

不同烤制时间的鸡翅理化指标及风味物质组成差异

王璇¹, 胡晴晴¹, 何金鑫¹, 裴昭阳¹, 徐玉霞¹, 王金花², 谢建春^{1*}

(¹北京工商大学轻工科学与工程学院 食品与健康学院 北京 100048

²广东美的厨房电器制造有限公司 广东佛山 528311)

摘要 为探究烤制时间对电烤箱烤鸡翅品质和风味的影响,对分别烤制 16,18,20 min 的 3 个鸡翅样品进行感官评价、脂肪酸、氨基酸、硫代巴比妥酸反应物、蛋白羰基含量、挥发性风味物质分析。结果表明:烤制时间延长,脂肪酸含量先由 13.00 mg/g 增加到 17.41 mg/g,再减少到 10.52 mg/g,氨基酸含量从 10.60 g/100 g 增长到 11.71 g/100 g 再减少到 10.8 g/100 g,硫代巴比妥酸值从 1.71 mg/kg 升到 4.73 mg/kg,蛋白质羰基含量值从 7.69 nmol/mg 增加到 15.61 nmol/mg。相比之下,18 min 烤鸡翅的感官风味及营养指标(多不饱和脂肪酸占比 36.01%、必需氨基酸占比 43.38%)最好。采用溶剂辅助蒸发/气相色谱-质谱分析鉴定出 108 个挥发性化合物,正交偏最小二乘判别分析显示来源于美拉德反应的乙偶姻、四氢吡喃-2-酮、4-羟基丁酸、1-羟基-2-丙酮等和来源于脂质氧化反应的己醛、壬醛、戊醛、(Z)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、庚醛、2,3-辛二酮等化合物为构成 3 个样品挥发性组成差异的重要化合物。稀释法/气相色谱-嗅闻分析共鉴定出 56 个气味活性物质,烤 18 min 鸡翅鉴定出的化合物数量最多。3 个样品中稀释因子大($\log_2 FD \geq 6$)的共同化合物包括 3-(甲硫基)丙醛、己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、癸醛、(E)-2-壬烯醛、(E)-2-十一烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、4,5-环氧-2-(E)-癸烯醛、1-辛烯-3-酮、2-壬酮。正交偏最小二乘判别分析,显示来源于美拉德反应的 2-甲基丁醛、2,3-丁二酮、糠醛、3-(甲硫基)丙醛、二甲基二硫醚、2-甲基-3-咪喃硫醇、2,5-二甲基吡嗪等 12 个化合物和来源于脂质氧化反应的庚醛、反-2-己烯醛、(E)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、辛醛、己醛、4,5-环氧-2-(E)-癸烯醛等 14 个化合物为构成 3 个样品气味活性化合物组成差异的重要化合物。研究结果为获得较佳的烤鸡翅产品的工艺选择提供参考。

关键词 烤鸡翅;蛋白羰基含量;脂肪酸;氨基酸;挥发性化合物;气味活性化合物

文章编号 1009-7848(2024)12-0414-18 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.12.037

中国是全球主要的鸡肉消费国,2022 年累计鸡肉产量 1 660.8 万 t,白羽鸡总产量达到 1 192 万 t^[1]。肉在烹饪过程中发生复杂的物理化学变化,包括肌肉蛋白收缩变性,脂肪组织融化以及发生美拉德反应、脂质氧化反应等复杂反应产生挥发性风味化合物^[2-3]。烹饪方式、烹饪温度和时间对肉的各项理化指标有重要影响,从而影响肉的食用品质^[4-5]。Yu 等^[6]比较不同方式烹饪的瓢鸡肉的脂肪酸组成、氨基酸组成及挥发性风味物质,发现烤制的鸡肉中油酸含量最高,其氨基酸的含量是煮鸡肉的 2.9 倍,是煎鸡肉的 2.23 倍,鉴定出 3-(甲硫基)丙醛、苯甲醛、苯乙醛、壬醛、辛醛、己醛、丙酮、2-丁酮、 γ -丁内酯、3-甲基丁醛等 33 个挥发性化合物。王永瑞等^[7]探究了羊肉不同烤制时间的脂

肪酸、氨基酸含量变化,随着烤制时间的延长,脂肪酸含量先增加后降低,之后再增加,而总氨基酸含量一直呈现增加。周亚军等^[8]研究表明,烤制温度和烤制时间增加,鸡肉的脂肪氧化、蛋白氧化速度加快,肉的硫代巴比妥酸反应物(TBARS, thio-barbituric acid reaction substances)和蛋白羰基含量显著上升。目前,对于鸡肉的挥发性风味物质组成分析,一般先采用固相微萃取(SPME, solid phase micro-extraction)或溶剂辅助蒸发(SAFE, solvent assistant flavor evaporation)萃取富集样品的挥发性组分,然后采用气相色谱-质谱联机(GC-MS, gas chromatography-mass spectrometry)和气相色谱-嗅闻(GC-O, gas chromatography-olfactometry)进行分析^[2,9]。GC-MS 主要用于鉴定挥发性化合物的化学结构,GC-O 主要用于筛选对总体香气有贡献的气味活性化合物。GC-O 分析的常用检测方法包括频率法、强度法、稀释法(AEDA, aroma extract dilution analysis)。采用这些检测方法时,一般某气味(化合物)的嗅闻检测

收稿日期:2024-02-09

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)

第一作者:王璇,女,硕士生

通信作者:谢建春 E-mail: xjchun@th.btbu.edu.cn

频率越高,或强度越大,或稀释因子越高,该气味(化合物)对总体香气的贡献越大^[10-11]。Duan等^[12]采用加速溶剂萃取结合溶剂辅助蒸发(ASE-SAFE)的方法提取德州扒鸡的挥发性物质,通过全二维气相色谱/高分辨飞行时间质谱分析鉴定出91个化合物,包括二丙基二硫醚、2-乙酰噻唑、(*E*)-2-己烯醛、(*E*)-2-壬烯醛、(*Z*)-2-癸烯醛、(*E*)-2-十一碳烯醛、(*E,E*)-2,4-庚二烯醛和(*E,E*)-2,4-壬二烯醛等。Fan等^[13]采用SAFE提取及稀释法GC-O分析,从北京油鸡炖煮鸡汤中鉴定出2-甲基-3-咪喃硫醇、3-(甲硫基)丙醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛等重要气味活性物质。Xu等^[14]采用SAFE提取及稀释法GC-MS-嗅闻对扒鸡的腿肉进行分析,鉴定出己醛、辛醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、2-甲基-3-咪喃硫醇、双(2-甲基-3-咪喃基)二硫等重要气味活性物质。

烤鸡翅是一种具有广泛消费喜好的肉类食品。本文研究电烤箱烤制不同时间所得烤鸡翅的理化指标(脂肪酸、氨基酸、TBARS、蛋白羰基含量)及挥发性风味化合物组成差异,为获得具有较佳食用品质的烤鸡翅产品的工艺选择提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

鸡翅中(白羽鸡,冷链运输,-18℃保存),圣农集团;二氯甲烷、C5~C29正构烷烃(色谱纯),北京迪马科技公司;无水硫酸钠(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;18种氨基酸混标、乙腈(色谱纯)、*N*-(叔丁基二甲硅烷基)-*N*-甲基三氟乙酰胺(97%),北京百灵威科技有限公司;脂肪酸甲酯标准品(色谱纯),上海安谱实验科技有限公司;2-甲基吡嗪(≥95%)、乙基吡嗪(≥97%)、2-戊基咪喃(≥98%)、3-甲基-丁醛(≥97%)、己醛(≥98%)、庚醛(≥95%)、辛醛(≥98%)、壬醛(≥95%)、癸醛(≥97%)、(*E*)-2-庚烯醛(≥95%)、(*E*)-2-辛烯醛(≥96%)、(*E,E*)-2,4-庚二烯醛(≥90%)、(*E*)-2-壬烯醛(≥97%)、苯甲醛(≥99.5%)、十一醛(≥97%)、(*E*)-2-癸烯醛(≥93%)、(*E,E*)-2,4-壬二烯醛(≥85%)、(*E*)-2-十一烯醛(≥97%)、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛(≥95%)、4,5-环氧-2(*E*)-癸烯醛(≥95%)、1-辛烯-3-醇

(≥98%)、3-羟基-2-丁酮(≥95%)、2-壬酮(≥98%)、己酸(≥95%)、癸酸(≥95%)、 γ -辛内酯(≥98%)、 γ -壬内酯(≥98%)、对甲酚(≥95%),北京百灵威科技有限公司。

锡纸(20 m×40 cm,厚度0.0125 μ m),太仓市鑫铭塑料制品有限公司;手动固相微萃取手柄和50/35 μ m Carboxen/Polydimethylsiloxane/Divinylbenzene (CAR/PDMS/DVB)固相微萃取纤维,美国Supelco公司;N-EVAP-12干浴氮吹仪,美国Organomation Associates公司;7890A-5975C型气相色谱-质谱联用仪、7890A气相色谱仪,美国Agilent公司;DATU2000型嗅闻仪,美国DATU Inc公司;PT2500烤箱,广东美的厨房电器制造有限公司;DF-101S型恒温加热磁力搅拌水浴锅,河南予华仪器有限公司;KQ-500DE型数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;3-30K高速台式冷冻离心机,美国Sigma公司;UV2300II紫外分光光度计,上海天美科学仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备 将鸡翅在4℃冰箱中解冻30 min,电烤箱中230℃下分别烤制16,18,20 min,称量、计算烹饪损失,按1.2.2节进行感官评价。

$$\text{烹饪损失}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

式中: m_1 为生鸡翅的质量,g; m_2 为烤制后鸡翅的质量,g。

1.2.2 感官评价 感官评价小组由8位本实验室从事食品风味研究的研究生(6女、2男)组成,均有1年以上的肉制品感官评价经验。通过口尝的方法进行评价,每次评价前用温水漱口。感官评价小组对样品的色泽、香气、口感进行描述,并按照喜好度进行打分,采用9分制评分法,1分——非常不喜欢,2分——很不喜欢,3分——不喜欢,4分——稍不喜欢,5分——既喜欢又不喜欢,6分——稍喜欢,7分——喜欢,8分——很喜欢,9分——非常喜欢。综合所有评价员的平均结果,作为感官评价结果。

1.2.3 脂肪酸分析 脂肪提取:去骨和皮,将鸡翅的肉绞碎,冻干,取6 g加入溶剂20 mL(二氯甲烷:甲醇,2:1, V/V),25℃超声提取(功率70%)15 min,滤出提取液。重复以上操作4次,将4次提取

液合并,置于圆底烧瓶中,旋转蒸发至干,得到脂肪样品,称量。

脂肪酸衍生参照国标^[15]并稍做修改。向圆底烧瓶中加入 2 mL 5 mg/mL 十七烷酸甲酯,4 mL 异辛烷和 100 μ L 氢氧化钾/甲醇溶液 (2 mol/L),猛烈振摇 5 min,再加入 1 g 无水硫酸钠,振摇 5 min,取上清液,0.25 μ m 膜针头过滤,进行气-质联机(GC-MS)分析。

