3种,2-丁酮、1-辛烯-3-酮的NIF值高,均为71%。其中2-丁酮在炸鸡胸肉^[2]、炖煮武定鸡肉^[36]中也曾分析鉴定出,乙偶姻曾在肯德基吮指原味鸡中GC-MS鉴定出^[27]。Gasior等^[37]通过SAFE/AEDA/GC-O分析烤白鹅腿、Brunton等^[38]通过SPME/AEDA/GC-O分析火鸡鸡胸肉,均检测出1-辛烯-3-酮,并确定其对特征香气的形成起关键作用。2-丁酮、1-辛烯-3-酮来源于脂质氧化反应,其中1-辛烯-3-酮由1-辛烯-3-醇氧化而来,而1-辛烯-3-醇可由n-3、n-6多不饱和脂肪酸的氧化降解产生^[39-40],乙偶姻主要来源于美拉德反应过程中的糖降解反应^[23]。

醇类物质共鉴定出4种,其中GC-MS检测到4种,1-十六醇含量最高,苯甲醇次之;GC-O仅检测到苯甲醇且NIF值较低(21%)。Apriyantono和Indrawaty^[34]通过SDE/GC-MS分析在炸鸡胸肉中也曾鉴定出1-十六醇。Ayseli等^[41]采用SDE/GC-MS法分析生鸡胸肉时曾鉴定出苯甲醇。

酸类共鉴定出5种,其中GC-MS检测到5种,十四烷酸含量最高,壬酸次之;GC-O检测到4种,NIF值高(57%)的为己酸、壬酸。Tang等^[2]在炸鸡胸肉中曾鉴定出己酸。Silva等^[4]采用GC-MS分析炸鸡干腌后的鸡胸肉时也曾鉴定出己酸、辛酸、壬酸等挥发性化合物。另外,在炖鸡腿^[42]和德州扒鸡^[30]中GC-MS检测也曾鉴定出己酸、壬酸、十四烷酸。

酯类共鉴定出6种化合物,GC-MS检测到6种,含量最高的为癸酸甲酯,其次为 γ -丁内酯;GC-O检测到2种,NIF值高的为 γ -丁内酯(93%)、2-(5*H*)-呋喃酮(86%)。Sun等^[42]采用GC-MS在炖鸡腿中曾鉴定出 γ -丁内酯。

烷烃类化合物共鉴定出5种,GC-MS检测到5

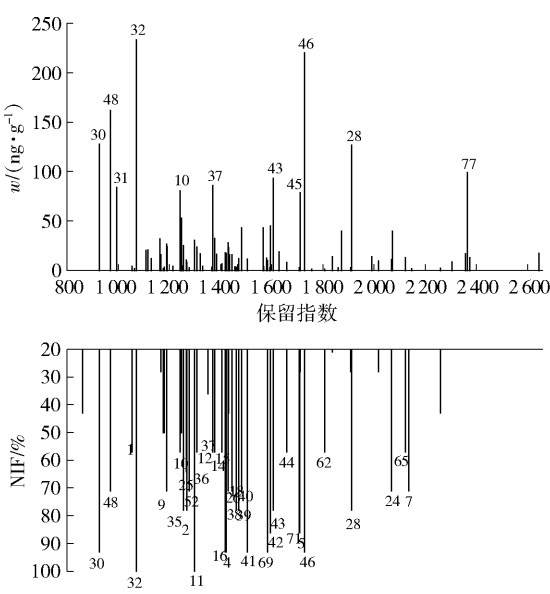
种;GC-O 未检测到,这是因为烃类化合物气味阈值高,对风味贡献不大。

上述的脂肪族醇、酸、酯、烃也均来源于脂质氧化降解反应。此外,还鉴定出其他类化合物 6 种,其中 GC-MS 检测到 6 种,二丁基羟基甲苯 (BHT) 含量最高;GC-O 仅检测到柠檬烯,NIF 值为 50%。二丁基羟基甲苯是食品中常用的抗氧化剂,在炸干腌鸡胸肉^[3] 中曾鉴定出。Cao 等^[5]、Sabikun 等^[43] 通过 GC-MS 在炸鸡块中曾检测出柠檬烯。

总之,本研究在炸鸡翅中检测到数量最多的化合物为醛类,其次为含氮杂环化合物,见图 1。GC-MS 检测到的含量高 (≥ 75 ng/g) 的化合物为己醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、2-丁酮、麦芽酚、2-甲基丁醛、(*E*)-2-癸烯醛、二十四烷、壬醛、戊醛、2-甲基-吡嗪、2-十一烯醛。GC-O 检测的频率高 (NIF $\geq 55\%$) 的化合物有 36 种,为 2,5-二甲基-吡嗪、己醛、2-甲基丁醛、3-甲硫基丙醛、3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪、(*E*)-2-壬烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、 γ -丁内酯、2-乙酰基噻唑、苯乙醛、2(5*H*)-呋喃酮、4-甲基噻唑、麦芽酚、辛醛、(*E,E*)-2,4-庚二烯醛、癸醛、(*E*)-2-癸烯醛、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫、吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪、2-哌啶酮、糠醛、苯甲醛、2-丁酮、1-辛烯-3-酮、2-戊基呋喃、(*E*)-2-庚烯醛、二甲基二硫醚、2-甲基-吡嗪、2-乙基-吡嗪、2,3,5-三甲基-吡嗪、壬醛、(*E,E*)-2,4-壬二烯醛、2-乙基-吡嗪、己酸、壬酸,这些化合物被认为是 GC-O 检测到的气味较为强势化合物。

2.4 关键香气成分分析结果

对于 GC-O 检测到的油炸鸡翅中的气味强势化合物,根据 GC-MS 检测含量及文献报道的水中气味阈值,计算 OAV 值。由于表 5 中的化合物含量为 GC-MS 半定量分析结果,因此计算的 OAV 为粗略数据,结果见表 6。表 6 列出了计算出的 OAV ≥ 1 的香气化合物,共 25 种,包括二甲基二硫醚、2-甲基-3-呋喃硫醇、3-甲硫基丙醛、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫、2-甲基-吡嗪、2,5-二甲基-吡嗪、2,3,5-三甲基-吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪、2-戊基呋喃、糠醛、2-甲基丁醛、己醛、辛醛、(*E*)-2-庚烯醛、壬醛、癸醛、(*E*)-2-壬烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、苯乙醛、(*E,E*)-2,4-壬二烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、2-丁酮、乙偶姻、1-辛烯-3-酮,确定为炸鸡翅的关键香气化合物。这些关键化合物主要以含硫化合物、吡嗪类化合物、脂肪醛类化合物为主,前两类来源于美拉



图中编号对应的化合物见表 2。
图 1 炸鸡翅检测的挥发性风味化合物的含量及 GC-O 检测的 NIF 值

Fig. 1 Content of volatile flavor compounds and NIF value of GC-O in fried chicken wings

德反应,后一类来源于脂质氧化降解反应^[8],涵盖了烤鸡翅的肉香、脂肪香、烤香香气特征。

将本研究结果与报道的采用 GC-MS、GC-O 分析、OAV 鉴定禽类肉香气的文献比较,在 Fan 等^[8] 分析北京油鸡炖煮肉汤中,本研究检测出的 2-甲基-3-呋喃硫醇、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫、二甲基二硫醚、乙偶姻、己醛、3-甲硫基丙醛、(*E*)-2-庚烯醛、辛醛、2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪、壬醛、癸醛、(*E*)-2-壬烯醛、(*E,E*)-2,4-壬二烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛也为关键香气成分。Liu 等^[40] 分析北京烤鸭中,本研究检测出的 3-甲硫基丙醛、己醛、辛醛、壬醛、苯乙醛、(*E*)-2-庚烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、(*E*)-2-壬烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、2-戊基呋喃也为关键香气成分。但与此前文献较明显的差别是,本研究炸鸡翅中关键香气化合物包括 5 个烷基吡嗪。吡嗪类化合物具有怡人的烤香香气,这可能是炸鸡翅受到消费者广泛喜好的原因之一。