GC 条件:HP-5MS 色谱柱 (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m);升温程序:起始温度 100 $^{\circ}$ C,保持 5 min,以 4 $^{\circ}$ C/min 升至 300 $^{\circ}$ C;载气 He,流速 1 mL/min;进样口温度 250 $^{\circ}$ C;进样 1 μ L;分流比 20:1。

MS 质谱条件:电子轰击离子源(EI);能量 70 eV;离子源温度 230 $^{\circ}$ C;辅助加热线温度 250 $^{\circ}$ C;四级杆温度 150 $^{\circ}$ C;全扫描模式;扫描质量范围 33~450 amu。

脂肪酸甲酯通过检索 Nist11 谱库及标品进样鉴定。脂肪酸含量按如下公式计算。

$$x_i = 100 \times \frac{A_i C_s V_s}{m A_s} \times F \quad (2)$$

式中: x_i 为脂肪酸含量,mg/g; A_i 为脂肪酸甲酯的峰面积; A_s 为内标十七烷酸甲酯的峰面积; V_s 为内标十七烷酸甲酯的体积,mL; C_s 为内标十七烷酸甲酯的质量浓度,mg/mL; m 为肉的质量,mg; F 为参照 GB 5009.168-2016^[15]脂肪酸甲酯转化为脂肪酸的系数。

1.2.4 氨基酸分析 氨基酸提取:去骨和皮,将鸡翅肉绞碎,取 0.5 g,置于 50 mL 耐压瓶中,加入 25 mL 6 mol/L 盐酸,加入内标 L-正缬氨酸 300 μ L (1 mg/mL,溶于 0.6 mol/L 盐酸溶液),于烘箱中 110 $^{\circ}$ C 水解 24 h,过滤,滤液定容至 50 mL。

氨基酸衍生及 GC-MS 分析,参照刘洋等^[16]的方法。衍生试剂为 N-(叔丁基二甲硅烷基)-N-甲基三氟乙酰胺(MTBSTFA),衍生后样品采用 HP-5MS 色谱柱 (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m) 分析,选择离子扫描模式质谱检测。

配制系列稀释的氨基酸标准溶液,同样进行衍生和 GC-MS 分析,将各氨基酸峰面积与内标峰面积比值作为横坐标(x),各氨基酸浓度为纵坐标(y),绘制外标工作曲线。根据标准曲线计算样品中的各氨基酸质量浓度 (μ g/ μ L),最终结果表示

成肉中各氨基酸的含量(g/100 g 肉)。氨基酸的标准曲线见表 1。

表 1 测定氨基酸的外标曲线方程
Table 1 The external calibration equation during determination of the amino acids

氨基酸	标准曲线方程	R^2
缬氨酸 Val	$y = 0.0099x - 0.003$	0.9978
亮氨酸 Leu	$y = 0.0025x - 0.0008$	0.9999
异亮氨酸 Ile	$y = 0.0034x - 0.0053$	0.9995
蛋氨酸 Met	$y = 0.0066x - 0.0046$	0.9998
苏氨酸 Thr	$y = 0.0148x - 0.0087$	0.9967
苯丙氨酸 Phe	$y = 2.6311x - 0.006$	0.9904
赖氨酸 Lys	$y = 0.0091x + 0.0002$	0.9979
丙氨酸 Ala	$y = 2.2592x - 0.0256$	0.9901
甘氨酸 Gly	$y = 0.0037x - 0.0021$	0.9979
脯氨酸 Pro	$y = 0.0026x + 8E-05$	0.9956
丝氨酸 Ser	$y = 0.0051x - 0.0023$	0.9999
精氨酸 Arg	$y = 0.1441x - 0.0042$	0.9999
半胱氨酸 Cys	$y = 0.0224x - 0.0027$	0.9987
天冬氨酸 Asp	$y = 0.0166x - 0.0015$	0.9990
谷氨酸 Glu	$y = 0.0092x - 0.0022$	0.9986
组氨酸 His	$y = 0.0119x + 0.0001$	0.9967
酪氨酸 Tyr	$y = 0.0027x - 0.005$	0.9986

注: x 为各氨基酸峰面积与内标峰面积比值; y 为各氨基酸质量浓度(μ g/ μ L)。

1.2.5 TBARS 值测定 参照王晶等^[17]的方法,称取 5.0 g 样品,加入 20 mL 去离子水,在 4 000 r/min 下匀浆。取出 1 mL,加入 17 mL 10%三氯乙酸溶液和 3 mL 硫代巴比妥酸溶液 (0.02 mol/L),在 90 $^{\circ}$ C 下加热 30 min,冷却,取 5 mL 于离心管中,加入等体积的氯仿,3 000 r/min 下离心 10 min,取上清液,532 nm 下测吸光度。TBARS 值以每 kg 样品中的丙二醛毫克数表示。计算公式如下:

$$\text{TBARS}(\text{mg}/\text{kg}) = \frac{A_{532\text{nm}} \times 9.48}{V} \quad (3)$$

式中: $A_{532\text{nm}}$ 表示溶液的吸光值; V 为样品的体积(1 mL);9.48 为常数,mg \cdot mL/kg;参考王晶等^[17]的计算公式。

1.2.6 蛋白羰基含量测定 参照 Oliver 等^[18]的方法并稍加修改。称取 3 g 样品,加 30 mL 磷酸盐缓冲液 (pH=6.5) 匀浆,12 000 r/min 离心,分别取 2 mL 于两个离心管中,各加入 10 mL 10%三氯乙酸

溶液,离心弃去上清液,再向其中一个离心管中加入 5 mL 10 mmol/L DNPH(2,4-二硝基苯肼)溶液(溶于 2 mol/L 盐酸溶液),另一个离心管中加入 5 mL 2 mol/L 盐酸溶液做空白对照,37 ℃避光反应 1 h;后加入 5 mL 20%三氯乙酸溶液沉淀蛋白质,离心取沉淀,加入 4 mL 乙醇/乙酸乙酯(1:1,V/V)洗去多余的 DNPH,直至洗涤的溶剂无色;后氮吹除溶剂,向沉淀中加入 10 mL 盐酸胍溶液(6 mol/L,溶于 20 mmol/L 磷酸盐缓冲液中,pH=6.5),37 ℃反应 30 min,取上清液在 370,280 nm 下以空白组作对照进行比色。计算公式如下:

$$\text{羰基含量(nmol/mg)} = \frac{A_{370\text{nm}} \times 10^6}{22000 \times (A_{280\text{nm}} - A_{370\text{nm}} \times 0.43) \times c} \quad (4)$$

式中:22 000 为摩尔吸光系数,L/mol/cm; c 为蛋白质的质量浓度,mg/mL; A_{280} 为在 280 nm 下的吸光度; $A_{370\text{nm}}$ 为在 370 nm 下的吸光度。

1.2.7 挥发性风味物质分析 SAFE 条件:将鸡翅去骨,其它部分切成 0.1 cm 见方小块。称取 165 g 置于 1 L 圆底烧瓶中,加入内标 1 μ L(邻二氯苯 1 mg/mL,溶剂二氯甲烷),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。

GC 条件:DB-WAX (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m) 色谱柱,柱温 35 ℃,4 ℃/min 升至 120 ℃,后 6 ℃/min 升至 200 ℃,再以 8 ℃/min 升至 220 ℃,溶剂延迟 4 min;载气为 He,流速 1 mL/min。进样口温度 250 ℃,进样 1 μ L。

MS 条件:电子轰击离子源,能量 70 eV;离子源温度 230 ℃;四级杆温度 150 ℃;全扫描模式,质量扫描范围 35~450 amu;辅助加热线温度 230 ℃。

在相同色谱条件下进样 C_5 ~ C_{29} 正构烷烃,按下式计算保留指数(retention index, RI):

$$RI = 100 \left(n + \frac{t_i - t_n}{t_{n+1} - t_n} \right) \quad (5)$$

式中: t_n 和 t_{n+1} 分别为碳数为 $n, n+1$ 的正构烷烃的保留时间; t_i 是在碳数为 n 和 $n+1$ 的正构烷烃间出峰的 i 化合物保留时间。

采用检索 NIST11 谱库、核对保留指数、进样标品鉴定化合物,按照下式计算化合物含量:

$$m_i = \left(\frac{A_i}{A_0} \times m_0 \right) / m \quad (6)$$

式中: m_i 为化合物在样品中的含量,ng/g 肉; 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 为样品的质量,g。

1.2.8 GC-O 分析 SAFE 条件同上。GC-O 装置由 Agilent 7890A GC 及气味测量仪组成,色谱柱为 DB-WAX (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m),起始柱温 40 ℃,5 ℃/min 升至 230 ℃;载气为 N_2 (纯度为 99.999%),流速 1 mL/min,进样 1 μ L。

采用 AEDA 法进行嗅闻分析,样品用二氯甲烷按 1:2,1:4,1:8,1:16,1:32,1:64,⋯等逐级稀释,直到 GC-O 嗅闻不到任何气味为止。由 3 名评价人员进行分析,取其平均值作为结果。基于 GC-MS 结果、保留指数、嗅闻的气味及进标品鉴定化合物。

1.3 数据处理

试验结果为 3 个平行样品的均值 \pm 标准偏差($n=3$)。所有表格使用 Microsoft excel 2016 软件绘制。柱状图采用 Origin 2018 软件绘制。采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件中独立样本 T 检验方法进行显著性差异分析($P<0.05$)。SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)。

2 结果与分析

2.1 感官评价结果

对 3 个烤制时间的鸡翅进行感官评价,结果如表 2 所示。可知烤制时间越长,烹饪损失越高^[8]。比较 3 个样品,烤 16 min 时,烤鸡香味弱;烤 20 min 时,时间偏长,颜色较深,此时烤鸡香味仍较浓,但鸡翅肉偏干;烤 18 min 时,鸡翅风味最浓郁、颜色、口感均最好。

2.2 脂质氧化、蛋白氧化分析结果

TBARS 值代表丙二醛的含量,是表征脂质氧化程度的重要指标之一^[19]。丙二醛具有细胞毒性,可损伤生物膜结构,引起蛋白质、核酸等生命大分

表2 3种烤制时间鸡翅感官评价及烹饪损失

Table 2 Sensory evaluation and cooking loss of chicken wings with three different roasting times

烤制时间/min	感官描述	烹饪损失/%	喜好评分
16	烤鸡翅香味弱,表皮颜色浅,肉质过嫩、汁水多	23.29 ± 0.63	7.1 ± 0.75
18	烤鸡翅香味很浓郁,表皮颜色金黄,肉质嫩、有汁水	25.13 ± 0.58	8.5 ± 0.67
20	烤鸡翅香味较浓郁,表皮颜色深,肉质发干	29.42 ± 1.01	7.9 ± 0.34

子交联聚合^[20]。蛋白羰基含量是表明蛋白氧化的指标。脂质氧化与蛋白质氧化相互影响,并且脂质氧化产生的物质会促进蛋白的氧化,一般脂质氧化程度越高,同时蛋白羰基含量值也越高^[21]。蛋白质氧化可导致肉品质的不良变化,如变色、异味产生、质地缺陷和失去弹性等,降低肉的营养价值^[5]。

由图1可看出,生鸡翅的TBARS值为0.49 mg/kg,蛋白羰基含量值为0.69 nmol/mg。TBARS值与Sabikun等^[22]报道的生鸡肉的TBARS值结果一致,蛋白羰基含量与Qu等^[23]研究NaCl对鸡肉氧化的影响中生鸡肉的结果一致。随着烤制时间从16 min增加到烤20 min,肉TBARS值从1.71 mg/kg升到4.73 mg/kg,蛋白羰基含量值从7.69 nmol/mg增加到15.61 nmol/mg,表明烤制时间越长,脂质氧化程度、蛋白氧化程度越高^[8]。Costa等^[24]研究热处理对鸡胸肉氧化稳定性的影响,表明烘烤会使鸡肉脂质氧化程度增大,蛋白质羰基含量增加。Silva等^[25]对比了生鸡肉与其烤制后的蛋白质氧化程度,表明烤制后鸡肉蛋白羰基含量升高。

2.3 脂肪酸分析结果

由表3可知,生鸡翅的脂肪含量为2.5%,从生鸡翅中检出14种脂肪酸,含量最高的为油酸,其次为亚油酸、棕榈酸、硬脂酸,这与王嘉楠等^[9]研究炸鸡翅报道的鸡肉脂肪酸组成一致。由于烤制过程有汁水流出,鸡翅烤制后脂肪含量均增加;且烤制时间越长,鸡翅的脂肪含量越高。肉烤制前后脂肪酸组成变化是烤制过程中脂肪含量升高及脂肪酸发生氧化降解反应二者综合作用的结果。肉的脂肪含量升高,造成脂肪酸含量升高,而脂肪发生氧化降解反应,将生成挥发性风味物质及不挥发性的氧化产物,使脂肪酸含量下降。与生鸡翅相比,总体上烤制后3个鸡翅样品的脂肪酸含量均比生鸡翅的高。比较3个烤制时间的样品,总饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸的含量均为18 min > 16 min > 20 min,即烤制20 min的脂肪含量虽增高,而脂肪酸含量却最低。这可能因为烤制时间过长(20 min)时,脂肪酸被更多地氧化降解,从而造成脂肪酸的含量呈现下降趋势。

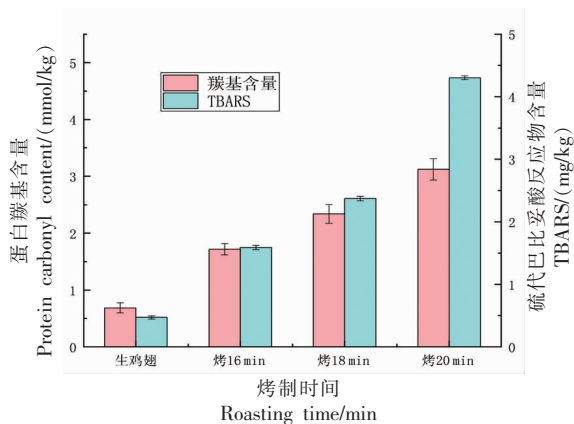


图1 生鸡翅及不同烤制时间鸡翅的TBARS值和蛋白羰基含量

Fig.1 TBARS and protein carbonyl content in the raw meat and roasted meat of chicken wings at different roasting times

脂肪含量却最低。这可能因为烤制时间过长(20 min)时,脂肪酸被更多地氧化降解,从而造成脂肪酸的含量呈现下降趋势。

脂肪酸是肉的重要营养成分,尤其PUFA(多不饱和脂肪酸)具有调节血脂、清除血栓、免疫调节等功能^[6],PUFA所占比例是评价肉制品营养的重要指标。由表3可知,与烤制时间16,18 min的样品中相比,烤制时间过长(20 min)时,PUFA比例降低,营养指标下降。这是因为与单不饱和脂肪酸(MUFA)、饱和脂肪酸(SFA)相比,肉中的PUFA更容易被氧化^[2]。由于烤制20 min的样品的TBARS值高,脂肪氧化程度高,从而其PUFA所占比例最低。

2.4 氨基酸分析结果

生鸡翅及不同烤制时间鸡翅肉的总氨基酸分析结果见表4。生鸡翅肉中谷氨酸含量最多,其次为亮氨酸、天冬氨酸、赖氨酸、精氨酸,与王嘉楠等^[9]报道的鸡翅氨基酸组成结果基本一致。烤制后的鸡翅样品中的氨基酸总含量均比生鸡翅的高,

表 3 不同烤制时间鸡翅脂肪酸组成

Table 3 Fatty acids composition in the raw and roasted chicken wings at different roasting times

组成成分	名称	生鸡翅	烤制时间/min		
			16	18	20
脂肪含量/%		2.5 ± 0.33 ^d	5.28 ± 0.39 ^c	6.39 ± 0.44 ^b	7.28 ± 0.39 ^a
脂肪酸组成/(mg/g 肉)	饱和脂肪酸 (SFA)				
	肉豆蔻酸 (C _{14:0})	0.05 ± 0.00 ^d	0.08 ± 0.00 ^c	0.16 ± 0.00 ^b	0.26 ± 0.00 ^a
	棕榈酸 (C _{16:0})	2.22 ± 0.03 ^c	2.55 ± 0.02 ^b	3.75 ± 0.01 ^a	2.03 ± 0.02 ^d
	硬脂酸 (C _{18:0})	0.98 ± 0.01 ^c	1.10 ± 0.01 ^b	1.35 ± 0.03 ^a	0.89 ± 0.00 ^d
	花生酸 (C _{20:0})	0.01 ± 0.00 ^d	0.02 ± 0.01 ^c	0.03 ± 0.00 ^b	0.05 ± 0.00 ^a
	山嵛酸 (C _{22:0})	0.02 ± 0.00 ^b	0.02 ± 0.00 ^b	0.03 ± 0.00 ^a	0.02 ± 0.00 ^b
	小计	3.28 ± 0.04 ^c	3.75 ± 0.03 ^b	5.32 ± 0.04 ^a	3.20 ± 0.02 ^c
	单不饱和脂肪酸 (MUFA)				
	棕榈油酸 (C _{16:1})	0.27 ± 0.01 ^d	0.93 ± 0.00 ^b	0.96 ± 0.00 ^a	0.69 ± 0.00 ^c
	油酸 (C _{18:1})	2.62 ± 0.04 ^c	3.56 ± 0.07 ^b	4.74 ± 0.16 ^a	2.83 ± 0.04 ^c
	二十碳烯酸 (C _{20:1})	0.04 ± 0.00 ^d	0.08 ± 0.00 ^b	0.12 ± 0.01 ^a	0.06 ± 0.00 ^c
	小计	2.93 ± 0.05 ^d	4.57 ± 0.07 ^b	5.82 ± 0.17 ^a	3.58 ± 0.04 ^c
	多不饱和脂肪酸 (PUFA)				
	亚油酸 (C _{18:2})	2.36 ± 0.03 ^d	3.17 ± 0.07 ^b	4.63 ± 0.06 ^a	3.06 ± 0.02 ^c
	γ-亚麻酸 (C _{18:3})	0.02 ± 0.00 ^c	0.03 ± 0.00 ^b	0.05 ± 0.00 ^a	0.03 ± 0.00 ^b
	二十碳三烯酸 (C _{20:3})	0.19 ± 0.00 ^a	0.18 ± 0.02 ^a	0.19 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^b
	二十碳四烯酸 (C _{20:4})	0.67 ± 0.00 ^c	0.97 ± 0.02 ^b	1.04 ± 0.01 ^a	0.37 ± 0.00 ^d
	二十二碳五烯酸 (C _{22:5})	0.10 ± 0.01 ^c	0.17 ± 0.00 ^b	0.19 ± 0.00 ^a	0.09 ± 0.02 ^d
	二十二碳六烯酸 (C _{22:6})	0.10 ± 0.02 ^b	0.16 ± 0.00 ^a	0.17 ± 0.00 ^a	0.05 ± 0.00 ^c
	小计	3.44 ± 0.06 ^d	4.68 ± 0.11 ^b	6.27 ± 0.07 ^a	3.74 ± 0.04 ^c
	总计	9.65 ± 0.15 ^c	13.00 ± 0.21 ^b	17.41 ± 0.28 ^a	10.52 ± 0.11 ^c
	SFA/%	33.99	28.85	30.56	30.42
	UFA/%	66.01	71.15	69.44	69.58
	MUFA/%	30.36	35.15	33.43	34.03
	PUFA/%	35.65	36.00	36.01	35.55

注:同一行不同字母表示存在显著性差异($P < 0.05$)。

这与烤制过程肉的失水相对地使蛋白质含量升高有关。烤制时间从 16 min 延长到 18 min, 氨基酸含量呈现上升, 这与烤制时间较长时, 肌肉失水程度增加, 蛋白质相对含量增加幅度较大有关^[26]。但与烤制 18 min 相比, 烤制时间过长(20 min)时, 氨基酸总含量反而出现下降。这可能与烤制程度过高时, 蛋白质过多地被糖基化或氨基酸过多地发生降解反应有关^[27]。例如, 烤制 20 min 样品中亮氨酸和苯丙氨酸含量下降的幅度较大, 其中亮氨酸发生 Strecker 降解反应可产生 3-甲基丁醛, 苯丙氨酸发生 Strecker 降解反应可产生苯乙醛^[2]。

氨基酸是构成蛋白质的基本物质, 蛋白质的营养价值由其所含氨基酸的种类、含量和比例决定^[16], 必需氨基酸(EAA, essential amino acids)为

人体无法产生需从饮食中摄取的氨基酸, 非必需氨基酸(NEAA, non-essential amino acids)为人体可通过改变自身的代谢途径来进行合成的氨基酸^[9]。与生肉相比, 3 个烤制样品中 EAA 占氨基酸总量(TAA)的比例(EAA/TAA)均变大, 表明营养指标均升高。相对而言, 烤制 16, 20 min 样品的 EAA/TAA 比值均不如烤制 18 min 的, 表明烤制 18 min 的样品的氨基酸营养指标最好。

2.5 挥发性风味物质分析结果

2.5.1 化合物分析鉴定结果 如表 5 所示, SAFE/GC-MS 从 3 个样品中共分析鉴定出 108 个挥发性化合物, 其中烤 16 min 样品中 56 个, 烤 18 min 样品中 88 个, 烤 20 min 样品中 83 个, 即烤 18 min 样品鉴定出的化合物个数最多。