3 结 论

鸡翅裹面油炸后,肉中脂肪酸的总含量、氨基酸的总含量均升高,尤其必需氨基酸与总氨基酸的比值及必需氨基酸与非必需氨基酸的比值达到了 43.23% 和 76.16%,营养指标提高。本研究以二

表 6 溶剂辅助蒸发结合 GC-MS 及 GC-O 分析鉴定的油炸鸡翅关键香气化合物

Tab. 6 Key aroma compounds of fried chicken wings identified by solvent-assisted flavor evaporation combined with GC-MS and GC-O analysis

化合物编号	RI	化合物	气味阈值/(ng·g ⁻¹) [#]	近似 OAV
含硫化合物(4 种)				
1	1 060	二甲基二硫醚	0. 16	25
3	1 363	* 2-甲基-3-呋喃硫醇	0. 000 4	25 450
4	1 436	3-甲硫基丙醛	0. 4	44
7	2 165	* 双(2-甲基-3-呋喃基)二硫	0. 000 8	15 500
含氮杂环化合物(5 种)				
10	1 251	2-甲基-吡嗪	60	1
11	1 308	2,5-二甲基-吡嗪	20	2
14	1 389	2,3,5-三甲基-吡嗪	23	1
16	1 431	3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪	0. 4	44
18	1 458	2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪	0. 04	401
含氧杂环化合物(2 种)				
25	1 277	2-戊基呋喃	5. 8	2
26	1 444	糠醛	0. 8	35
醛类(11 种)				
30	928	2-甲基丁醛	1	128
32	1 076	己醛	6. 9	34
35	1 264	辛醛	0. 9	28
36	1 309	(<i>E</i>)-2-庚烯醛	13	1
37	1 382	壬醛	4. 4	20
39	1 486	癸醛	0. 9	13
41	1 520	(<i>E</i>)-2-壬烯醛	0. 09	126
42	1 613	苯乙醛	4	11
43	1 623	(<i>E</i>)-2-癸烯醛	0. 4	234
44	1 678	(<i>E,E</i>)-2,4-壬二烯醛	0. 062	128
46	1 749	(<i>E,E</i>)-2,4-癸二烯醛	0. 2	1 102
酮类(3 种)				
48	973	2-丁酮	100	2
50	1 257	乙偶姻	55	1
52	1 288	1-辛烯-3-酮	0. 007	387
共计(25 种)				

* 标注的化合物质量浓度以提取离子色谱峰面积计算。#表示水中阈值,数据来自文献[15]。

氯甲烷为溶剂,采用SAFE提取结合GC-MS和频率法GC-O分析挥发性风味化合物,前者鉴定出80种挥发性化合物,后者鉴定出51种气味活性化合物。GC-O鉴定中检测频率较高(NIF≥55%)的化合物36种,对这些化合物计算OAV值,筛选出2-甲基-3-呋喃硫醇、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛等25种关键香气化合物(OAV≥1)。这些关键香气化合物涵盖了烤鸡翅所具有的肉香、脂肪香、烤香气特征,可产生于美拉德反应或脂质氧化降解反应。从鸡肉的香气构成及肉风味的形成

机制角度及与文献比较看,关键香气化合物的鉴定结果合理,但还有待进一步通过精准定量和香气重组实验确认。希望研究结果将为鸡肉的烹饪加工和肉味香精的研制提供参考。

参考文献:

[1] GE X Y, ZHANG L, ZHONG H Z, et al. The effects of various Chinese processing methods on the nutritional and safety properties of four kinds of meats[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 70:

- 102674.
- [2] TANG J, JIN Q Z, SHEN G H, et al. Isolation and identification of volatile compounds from fried chicken[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1983, 31(6): 1287–1292.
- [3] JANNEY C G, HALE K K, HIGMAN H C. The identification of fried chicken volatiles by gas chromatographic and mass spectral analysis[J]. *Poultry Science*, 1974, 53(5): 1758–1761.
- [4] SILVA F A P, FERREIRA V C S, MADRUGA M S, et al. Aroma profile and consumer liking of salted and dried chicken meat: effects of desalting and cooking methods[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(12): 2954–2965.
- [5] CAO Y, WU G C, ZHANG F, et al. A comparative study of physicochemical and flavor characteristics of chicken nuggets during air frying and deep frying[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2020, 97(8): 901–913.
- [6] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J N, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: a review[J]. *Food Research International*, 2022, 157:111385.
- [7] XIE J C, SUN B G, ZHENG F P, et al. Volatile flavor constituents in roasted pork of mini-pig[J]. *Food Chemistry*, 2008, 109(3): 506–514.
- [8] FAN M D, XIAO Q F, XIE J C, et al. Aroma compounds in chicken broths of Beijing Youji and commercial broilers [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(39): 10242–10251.
- [9] DU W B, ZHEN D W, WANG Y T, et al. Characterization of the key odorants in grilled mutton shashlik with or without suet brushing during grilling[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2020, 36(1): 111–120.
- [10] CANNON R J, CURTO N L, ESPOSITO C M, et al. The discovery of citral-like thiophenes in fried chicken [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(28): 5690–5699.
- [11] ZHANG L, HU Y, WANG Y, et al. 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[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 140:110764.
- [12] 张逸君, 郑福平, 张玉玉, 等. MAE-SAFE-GC-MS法分析道口烧鸡挥发性成分[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 130–134.
- ZHANG Y J, ZHENG F P, ZHANG Y Y, et al. Analysis of volatile components in Daokou roasted chicken by MAE-SAFE-GC-MS[J]. *Food Science*, 2014, 35(22): 130–134.
- [13] 黄志, 龙帅, 沙云菲, 等. 硅烷化衍生-气相色谱-质谱联用法测定烟草中的游离氨基酸[J]. *分析试验室*, 2017, 36(11): 1341–1346.
- HUANG Z, LONG S, SHA Y F, et al. Determination of free amino acids in tobacco using silylation derivatization followed by gas chromatography/mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2017, 36(11): 1341–1346.
- [14] BENET I, GUÀRDIA M D, IBÁÑEZ C, et al. Low intramuscular fat (but high in PUFA) content in cooked cured pork ham decreased Maillard reaction volatiles and pleasing aroma attributes [J]. *Food Chemistry*, 2016, 196:76–82.
- [15] GEMERT L J V. Odour thresholds: compilations of odour threshold values in air, water and other media [M]. 2nd ed. The Netherlands: Oliemans Punter & Partners B, 2011.
- [16] JIN C L, ZENG H R, XIE W Y, et al. Dietary supplementation with pioglitazone hydrochloride improves intramuscular fat, fatty acid profile, and antioxidant ability of thigh muscle in yellow-feathered chickens [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 100(2): 665–671.
- [17] 孔凡虎, 陈莹, 孙照程, 等. 青花鸡、茶花鸡2号和白羽肉鸡肌肉脂肪酸含量比较分析[J]. *肉类研究*, 2021, 35(1): 34–40.
- KONG F H, CHEN Y, SUN Z C, et al. Comparative analysis of fatty acid contents in muscles of Qinghua, Chahua 2 and white feathered broilers [J]. *Meat Research*, 2021, 35(1): 34–40.
- [18] YU Y R, WANG G Y, YIN X Y, et al. Effects of different cooking methods on free fatty acid profile, water-soluble compounds and flavor compounds in Chinese Piao chicken meat [J]. *Food Research International*, 2021, 149: 110696.
- [19] PAWAR D P, BOOMATHI S, HATHWAR S C, et al. Effect of conventional and pressure frying on lipids and fatty acid composition of fried chicken and oil[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2013, 50(2): 381–386.
- [20] JUAREZ M, FAILLA S, FICCO A, et al. Buffalo meat composition as affected by different cooking methods [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2010, 88(2/3): 145–148.
- [21] LOPES A F, ALFAIA C M M, PARTIDARIO A M C P