表4 不同烤制时间鸡翅氨基酸组成

Table 4 Amino acids composition in the raw meat and the roasted meat of chicken wings at different roasting times

氨基酸	含量/(g/100g 肉)			
	生鸡翅	16 min	18 min	20 min
必需氨基酸(EAA)				
缬氨酸 Val	0.19 ± 0.01 ^a	0.18 ± 0.01 ^a	0.19 ± 0.01 ^a	0.19 ± 0.02 ^a
亮氨酸 Leu	1.94 ± 0.02 ^b	2.03 ± 0.02 ^b	2.20 ± 0.11 ^a	1.80 ± 0.02 ^c
异亮氨酸 Ile	0.48 ± 0.00 ^b	0.49 ± 0.00 ^b	0.64 ± 0.03 ^a	0.62 ± 0.02 ^a
蛋氨酸 Met	0.50 ± 0.00 ^a	0.43 ± 0.04 ^b	0.43 ± 0.00 ^b	0.40 ± 0.03 ^b
苏氨酸 Thr	1.05 ± 0.01 ^d	1.55 ± 0.07 ^b	1.86 ± 0.03 ^a	1.36 ± 0.00 ^c
苯丙氨酸 Phe	1.12 ± 0.01 ^c	1.38 ± 0.04 ^b	1.87 ± 0.02 ^a	0.84 ± 0.09 ^d
赖氨酸 Lys	1.18 ± 0.02 ^c	1.22 ± 0.03 ^c	1.79 ± 0.03 ^b	2.54 ± 0.01 ^a
合计	6.46 ± 0.07 ^d	7.28 ± 0.21 ^c	8.97 ± 0.04 ^a	7.74 ± 0.19 ^b
非必需氨基酸(NEAA)				
丙氨酸 Ala	1.18 ± 0.01 ^a	1.23 ± 0.02 ^a	1.25 ± 0.02 ^a	1.30 ± 0.00 ^a
甘氨酸 Gly	0.61 ± 0.03 ^b	0.66 ± 0.01 ^b	0.96 ± 0.01 ^a	0.51 ± 0.01 ^c
脯氨酸 Pro	0.40 ± 0.02 ^c	0.47 ± 0.02 ^a	0.55 ± 0.01 ^b	0.56 ± 0.00 ^a
丝氨酸 Ser	0.80 ± 0.01 ^c	0.84 ± 0.02 ^c	1.21 ± 0.03 ^b	1.70 ± 0.00 ^a
精氨酸 Arg	1.37 ± 0.01 ^a	1.30 ± 0.00 ^b	1.21 ± 0.04 ^c	0.75 ± 0.06 ^d
半胱氨酸 Cys	0.08 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^{ab}	0.04 ± 0.00 ^b	0.04 ± 0.01 ^b
天冬氨酸 Asp	1.62 ± 0.07 ^c	1.78 ± 0.02 ^b	1.92 ± 0.01 ^a	1.52 ± 0.01 ^d
谷氨酸 Glu	3.11 ± 0.05 ^{ab}	3.19 ± 0.00 ^b	3.41 ± 0.06 ^a	3.08 ± 0.05 ^c
组氨酸 His	0.71 ± 0.00 ^b	0.79 ± 0.02 ^b	0.82 ± 0.01 ^b	1.02 ± 0.12 ^a
酪氨酸 Tyr	0.18 ± 0.02 ^c	0.28 ± 0.02 ^b	0.34 ± 0.00 ^a	0.33 ± 0.02 ^a
合计	10.07 ± 0.22 ^c	10.60 ± 0.13 ^b	11.71 ± 0.19 ^a	10.8 ± 0.28 ^b
TAA	16.53 ± 0.29 ^d	17.88 ± 0.34 ^c	20.68 ± 0.23 ^a	18.55 ± 0.47 ^b
EAA/TAA/%	39.07 ± 0.07 ^d	40.72 ± 0.27 ^c	43.38 ± 0.28 ^a	41.75 ± 0.27 ^b

注:同一行不同字母表示存在显著性差异($P < 0.05$)。

肉烤制过程中风味的形成主要源于脂质氧化反应和美拉德反应。3个样品中检测到大量脂质氧化产物,包括脂肪族的醛24种、酮12种、醇13种、酸12种、酯9种、烃10种、呋喃1种。醛类化合物的数量最多、其次为醇类、酸类。表5中,己醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E)-2-壬烯醛、2-庚酮、(E)-2-戊烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛和2-戊基呋喃等化合物可来源于亚油酸氧化,辛醛、壬醛、癸醛、2-十一烯醛可来源于油酸氧化,1-辛烯-3-醇可来源于花生四烯酸氧化^[11], γ -内酯和 δ -内酯可来源于 γ -和 δ -羟基脂肪酸的环化脱水^[28]。

3个样品中检测到产生于美拉德反应的化合物19种,包括含硫化合物3种,含氮和含氧杂环化合物8种,醛类、醇酮类和酸类8种,其中二甲基二硫醚、3-(甲硫基)丙醛可来源于蛋氨酸Strecker降解反应,吡嗪类化合物如甲基吡嗪、2-

乙基-6-甲基吡嗪、三甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪可来源于两个氨基酮的缩合反应^[29],一些醛类如苯乙醛和3-甲基丁醛可来源于苯丙氨酸和亮氨酸的Strecker降解反应^[2]。

另外,还检测到少量其它来源化合物,苯酚、甲苯、对甲酚等可能来源于动物饲料或环境污染物,2-戊基吡啶来源于脂质氧化与美拉德反应的交互作用^[2]。

比较3个样品,烤18 min样品中鉴定出的化合物数量往往最多且含量最高,例如酮类,在烤18 min样品中达到10种,而烤16,20 min样品中分别为2种、7种。烤18 min样品中鉴定出的化合物总含量为12 469.54 ng/g,而烤16,20 min样品分别为4 844.3,5 662.38 ng/g。在烤18 min样品中醛类含量达到5 659.5 ng/g,而烤16,20 min样品分别为2 935.24,2 612.58 ng/g。与烤16 min样

品相比,烤 18 min 样品检测出的风味化合物数量多且含量高,主要与后者发生美拉德反应和脂质氧化反应程度较高有关。而从 18 min 继续烤制到 20 min 时,检测到的化合物数量及含量反而出现下降,这与烤制时间较长时,美拉德反应和脂质氧化反应复杂化,烤鸡翅的颜色加深,生成了更多的非挥发性产物(如类黑精)有关^[30]。另外,当烤制时间过长时,反而检测得到的风味化合物变少,还与肉的蛋白组织结构破坏严重,风味保持能力变弱,产生的风味物质逸失较多有关^[31]。

在烤 16 min 样品中含量高(>100 ng/g)的化合物为戊醛、己醛、壬醛、1-戊醇、己酸、庚酸、辛酸、壬酸、十四酸。烤 18 min 样品中含量高(>200 ng/g)的化合物为四氢吡喃-2-酮、戊醛、己醛、辛醛、壬醛、(Z)-2-癸烯醛、2,3-辛二酮、1-戊醇、3-

戊烯-2-醇、1-己醇、1-辛烯-3-醇、己酸、庚酸、辛酸、壬酸、丁内酯。烤 20 min 样品中含量高(>100 ng/g)的化合物为四氢吡喃-2-酮、1-羟基-2-丙酮、乙偶姻、2,3-丁二醇、4-羟基丁酸、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、(Z)-2-癸烯醛、3-戊烯-2-醇、己酸、庚酸、辛酸、壬酸。Zhang 等^[32]采用 SPME/GC-MS 在烤鸡腿中检测出含量高的化合物为 1-辛烯-3-醇、己醛、壬醛、2,3-辛二酮等。Long 等^[33]在卤鸡翅中检测到含量高化合物为己醛、2,3-辛二酮、庚醛等。王嘉楠等^[9]在炸鸡翅中检测到含量高的化合物为乙偶姻、己醛、壬醛等。Zhou 等^[34]在符离集烧鸡中检测到含量高的化合物为己醛、壬醛、辛醛、1-辛烯-3-醇、1-戊醇、1-己醇等化合物。本文检测的高含量化合物与上述文献报道基本一致。

表 5 不同烤制时间鸡翅 SAFE/GC-MS 分析鉴定挥发性化合物

Table 5 Volatile compounds identified in the roasted chicken wings with different roasting times using solvent assisted flavor evaporation and gas chromatography-mass spectrometry (SAFE/GC-MS) analysis

序号	RI	化合物	含量/(ng/g)			鉴定方式
			16 min	18 min	20 min	
来源于美拉德反应化合物						
含硫化合物(3种)						
1	1 062	二甲基二硫醚	—	—	3.73 ± 0.69	MS, RI
2	1 480	3-(甲硫基)丙醛	—	24.77 ± 4.64 ^b	28.81 ± 5.61 ^a	MS, RI
3	1 940	苯并噻唑	6.47 ± 1.62 ^b	7.84 ± 2.6 ^a	—	MS, RI
		小计	6.47	32.61	32.54	
含氮杂环化合物(4种)						
4	1 264	2-甲基吡嗪	—	—	9.18 ± 0.92	MS, RI, S
5	1 470	2-乙基-6-甲基吡嗪	—	—	7.19 ± 1.47	MS, RI
6	1 406	三甲基吡嗪	—	—	37.12 ± 2.23	MS, RI
7	1 438	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	—	13.59 ± 1.1 ^b	25.45 ± 5.32 ^a	MS, RI
		小计	0	13.59	78.94	
含氧杂环化合物(4种)						
8	1 571	二氢-5,5-二甲基-2(3H)-呋喃酮	—	6.62 ± 1.19	—	MS, RI
9	1 772	四氢-6-甲基-2H-吡喃-2-酮	—	18.93 ± 0.18 ^a	8.54 ± 1.43 ^b	MS, RI
10	1 783	四氢吡喃-2-酮	50.8 ± 9.59 ^c	227.27 ± 16.56 ^a	120.72 ± 16.86 ^b	MS, RI
11	1 651	2-呋喃乙醇	—	—	35.93 ± 4.03	MS, RI
		小计	50.8	252.82	165.19	
醛类(1种)						
12	1 648	苯乙醛	—	—	62.1 ± 6.93	MS, RI
		小计	0	0	62.1	
醇酮类(5种)						
13	1 234	3-羟基-3-甲基-2-丁酮	—	38.96 ± 4.83 ^b	41.25 ± 4.76 ^a	MS, RI
14	1 289	1-羟基-2-丙酮	50.19 ± 5.17 ^c	148.2 ± 20.17 ^b	326.06 ± 19.39 ^a	MS, RI
15	1 363	3-羟基-2-丁酮	—	8.82 ± 0.58	—	MS, RI, S

(续表 5)