- C, et al. Influence of household cooking methods on amino acids and minerals of Barros-PDO veal[J]. *Meat Science*, 2015, 99:38–43.
- [22] KIM H, DO H W, CHUNF H. A comparison of the essential amino acid content and the retention rate by chicken part according to different cooking methods[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2017, 37(5): 626.
- [23] SHAKOOR A, ZHANG C P, XIE J C, et al. Maillard reaction chemistry in formation of critical intermediates and flavour compounds and their antioxidant properties [J]. *Food Chemistry*, 2022, 393:133416.
- [24] WILKINSON B, LEE E, PURCHAS R W, et al. The retention and recovery of amino acids from pork longissimus muscle following cooking to either 60 °C or 75 °C [J]. *Meat Science*, 2014, 96(1):361–365.
- [25] DONALD S M. Flavour formation in meat and meat products: a review[J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4): 415–424.
- [26] TAKAKURA Y, MIZUSHIMA M, HAYASHI K, et al. Characterization of the key aroma compounds in chicken soup stock using aroma extract dilution analysis [J]. *Food Science and Technology Research*, 2014, 20(1): 109–113.
- [27] 张宁, 陈海涛, 綦艳梅, 等. SDE-GC-MS 分析肯德基吮指原味鸡的挥发性风味成分[J]. *食品科学*, 2011, 32(22): 268–272.
- ZHANG N, CHEN H T, QI Y M, et al. Analysis of volatile compounds of KFC original recipe fried chicken by simultaneous distillation extraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Science*, 2011, 32(22): 268–272.
- [28] DINESH D. J, AHN D U, NAM K C, et al. Flavour chemistry of chicken meat: a review[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2013, 26(5): 732–742.
- [29] ZHAO J, WANG M, XIE J C, et al. Volatile flavor constituents in the pork broth of black-pig [J]. *Food Chemistry*, 2017, 226:51–60.
- [30] 段艳, 郑福平, 杨梦云, 等. ASE-SAFE/GC-MS/GC-O 法分析德州扒鸡风味化合物[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(4): 222–230.
- DUAN Y, ZHENG F P, YANG M Y, et al. Analysis of Dezhou braised chicken flavor compounds by ASE-SAFE/GC-MS/GC-O method[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(4): 222–230.
- [31] QI J, LIU D Y, ZHOU G H, et al. Characteristic flavor of traditional soup made by stewing Chinese yellow-feather chickens [J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(9): 2031–2040.
- [32] CHANG H, WANG Y, XIA Q, et al. Characterization of the physicochemical changes and volatile compound fingerprinting during the chicken sugar-smoking process [J]. *Poultry Science*, 2021, 100(1): 377–387.
- [33] 张晨萍, 王羽桐, 谢建春, 等. 4 种方便食品挥发性风味物质与不良因子检测 [J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(2): 172–182.
- ZHANG C P, WANG Y T, XIE J C, et al. Detection of volatile flavor substances and adverse factors in 4 kinds of convenience foods [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(2): 172–182.
- [34] APRIYANTONO A, INDRAWATY I. Comparison of flavor characteristic of domestic chicken and broiler as affected by different processing methods [J]. *Developments in Food Science*, 1998, 40: 279–294.
- [35] DUAN Y, ZHENG F P, CHEN H T, et al. Analysis of volatiles in Dezhou braised chicken by comprehensive two-dimensional gas chromatography/high resolution-time of flight mass spectrometry [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 1235–1242.
- [36] YU Y R, WANG G Y, LUO Y T, et al. Effect of natural spices on precursor substances and volatile flavor compounds of boiled Wuding chicken during processing [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2020, 35(5): 570–583.
- [37] GASIOR R, WOJTYCZA K, MAJCHER M A, et al. Key aroma compounds in roasted white koluda goose [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(21): 5986–5996.
- [38] BRUNTON N P, CRONIN D A, MONAHAN F J. Volatile component associated with fresh cooked and oxidized off-flavours in turkey breast meat [J]. *Journal of Flavor and Fragrance*, 2002, 17(5): 327–334.
- [39] LIU H, HUI T, FANG F, et al. The formation of key aroma compounds in roasted mutton during the traditional charcoal process [J]. *Meat Science*, 2022, 184: 1–9.
- [40] LIU H, WANG Z Y, ZHANG D Q, et al. Characterization of key aroma compounds in Beijing roasted duck by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, odor-activity values, and aroma-recombination experiments [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67: 5847–5856.
- [41] AYSELI M T, FILIK G, SELLI S. Evaluation of volatile