序号	RI	化合物	含量/(ng/g)			鉴定方式
			16 min	18 min	20 min	
16	1 275	乙偶姻	36.03 ± 6.14 ^c	105.38 ± 13.6 ^b	197.48 ± 22.05 ^a	MS, RI
17	1 575	2,3-丁二醇	90.1 ± 22.25 ^b	66.53 ± 13.28 ^c	186.62 ± 37.41 ^a	MS, RI
		小计	176.32	367.89	751.41	
		酸类(2种)				
18	1 663	3-甲基丁酸	—	12.04 ± 2.3 ^b	13.96 ± 2.65 ^a	MS, RI
19	1 605	4-羟基丁酸	44.9 ± 12.15 ^b	—	132.8 ± 8.64 ^a	MS, RI
		小计	44.9	12.04	146.76	
		来源于脂质氧化化合物				
		醛类(24种)				
20	970	戊醛	106.25 ± 17.89 ^b	467.41 ± 84 ^a	—	MS, RI
21	1 079	己醛	1 993.8 ± 396.41 ^b	3 039.63 ± 413.5 ^a	985.93 ± 52.39 ^c	MS, RI, S
22	1 085	2-甲基-2-丁烯醛	—	36.65 ± 11.05 ^a	20.89 ± 3.18 ^b	MS, RI
23	1 178	庚醛	57.15 ± 7.3 ^c	194.59 ± 28.25 ^a	133.88 ± 7.94 ^b	MS, RI, S
24	1 188	3-甲基-2-丁烯醛	—	14.6 ± 1.54 ^a	10.29 ± 2.69 ^b	MS, RI
25	1 220	(<i>E</i>)-2-己烯醛	10.73 ± 1.11 ^c	20.25 ± 1.17 ^a	14.66 ± 0.09 ^b	MS, RI
26	1 282	辛醛	76.63 ± 4.04 ^c	324.31 ± 16.07 ^a	209.7 ± 33.21 ^b	MS, RI, S
27	1 315	(<i>E</i>)-2-庚烯醛	59.54 ± 16.27 ^c	152.89 ± 23.04 ^a	65.98 ± 7.74 ^b	MS, RI, S
28	1 387	壬醛	244.23 ± 39.4 ^c	574.64 ± 29.76 ^a	514.29 ± 104.28 ^b	MS, RI, S
29	1 419	(<i>E</i>)-2-辛烯醛	90.09 ± 21.5 ^b	141.78 ± 26.75 ^a	70.05 ± 1.63 ^c	MS, RI, S
30	1 481	(<i>E, E</i>)-2,4-庚二烯醛	42.81 ± 10.66 ^a	15.44 ± 3.84 ^b	9.02 ± 2.4 ^c	MS, RI, S
31	1 491	癸醛	26.69 ± 5.05 ^c	68.24 ± 12.76 ^a	44.53 ± 11.41 ^b	MS, RI, S
32	1 530	苯甲醛	40.91 ± 11.31 ^b	72.06 ± 0.84 ^a	69.95 ± 8.35 ^a	MS, RI, S
33	1 148	(<i>Z</i>)-2-壬烯醛	16.6 ± 4.11 ^c	78.04 ± 16.1 ^a	48.16 ± 7.38 ^b	MS, RI
34	1 622	十一醛	—	—	40.44 ± 0.77	MS, RI, S
35	1 628	(<i>Z</i>)-2-癸烯醛	—	200.98 ± 10.04 ^a	123.51 ± 14.46 ^b	MS, RI, S
36	1 702	(<i>E, E</i>)-2,4-壬二烯醛	10.81 ± 1.92 ^c	29.91 ± 3.07 ^a	13.07 ± 4.15 ^b	MS, RI, S
37	1 755	2-十一烯醛	42.84 ± 13.03 ^c	105.07 ± 21.6 ^a	97.27 ± 12.63 ^b	MS, RI, S
38	1 805	(<i>E, E</i>)-2,4-癸二烯醛	41.87 ± 11.85 ^c	81 ± 10.98 ^a	46.58 ± 17.68 ^b	MS, RI, S
39	1 824	十三醛	—	10.35 ± 1.93	—	MS, RI
40	1 968	顺-4,5-环氧-(<i>E</i>)-2-癸烯醛	16.68 ± 2.6 ^b	31.66 ± 8.48 ^a	17.57 ± 3.84 ^b	MS, RI, S
41	2 020	十五醛	19.13 ± 3.63 ^b	—	56.36 ± 8.59 ^a	MS, RI
42	2 120	十六醛	25.39 ± 4.45 ^a	—	20.45 ± 9.11 ^b	MS, RI
43	2 390	十八醛	13.09 ± 2.18	—	—	MS, RI
		小计	2935.24	5 659.5	2612.58	
		酮类(12种)				
44	1 005	1-(2,2-二甲基环戊基)-乙酮	—	—	13.52 ± 0.83	MS, RI
45	1 052	3-己酮	—	73.18 ± 13.92 ^a	13.45 ± 0.74 ^b	MS, RI
46	1 110	4-甲基-2-己酮	25.29 ± 4.24	—	—	MS, RI
47	1 175	2-庚酮	—	43.33 ± 4.58	—	MS, RI
48	1 231	6-甲基-2-庚酮	—	4.5 ± 1.22	—	MS, RI
49	1 278	2-辛酮	—	16.7 ± 1.52 ^a	14.58 ± 3.28 ^b	MS, RI
50	1 317	1-辛烯-3-酮	10.53 ± 0.86 ^b	20.55 ± 1.27 ^a	10.33 ± 1.77 ^b	MS, RI
51	1 321	2,3-辛二酮	—	869.3 ± 79.51	—	MS, RI
52	1 342	2-环戊烯-1-酮	—	5.25 ± 1.38	—	MS, RI
53	1 402	2-壬酮	—	22.37 ± 3.21 ^a	14.85 ± 2.77 ^b	MS, RI, S
54	1 486	2-癸酮	—	21.57 ± 4.81 ^a	22.91 ± 4.25 ^a	MS, RI
55	1 569	(<i>E, E</i>)-3,5-辛二烯-2-酮	—	9.04 ± 2.24 ^a	6.36 ± 0.31 ^b	MS, RI
		小计	35.82	1 085.79	96.0	

(续表5)

序号	RI	化合物	含量/(ng/g)			鉴定方式
			16 min	18 min	20 min	
醇类(13种)						
56	956	2-甲基-3-丁烯-2-醇	—	—	23.72 ± 1.14	MS, RI
57	1 119	异丁醇	—	12.83 ± 1.06 ^a	8.47 ± 1.95 ^b	MS, RI
58	1 125	1-丁醇	—	25.07 ± 4.82 ^b	37.18 ± 9.82 ^a	MS, RI
59	1 251	1-戊醇	194.6 ± 21.6 ^b	282.99 ± 24.5 ^a	63.48 ± 11.61 ^c	MS, RI
60	1 169	3-戊烯-2-醇	17.68 ± 6.32 ^c	250.68 ± 36.45 ^a	117.63 ± 6.91 ^b	MS, RI
61	1 360	1-己醇	—	1 156.21 ± 107.39	—	MS, RI
62	1 451	1-辛烯-3-醇	61.33 ± 0.07 ^c	201.71 ± 2.09 ^a	92.42 ± 10.64 ^b	MS, RI, S
63	1 444	1-庚醇	38.62 ± 4.13 ^c	94.24 ± 5.5 ^a	52.68 ± 2.72 ^b	MS, RI
64	1 557	1-辛醇	29.58 ± 2.55 ^c	114.39 ± 23.52 ^a	42.63 ± 6.62 ^b	MS, RI
65	1 611	(E)-2-辛烯-1-醇	—	39.21 ± 6.13 ^a	15.72 ± 1.85 ^b	MS, RI
66	1 655	1-壬醇	—	17.94 ± 1.38	—	MS, RI
67	2 137	2-苯氧基乙醇	11.13 ± 2.06 ^b	20.57 ± 5.09 ^a	—	MS, RI
68	2 159	3-辛烯-2-醇	—	15.61 ± 4.27	—	MS, RI
		小计	352.94	2 231.45	453.93	
酸类(13种)						
69	1 446	乙酸	22.65 ± 1.53 ^c	34.17 ± 7.78 ^a	29.76 ± 3.88 ^b	MS, RI
70	1 550	丙酸	6.87 ± 0.99 ^a	—	5.87 ± 1.39 ^a	MS, RI
71	1 605	4-羟基丁酸	44.9 ± 12.15 ^b	—	132.8 ± 8.64 ^a	MS, RI
72	1 620	丁酸	20.09 ± 4.23 ^b	46.34 ± 3.91 ^a	—	MS, RI
73	1 735	戊酸	39.92 ± 5.49 ^c	67.45 ± 11.91 ^a	60.79 ± 3.2 ^b	MS, RI
74	1 842	己酸	196.55 ± 29.58 ^c	582.42 ± 28.08 ^a	244.38 ± 27.16 ^b	MS, RI, S
75	1 905	5-己烯酸	—	—	12.03 ± 2.44	MS, RI
76	1 950	庚酸	130.56 ± 31.98 ^c	236.02 ± 28.22 ^a	156.04 ± 9.98 ^b	MS, RI
77	2 057	辛酸	142.53 ± 10.29 ^b	406.13 ± 82.37 ^a	112.94 ± 20.61 ^c	MS, RI
78	2 164	壬酸	181.45 ± 46.18 ^b	222.14 ± 41.84 ^a	146 ± 47.53 ^c	MS, RI
79	2 274	癸酸	32.68 ± 9.16 ^a	22.64 ± 3.23 ^b	19.84 ± 1.94 ^c	MS, RI, S
80	2 494	十二酸	—	20.38 ± 3.68 ^a	4.16 ± 0.4 ^b	MS, RI
81	2 657	十四酸	234.85 ± 60.37	—	—	MS, RI
		小计	1 053.05	1637.69	924.61	
酯类(9种)						
82	1 132	戊酸异丙基酯	—	31.18 ± 1.84 ^a	12.9 ± 1.08 ^b	MS, RI
83	1 589	γ-戊内酯	22.48 ± 1.87 ^c	78.75 ± 14.07 ^a	37.12 ± 1.89 ^b	MS, RI
84	1 606	丁内酯	—	210.07 ± 22.36	—	MS, RI
85	1 679	γ-己内酯	17.05 ± 3.03 ^c	84.01 ± 10.43 ^a	31.7 ± 6.57 ^b	MS, RI
86	1 852	γ-辛内酯	—	39.5 ± 7.25 ^a	19.51 ± 3.3 ^b	MS, RI, S
87	2 016	γ-癸内酯	15.21 ± 1.55 ^c	59.15 ± 7.08 ^a	38.68 ± 5.36 ^b	MS, RI
88	2 049	5-氧代-4-己内酯	—	9.49 ± 1.95 ^a	6.36 ± 0.36 ^b	MS, RI
89	2 186	δ-癸内酯	—	18.32 ± 2.87 ^a	8.17 ± 1.15 ^b	MS, RI
90	2 254	γ-十一内酯	—	7.72 ± 1.53 ^a	4.97 ± 0.9 ^b	MS, RI
		小计	54.74	538.19	159.41	
烃类(10种)						
91	1 036	1-癸烯	—	17.67 ± 1.75	—	MS, RI
92	997	癸烷	—	120.68 ± 23.65	—	MS, RI
93	1 097	十一烷	13.98 ± 0.78 ^a	12.91 ± 1.73 ^a	—	MS, RI
94	1 197	十二烷	13.15 ± 3.26 ^b	128.54 ± 1.98 ^a	9.33 ± 1.69 ^c	MS, RI
95	1 239	1-十二烯	—	20.35 ± 5.29	—	MS, RI