compounds in chicken breast meat using simultaneous distillation and extraction with odour activity value[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2014, 53(2): 137 – 142.

[42] SUN L X, CHEN J P, LI M Y, et al. Effect of star anise (*Illicium verum*) on the volatile compounds of stewed chicken [J]. Journal of Food Process Engineering, 2014, 37(2): 131 – 145.

[43] SABIKUN N, BAKHSH A, RAHMAN M S, et al. Volatile and nonvolatile taste compounds and their correlation with umami and flavor characteristics of chicken nuggets added with milk fat and potato mash[J]. Food Chemistry, 2021, 343:128499.

Analysis of Changes in Nutritional Compositions and Key Aroma Compounds in Fried Chicken Wings

WANG Jia’nan, LIU Yang, LI Kaixuan, XIE Jianchun *

(School of Light Industry Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The chicken wings coated with flour were fried with palm oil. The changes of fatty acid and amino acid composition before and after frying and the key aroma compounds in the muscles of fried chicken wings were analyzed. The results showed that the total content of fatty acids and amino acids in the muscles of the chicken wings were increased after frying. In particular, the ratio of essential amino acids to total amino acids and the ratio of essential amino acids to non-essential amino acids reached 43.23% and 76.16% , suggesting an increase in the nutritional indicators. Volatile flavor compounds in the fried chicken wings were extracted by solvent-assisted flavor evaporation (SAFE) using dichloromethane as the solvent, and then analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and gas chromatography-olfactometry (GC-O) in frequency detection. 80 volatile compounds were identified by GC-MS, while 51 odor-active compounds were identified by GC-O. There were 36 strong odor compounds (NIF≥55%) detected by GC-O analysis, including 2,5-dimethyl-pyrazine, hexanal, 3-methylthiopropional, 3-ethyl-2,5-dimethyl-pyrazine, 2-methylbutanal, (*E*)-2-nonenal, γ -butyrolactone, etc.. Odor active values (OAVs) for these compounds were calculated and suggested that 2-methyl-3-furanthiol, bis(2-methyl-3-furanyl) disulfide, (*E,E*)-2,4-decadienal, 2-ethyl-3,5-dimethyl-pyrazine, 1-octan-3-one, (*E*)-2-decenal, (*E,E*)-2,4-nonadienal, 2-methylbutanal, (*E*)-2-nonenal, 3-ethyl-2,5-dimethyl-pyrazine, 3-methylthiopropional, furfural, hexanal, octanal, dimethyl disulfide, nonanal, decanal, phenylacetaldehyde, 2-pentylfuran, 2-butanone, 2,5-dimethyl-pyrazine, (*E*)-2-heptenal, 2,3,5-trimethyl-pyrazine, 2-methyl-pyrazine and acetoin were the key aroma compounds (OAV≥1) in the fried chicken wings. The research results could provide theoretical references for chicken cooking technology and development of chicken meat flavorings.

Keywords: fried chicken wings; aroma compounds; solvent-assisted flavor evaporation; sulfur compounds; fatty acid; amino acids

(责任编辑:李 宁)