(续表 5)

序号	RI	化合物	含量/(ng/g)			鉴定方式
			16 min	18 min	20 min	
96	1 298	十三烷	51.85 ± 6.02 ^a	27.08 ± 2.52 ^b	15.27 ± 3.8 ^c	MS, RI
97	1 397	十四烷	15.93 ± 3.4b ^a	51 ± 14.27 ^a	—	MS, RI
98	1 441	(E)-2-十四烯	—	24.9 ± 3.48	—	MS, RI
99	1 497	十五烷	9.59 ± 1.45 ^a	10.09 ± 1.78 ^a	8.6 ± 1.2 ^b	MS, RI
100	1 597	十六烷	25.83 ± 7.83	—	—	MS, RI
		小计	130.33	413.22	33.2	
		咪喃类(1种)				
101	1 225	2-戊基咪喃	30.02 ± 1.89 ^a	29.99 ± 0.45 ^a	30.53 ± 3.29 ^a	MS, RI, S
		小计	30.02	29.99	30.53	
		其它(7种)				
102	1 029	甲苯	—	60.67 ± 3.42 ^a	15.02 ± 2.18 ^b	MS, RI
103	1 829	4-(1-甲基丙基)苯酚	—	27.84 ± 5.02 ^a	11.05 ± 0.88 ^b	MS, RI
104	1 998	苯酚	—	21.79 ± 5.75 ^a	16.14 ± 0.13 ^b	MS, RI
105	2 076	对甲酚	14.78 ± 4.92 ^a	9.16 ± 3.58 ^b	14.66 ± 1.12 ^a	MS, RI, S
106	2 311	2,4-双(1,1-二异丙基)苯酚	—	64.95 ± 14.96 ^a	44.89 ± 7.66 ^b	MS, RI
107	2 440	吡啶	3.79 ± 0.96 ^c	10.35 ± 3.42 ^a	7.07 ± 2.25 ^b	MS, RI
108	1 566	2-戊基吡啶	—	—	6.35 ± 1.17	MS, RI
		小计	18.57	194.76	115.18	
		总计	4 844.3	12 469.54	5 662.38	

注:基于质谱(MS)、保留指数(RI)及标品(S)鉴定;标“—”表示样品中未检测到该化合物;同一行不同字母表示存在显著性差异($P < 0.05$)。

2.5.2 OPLS-DA 分析处理 以检测出的化合物作为因变量,不同样品作为自变量进行 OPLS-DA 分析,自变量拟合指数(R^2X)为 0.946,因变量拟合指数(R^2Y)为 0.991,模型预测指数(Q^2)为 0.985, R^2 和 Q^2 都超过 0.5,表示模型拟合结果可接受。如图 2a 所示,3 个样品的挥发性组成区分较好。

通过变量重要性投影(VIP, Variable impor-

tance projection)分析,如图 2b,从中筛选出了 23 个区分 3 个样品的标志物(VIP>1),包括美拉德反应化合物 5 种:乙偶姻、四氢吡喃-2-酮、4-羟基丁酸、1-羟基-2-丙酮、2,3-丁二醇;脂质氧化化合物 18 种:己醛、壬醛、戊醛、(Z)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、庚醛、2,3-辛二酮、1-己醇、1-戊醇、3-戊烯-2-醇、1-辛烯-3-醇、十四酸、己酸、辛

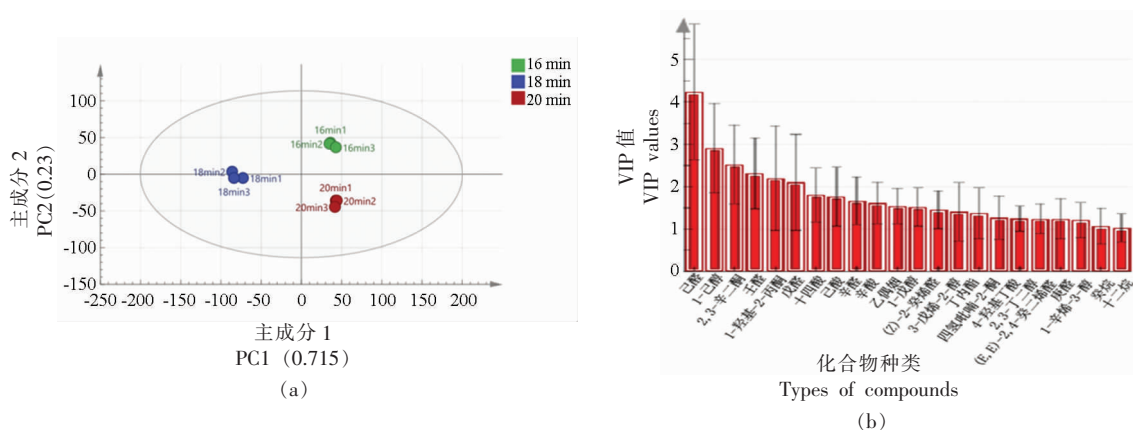


图 2 不同烤制时间鸡翅挥发性成分 OPLS-DA 得分图及 VIP>1 化合物图

Fig.2 Score plots and VIP>1 compound plots during OPLS-DA analysis of the volatile compounds identified in the roasted chicken wings at different roasting times using solvent assisted flavor evaporation and gas chromatography-mass spectrometry (SAFE/GC-MS) analysis

醛、辛酸、丁内酯、癸烷、十二烷。表明 3 个不同烤制时间样品的挥发性组成差异,与所发生的美拉德反应和脂质氧化程度不同有关。其中,20 min 样品中,除了四氢吡喃-2-酮外,其余美拉德反应化合物(乙偶姻、4-羟基丁酸、1-羟基-2-丙酮、2,3-丁二醇)的含量均高于在另两个样品中,表明 20 min 样品烤制时间长时,其与另两个样品的挥发性组成的差异更多地源于美拉德反应。

2.6 SAFE/GC-O 分析结果

2.6.1 化合物鉴定分析

采用 SAFE/GC-O 从 3 个样品中共检出 56 个气味活性区,鉴定出 56 个气味活性化合物,包括醛类、醇类、酮类、酯类、酸类、含硫化合物、含氮杂环、含氧杂环等,3 个样品 SAFE/GC-O 鉴定出的化合物数量最多的为均醛类,其次为含硫化合物。相比之下,烤 16 min 样品中 49 种,烤 18 min 样品中 54 种,烤 20 min 样品中 48 种,即 18 min 样品中检测出的气味活性化合物最多,这可能是其感官评价烤鸡翅气味最强的原因。

稀释法分析中,化合物的稀释因子越高,表明其对于总体香气的贡献越大^[2]。对于 16 min 中稀释因子高($\log_2\text{FD} \geq 6$)的化合物为 11 种:3-(甲硫基)丙醛、己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、癸醛、(E)-2-壬烯醛、十一醛、(E)-2-十一烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、4,5-环氧-2(E)-癸烯醛、1-辛烯-3-酮、2-壬酮。18 min 中稀释因子高($\log_2\text{FD} \geq 6$)的化合物为 22 种:2-甲基-3-呋喃硫醇、3-(甲硫基)丙醛、2-乙酰基-2-噻唑啉、2,5-二甲基吡嗪、乙基

吡嗪、2,3-丁二酮、己醛、庚醛、辛醛、反-2-庚烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、癸醛、(E)-2-壬烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E)-2-十一烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、4,5-环氧-2(E)-癸烯醛、1-辛烯-3-酮、乙偶姻、2-壬酮、2-戊基呋喃、苯酚。烤 20 min 样品中稀释因子高($\log_2\text{FD} \geq 6$)的化合物为 19 种:3-(甲硫基)丙醛、2-乙酰基-2-噻唑啉、2,5-二甲基吡嗪、2-甲基丁醛、2,3-丁二酮、己醛、辛醛、(E)-2-辛烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、癸醛、(E)-2-壬烯醛、十一醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E)-2-十一烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、4,5-环氧-2(E)-癸烯醛、1-辛烯-3-酮、2-壬酮、 γ -壬内酯。以上这些稀释因子高的化合物,分别为 3 个不同烤制时间的烤鸡翅样品的重要气味活性物质,其中以烤 18 min 样品的数量最多,这进一步解释了其感官评价烤鸡肉气味最强的原因。

3 个样品稀释因子高($\log_2\text{FD} \geq 6$)的共同化合物为:3-(甲硫基)丙醛、己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、癸醛、(E)-2-壬烯醛、(E)-2-十一烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、4,5-环氧-2(E)-癸烯醛、1-辛烯-3-酮、2-壬酮。与本文 GC-O 检测结果类似,Shakoor 等^[10]采用 AEDA/GC-O 分析炸鸡胸肉中的香气物质,得到稀释因子高的化合物有己醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛。Fan 等^[13]采用 AEDA/GC-O 对北京油鸡鸡汤中的香气成分进行分析,检测出己醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、3-(甲硫基)丙醛等稀释因子高的化合物。

表 6 SAFE/GC-O 分析不同烤制时间鸡翅鉴定的气味活性化合物

Table 6 Odor-active compounds identified in the roasted chicken wings at different roasting times using solvent assisted flavor evaporation and gas chromatography-olfactometry (SAFE/GC-O) analysis

序号	RI	化合物	气味描述词	$\log_2\text{FD}$			鉴定方式
				16 min	18 min	20 min	
来源于美拉德反应化合物							
含硫化合物(9种)							
1	1 030	噻吩	烤香、焦香	3	3	5	O,RI
2	1 092	二甲基二硫醚	葱香、肉味	2	3	—	MS,O,RI
3	1 351	2-甲基-3-呋喃硫醇	肉香	—	6	5	O,RI
4	1 422	3-甲硫基丙醛	土豆	6	9	8	MS,O,RI
5	1 718	2-乙酰基-2-噻唑啉	米饭、烤香	4	6	6	O,RI
6	1 981	苯并噻唑	肉香	0	1	—	MS,O,RI
7	2 089	双(2-甲基-3-呋喃基)二硫	肉香	—	5	—	O,RI
8	2 466	4-甲基-5-噻唑乙醇	肉香、烤香	2	2	1	O,RI

(续表 6)

序号	RI	化合物	气味描述词	log ₂ FD			鉴定方式
				16 min	18 min	20 min	
9	911	2-甲基噻吩 含氮杂环(3种)	肉香、烤香	2	—	—	O,RI
10	1 119	2-甲基吡嗪	焦香、烤香	—	1	0	MS,O,RI,S
11	1 315	2,5-二甲基吡嗪	烤香	2	6	6	O,RI
12	1 602	乙基吡嗪 含氧杂环(2种)	炒瓜子	3	6	4	O,RI,S O,RI
13	1 446	糠醛	焦糖、烤面包	—	3	4	O,RI
14	2 016	2-乙酰基吡咯 醛(3种)	烤香、芝麻	3	0	—	O,RI
15	934	2-甲基丁醛	坚果、巧克力味	3	4	6	MS,O,RI
16	1 014	3-甲基丁醛	水果香	—	1	3	MS,O,RI,S
17	1 768	苯乙醛 酮(1种)	花香	1	2	3	MS,O,RI
18	966	2,3-丁二酮 来源于脂质氧化化合物 醛(21种)	酸奶	3	8	6	O,RI
19	851	丙烯醛	药草	0	2	5	O,RI
20	990	戊醛	青香	2	4	2	MS,O,RI
21	1 072	己醛	青香	7	9	6	MS,O,RI,S
22	1 088	2-甲基-2-丁烯醛	青香、坚果	3	—	—	MS,O,RI
23	1 167	庚醛	青香、油脂香	0	7	4	MS,O,RI,S
24	1 268	辛醛	青香、柑橘	4	8	6	MS,O,RI,S
25	1 220	反-2-己烯醛	香菜	—	3	5	MS,O,RI
26	1 347	壬醛	青香、金属	3	3	4	MS,O,RI,S
27	1 366	(E)-2-庚烯醛	青香、油脂	5	6	5	MS,O,RI,S
28	1 406	(E)-2-辛烯醛	青香、花香	3	5	6	MS,O,RI,S
29	1 478	(E,E)-2,4-庚二烯醛	香菜、脂肪	7	7	6	MS,O,RI,S
30	1 507	癸醛	臭虫味、油脂	7	6	7	MS,O,RI,S
31	1 557	(E)-2-壬烯醛	青香、脂肪	6	6	7	MS,O,RI,S
32	1 582	苯甲醛	杏仁	2	4	4	MS,O,RI,S
33	1 621	十一醛	青香、油脂	6	5	6	MS,O,RI,S
34	1 638	(E)-2-癸烯醛	青香、油脂	3	3	—	MS,O,RI,S
35	1 669	(E,E)-2,4-壬二烯醛	青香、油脂	3	7	6	MS,O,RI,S
36	1 727	(E)-2-十一烯醛	油脂、肥皂	6	7	6	MS,O,RI,S
37	1 772	(E,E)-2,4-癸二烯醛	煎脂肪香	7	7	8	MS,O,RI,S
38	1 951	十三醛	脂肪香	—	2	—	MS,O,RI
39	1 971	4,5-环氧-2(E)-癸烯醛 酮(4种)	金属	7	9	6	MS,O,RI,S
40	1 045	2,3-戊二酮	酸奶	2	3	1	O,RI
41	1 317	1-辛烯-3-酮	蘑菇	7	9	6	MS,O,RI
42	1 331	乙偶姻	酸奶	3	6	4	MS,O,RI
43	1 414	2-壬酮 醇(1种)	奶香	6	7	6	MS,O,RI,S
44	1 901	苯乙醇 酸(2种)	花香	3	3	3	MS,O,RI,S
45	1 800	己酸	酸臭	2	3	2	MS,O,RI,S
46	2 352	癸酸	臭味、汗味	3	3	4	MS,O,RI,S

(续表 6)

序号	RI	化合物	气味描述词	log ₂ FD			鉴定方式
				16 min	18 min	20 min	
酯(5种)							
47	1 881	γ-辛内酯	奶香、清甜	0	3	2	MS,O,RI,S
48	1 986	γ-壬内酯	焦糖	3	4	6	MS,O,RI,S
49	2 116	γ-癸内酯	奶油、甜	0	2	2	MS,O,RI
50	2 208	δ-癸内酯	奶油、甜	2	4	3	MS,O,RI
51	2 287	γ-十一内酯	奶油、甜	3	4	2	MS,O,RI
呋喃类(1种)							
52	1 217	2-戊基呋喃	青香	3	6	5	MS,O,RI,S
其它(4种)							
53	2 027	对甲酚	酚味、药味	2	3	2	MS,O,RI,S
54	2 074	苯酚	酚味、药味	3	6	5	MS,O,RI
55	2 503	香兰素	甜香、花香	1	3	1	O,RI
56	2 429	3-甲基吡啶	粪臭	0	1	1	O,RI

注:基于质谱(MS)、嗅闻气味(O)、保留指数(RI)及标品(S)鉴定;标“—”表示样品中未嗅闻到该化合物。

2.6.2 OPLS-DA 分析 SAFE/GC-O 鉴定香气成分

对 SAFE/GC-O 结果进行 OPLS-DA 分析,检测的化合物作为自变量,不同样品作为因变量,自变量拟合指数(R_2X)为 0.97,因变量拟合指数(R^2Y)为 0.99,模型预测指数(Q^2)为 0.99,如图 3a,3 个样品的气味活性化合物组成得到了较好区分。

如图 3b,OPLS-DA 分析筛选出了 27 个区分 3 个样品气味活性化合物组成的重要化合物 (VIP>1),包括美拉德反应化合物 12 个:2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、2,3-丁二酮、糠醛、3-(甲硫基)丙醛、二甲基二硫醚、2-甲基-3-呋喃硫醇、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫、2,5-二甲基吡嗪、2-乙酰基吡咯、乙基吡嗪、3-羟基-2-丁酮;脂质氧化化合物 14 个:庚醛、丙烯醛、反-2-己烯醛、(E)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、辛醛、己醛、4,5-环氧-2(E)-癸烯醛、1-辛烯-3-酮、γ-壬内酯、(E)-2-辛烯醛、2-甲基-2-丁烯醛、γ-辛内酯、2-戊基呋喃;其它来源化合物 1 个:苯酚。

上述 VIP>1 的化合物中,有 4 个化合物 (3-(甲硫基)丙醛、己醛、4,5-环氧-2(E)-癸烯醛、1-辛烯-3-酮)在 16 min 样品中的稀释因子高于另两样品,有 12 个化合物(2,3-丁二酮、3-(甲硫基)丙醛、2-甲基-3-呋喃硫醇、2,5-二甲基吡嗪、乙基吡嗪、庚醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、辛醛、己醛、4,5-环氧-2(E)-癸烯醛、1-辛烯-3-酮、2-戊基呋喃)在 18 min 样品中的稀释因子高于另两样品,

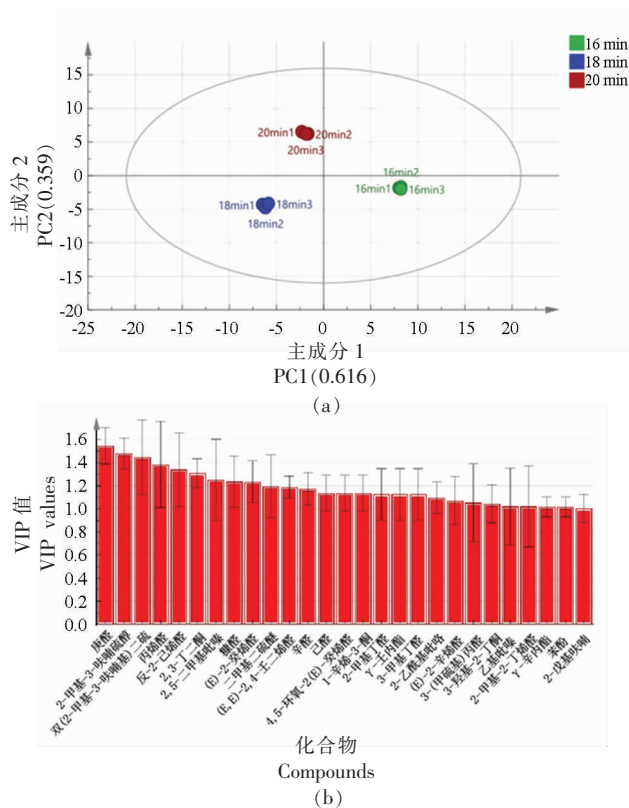


图 3 OPLS-DA 分析烤制不同时间鸡翅中检测的气味活性化合物的得分图及 VIP>1 化合物图

Fig.3 Scores plots and VIP>1 plots during OPLS-DA analysis of the odor-active compounds identified using solvent assisted flavor evaporation and gas chromatography-olfactometry (SAFE/GC-O) analysis in the roasted chicken wings at different roasting times

有10个化合物(2-甲基丁醛、2,3-丁二酮、3-(甲硫基)丙醛、2,5-二甲基吡嗪、(E,E)-2,4-壬二烯醛、辛醛、己醛、4,5-环氧-2(E)-癸烯醛、1-辛烯-3-酮、 γ -壬内酯)在20 min样品中的稀释因子高于另两样品。即筛选出的VIP>1的化合物中,18 min样品有数量最多的稀释因子高的化合物,这进一步解释了18 min样品香气最强的原因。

3 结论

随烤制时间从16 min增长到20 min,烹饪损失升高,脂质氧化及蛋白氧化程度增大,脂肪酸、氨基酸营养指标呈现先增加后下降,烤鸡肉风味呈现先增强后减弱。烤16,18,20 min 3个样品相比,烤18 min样品的烤鸡翅风味最浓郁及颜色、口感、脂肪酸、氨基酸等营养指标均最好。SAFE/GC-MS分析从3个样品中共鉴定出108个挥发性化合物,烤18 min样品鉴定的挥发性化合物个数及总含量均最多,OPLS-DA分析显示乙偶姻、四氢吡喃-2-酮、己醛、壬醛、戊醛、(Z)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、十四酸、己酸、丁内酯、癸烷等23个化合物为区分3个样品挥发性组成的重要化合物。SAFE/GC-O分析3个样品共鉴定出56个气味活性化合物,烤18 min鸡翅样品的气味活性物质数量及稀释因子高($\log_2FD \geq 6$)的物质的数量均最多。OPLS-DA分析显示2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、2,3-丁二酮、糠醛、3-(甲硫基)丙醛、二甲基二硫醚、2-甲基-3-呋喃硫醇、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫、2,5-二甲基吡嗪、2-乙酰基吡咯、乙基吡嗪、庚醛、(E)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、辛醛、1-辛烯-3-酮、 γ -壬内酯等27个化合物是区分3个样品气味活性化合物组成的重要化合物,其中18 min样品有数量最多的VIP>1化合物,且稀释因子高的化合物数量大于在16,20 min的样品中。以上挥发性风味物质组成分析,解释了18 min样品烤鸡肉风味最强的原因。基于VIP>1的化合物产生来源可知,脂质氧化反应和美拉德反应程度不同是造成3个样品感官风味差异的主要原因,而控制适宜的烤制时间(18 min),使脂质氧化和美拉德反应程度适中,有利于获得感官品质较好的烤鸡翅产品。

参 考 文 献

- [1] 郑麦青. 2022年全国肉鸡生产信息统计监测报告[J]. 中国禽业导刊, 2023, 40(1): 32-34.
ZHENG M Q. 2022 National broiler production information statistical monitoring report[J]. Guide to Chinese Poultry, 2023, 40(1): 32-34.
- [2] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review[J]. Food Research International, 2022, 157: 111385.
- [3] SHABBIR M A, RAZA A, ANJUM F M, et al. Effect of thermal treatment on meat proteins with special reference to Heterocyclic Aromatic Amines (HAAs)[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 55(1): 82-93.
- [4] WANG S W, CHEN H T, SUN J, et al. Effects of cooking methods on aroma formation in pork: A comprehensive review[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100884.
- [5] KHALID W, MAGGIOLINO A, KOUR J, et al. Dynamic alterations in protein, sensory, chemical, and oxidative properties occurring in meat during thermal and non-thermal processing techniques: A comprehensive review[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 9: 1057457.
- [6] 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.
- [7] 王永瑞, 柏霜, 罗瑞明, 等. 焙烤对宁夏滩羊肉脂肪酸、氨基酸及核苷酸含量的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 289-302.
WANG Y R, BAI S, LUO R M, et al. Effect of roasting time on the content of fatty acids, amino acids and nucleotides of Tan mutton from Ningxia[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11): 289-302.
- [8] 周亚军, 翟时敏, 管雪, 等. 烤制条件对人参烤鸡食用品质及风味物质的影响[J]. 农产品加工, 2023(17): 1-8, 11.
ZHOU Y J, ZHAI S M, GUAN X, et al. Effects of roasting conditions on food quality and flavor components of ginseng roast chicken[J]. Farm Products Processing, 2023(17): 1-8, 11.

- [9] 王嘉楠, 刘洋, 李凯旋, 等. 炸鸡翅营养组成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 J N, LIU Y, LI K X, et al. Analysis of changes in nutritional compositions and key aroma compounds in chicken wings after frying[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(2): 142-155.
- [10] SHAKOOR A, PEI Z Y, AL-DALALI S, et al. Unveiling improval changes in fried chicken flavor by glucose-curing treatment based on molecular sensory science[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 124: 105697.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] XU S Q, LIANG M, LIU B S, et al. Investigation on key odorants in braised chicken thigh meat and their changes during storage[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 114: 104765.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品中脂肪酸的测定: GB 5009.168-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, National Medical Products Administration. Determination of fatty acids in foods: GB 5009.168-2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
- [16] 刘洋, 李凯旋, 王金花, 等. 两种方式电烤箱烤鸭腿肉的营养品质与风味物质比较[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 316-326.
LIU Y, LI K X, WANG J H, et al. Comparison of nutritional quality and volatile flavor compounds of duck leg meat roasted by electric oven with two roasting methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 316-326.
- [17] 王晶, 孔保华. 玉米蛋白抗氧化肽的制备及其在熟肉糜中的应用[J]. 肉类研究, 2009(11): 42-47.
WANG J, KONG B H. Preparation of corn protein antioxidant Peptide and its application in cooked pork patties[J]. Meat Research, 2009(11): 42-47.
- [18] OLIVER C N, AHN B W, MOERMAN E J, et al. Age-related changes in oxidized proteins[J]. Journal of Biological Chemistry, 1987, 262(12): 5488-5491.
- [19] JUNG S, NAM K C, JO C. Detection of malondialdehyde in processed meat products without interference from the ingredients[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 90-94.
- [20] 翟晓虎, 杨海锋, 陈慧英, 等. 丙二醛的毒性作用及检测技术研究进展[J]. 上海农业学报, 2018, 34(1): 144-148.
ZHAI X H, YANG H F, CHEN H Y, et al. Research progress in the toxicity and determination technology of malondialdehyde[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2018, 34(1): 144-148.
- [21] 赵冰, 赵顺亮, 李素, 等. 脂肪氧化对肌原纤维蛋白氧化及其结构和功能性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 40-46.
ZHAO B, ZHAO S L, LI S, et al. Effect of lipid oxidation on myofibrillar protein oxidation, structure and functional characteristics[J]. Food Science, 2018, 39(5): 40-46.
- [22] SABIKUN N, BAKHSH A, ISMAIL I, et al. Changes in physicochemical characteristics and oxidative stability of pre- and post-rigor frozen chicken muscles during cold storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(11): 4809-4816.
- [23] QU C, HE Z F, WANG Z M, et al. Effects of NaCl content and drying temperature on lipid oxidation, protein oxidation, and physical properties of dry-cured chicken[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(6): 1651-1660.
- [24] COSTA FILHO D V, ROCHA T C D, CARVALHO J M D, et al. Oxidative stability of white striping chicken breasts: Effect of cold storage and heat treatments[J]. Poultry Science, 2023, 102(8): 102826.
- [25] SILVA F A P, FERREIRA V C S, MADRUGA M S, et al. Effect of the cooking method (grilling, roasting, frying and sous-vide) on the oxidation of thiols, tryptophan, alkaline amino acids and protein

- cross-linking in jerky chicken [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(8): 3137–3146.
- [26] 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.
- [27] LIU H, LI J Y, ZHANG D Q, et al. The effect of thermal times of circulating non-fried roast technique on the formation of (non) volatile compounds in roasted mutton by multi-chromatography techniques and heat transfer analysis[J]. *Food Research International*, 2023, 174: 113567.
- [28] 赵健, 赵梦瑶, 梁晶晶, 等. 猪骨炖煮香气物质的分析鉴定[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(1): 204–212.
- ZHAO J, ZHAO M Y, LIANG J J, et al. Characterization of the aroma compounds generated from stewing pig spine[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(1): 204–212.
- [29] 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.
- [30] HOU L, XIE J C, ZHAO J, et al. Roles of different initial Maillard intermediates and pathways in meat flavor formation for cysteine-xylose-glycine model reaction systems[J]. *Food Chemistry*, 2017, 232: 135–144.
- [31] XU Y X, WANG R, ZHAO H L, et al. Effect of heat treatment duration on the interaction between fish myosin and selected flavor compounds[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(12): 4457–4463.
- [32] ZHANG L, BADAR I H, CHEN Q, et al. Changes in flavor, heterocyclic aromatic amines, and quality characteristics of roasted chicken drumsticks at different processing stages[J]. *Food Control*, 2022, 139: 109104.
- [33] LONG M X, LIU M, LI Y F, et al. Analysis of flavor compounds in marinated chicken wings after irradiation and natural antioxidant (phytic acid and tea polyphenols) treatment[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2021, 17(10): 783–794.
- [34] ZHOU H, CUI W, GAO Y F, et al. Analysis of the volatile compounds in Fuliji roast chicken during processing and storage based on GC-IMS [J]. *Current Research in Food Science*, 2022, 5: 1484–1493.

Differences in Physicochemical Characteristics and Volatile Flavor Composition for Roasted Chicken Wings at Different Roasting Times

Wang Xuan¹, Hu Qingqing¹, He Jinxin¹, Pei Zhaoyang¹, Xu Yuxia¹, Wang Jinhua², Xie Jianchun^{*}

¹*School of Light Industry Science and Engineering, School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048*

²*Guangdong Midea Kitchen Appliances Manufacturing Co., Ltd., Foshan 528311, Guangdong*

Abstract To explore the effect of roasting time on quality and flavor of the roasted chicken wings, three chicken wing samples roasted in electric oven for 16, 18, and 20 minutes were analyzed by sensory evaluation and determination of fatty acids and amino acids, thiobarbituric acid reaction substances (TBARS), protein carbonyl content, and volatile flavor composition. The results showed that with the extension roasting time, the fatty acid content first increased from 13.00 to 17.41 mg/g and then decreased to 10.52 mg/g. The amino acid content first increased from 10.60 to 11.71 g/100 g and then decreased to 10.8 g/100 g. The TBARS value increased from 1.71 to 4.73 mg/kg, and the protein carbonyl content increased from 7.69 to 15.61 nmol/mg. In contrast, the chicken wings roasted for 18 min possessed the best sensory flavor and the optimal nutritional indexes, represented by 36.01% of polyunsaturated fatty acids and 43.38% of essential amino acids among total. In comparison, the chicken wings roasted for 18 minutes possessed the best sensory flavor and optimal nutritional indexes indicated by the percentage of polyunsaturated fatty acids in total fatty acids and that of essential amino acids in total amino acids. A total of 108 volatile compounds were identified using solvent assist-

ed flavor evaporation/gas chromatography–mass spectrometry analysis (SAFE/GC–MS). Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS–DA) according to VIP>1 (variable importance projection above 1) showed that acetoin, tetrahydropyran–2–one, 4–hydroxybutyric acid, 1–hydroxy–2–acetone, etc. formed from the Maillard reaction, and hexanal, nonanal, pentanal, (*Z*)–2–decenal, (*E,E*)–2,4–decadienal, heptanal, 2,3–octedione, etc. formed from the lipid oxidation played significant roles in differentiation of volatile compositions of the three samples. SAFE combined with aroma extract dilution analysis/gas chromatography–olfactometry analysis (SAFE/AEDA/GC–MS) identified 56 odor active compounds in the three samples, while the 18 minute–roasted chicken wings had the highest number. Those with high dilution factors ($\log_{10}FD \geq 6$) in common in the three samples included 3–(methylthio)propanal, hexanal, (*E,E*)–2,4–heptadienal, decanal, (*E*)–2–nonenal, (*E*)–2–undecenal, (*E,E*)–2,4–decadienal, 4,5–epoxy–2(*E*)–decanal, 1–octen–3–one, and 2–nonenone. OPLS–DA analysis according to (VIP>1) showed that 12 compounds via the Maillard reaction, including 2–methylbutanal, 3–methylbutanal, 2,3–butanedione, furfural, 3–(methylthio)propanal, dimethyl disulfide, 2–methyl–3–furanthiol, 2,5–dimethylpyrazine, etc. and 14 compounds via the lipid oxidation, including heptanal, propenal, trans–2–hexenal, (*E*)–2–decenal, (*E,E*)–2,4–nonadienal, octanal, hexanal, 4,5–epoxy–2(*E*)–decenenal, etc. played key roles in differentiation of compositions of the odor active compounds of the three samples. The work can provide guidance to select cooking technologies for roasted chicken wings with an optimal quality and flavor.

Keywords roasted chicken wings; protein oxidation; fatty acids; amino acids; volatile compounds; odor active compounds