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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010040
LIU Yang, LI Kaixuan, WANG Jinhua, 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010040

· 分析检测 ·

# 两种方式电烤箱烤鸭腿肉的营养品质与风味物质比较

刘　洋[1], 李凯旋[1], 王金花[2], 王嘉楠[1], 谢建春[1,*]
（1.老年营养与健康教育部重点实验室, 北京工商大学轻工科学技术学院, 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:** 为探究烤制方式对电烤箱烤鸭腿肉品质的影响，采用直接烤、包锡纸烤两种方式烤制鸭腿肉，分析比较两种烤鸭腿肉的感官特性、烹饪损失、脂肪酸和氨基酸组成及挥发性风味构成。结果表明：直接烤制的鸭腿肉烤香味好、烹饪损失高；包锡纸烤肉更嫩，烹饪损失低。两种方式烤制后肉的脂肪酸和氨基酸含量均增加，而直接烤制方式的营养指标（多不饱和脂肪酸/饱和脂肪酸值、必需氨基酸/总氨基酸值）相对更好。采用顶空固相微萃取/气相色谱-质谱联用分析两烤鸭腿肉，共鉴定出 44 种挥发性化合物，从直接烤样品中检测到的醛类、醇类、酮类等挥发性化合物均多于包锡纸烤样品。正交偏最小二乘判别数据分析显示十六碳醛、辛醛、十四碳醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、戊醛、己醛等（VIP>1）可作为区分两样品挥发性组成的标志性化合物。采用稀释法气相色谱-嗅闻分析共鉴定出 22 种气味活性化合物，数量最多的为醛类化合物，其次为含硫类、吡嗪类化合物。两样品的气味活性化合物种类类似，但具有不同的稀释因子。选择稀释因子高且有代表性气味特征的化合物绘制雷达图比较，得到与感官评价一致的结果，即直接烤制样品的风味和谐，烤肉香和脂肪香突出。

**关键词:** 电烤箱, 烤鸭腿, 营养指标, 烹饪损失, 挥发性风味物质, 气相色谱-嗅闻
**中图分类号:** TS251.5+5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2023)21−0316−11
**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2023010040
本文网刊:

# Comparison of Nutritional Quality and Volatile Flavor Compounds of Duck Leg Meat Roasted by Electric Oven with Two Roasting Methods

**LIU Yang[1], LI Kaixuan[1], WANG Jinhua[2], WANG Jianan[1], XIE Jianchun[1,*]**
（1.Key Laboratory of Geriatric Nutrition and Health, School of Light Industry, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
2.Guangdong Midea Kitchen Appliances Manufacturing Co., Ltd., Foshan 528311, China）

**Abstract:** The present work was to compare quality differences of the duck leg roasted with or without tinfoil paper wrapping using electric oven. The sensory characteristics, cooking loss, fatty acids, amino acids, and volatile flavor composition in the meat of the two roasted duck leg samples were analyzed. In comparison, the duck leg roasted without tinfoil paper wrapping had greater roasted aroma and cooking loss, while that with paper wrapping was more tender and had lower cooking loss. No matter with or without tinfoil paper wrapping, both fatty acid contents and amino acid contents in the meat were increased after roasting. The sample roasted without tinfoil paper wrapping had higher values in polyunsaturated fatty acids content to saturated fatty acids content (PUFA/SFA) and essential amino acid content to total amino acid content (EAA/TAA). Head-space solid phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME/GC-MS) analysis identified in total 44 volatile compounds in the two samples while those like aldehydes, alcohols,

**收稿日期:** 2023−01−10
**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）。
**作者简介:** 刘洋（1998−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: ly417281@163.com。
*** 通信作者:** 谢建春（1967−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: xjchun@th.btbu.edu.cn。

ketones, etc. had greater amounts in the sample roasted without tinfoil paper wrapping. Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) suggested that hexadecanal, octanal, tetradecanal, (E,E)-2,4-decadienal, pentanal, hexanal, etc. (VIP>1) could be markers to differentiate volatile flavor composition of the two samples. Moreover, gas chromatography-olfactometry of aroma extract dilution analysis (AEDA/GC-O) identified 22 odor-active compounds (i.e. odorants) in the two samples with aldehydes being the highest number followed by sulfur-containing compounds and pyrazines. Overall, the odor-active compounds found by GC-O were similar in the two samples whereas they had different flavor dilution factors. Then aroma profile of the two samples was compared by radar charts based on the compounds of higher dilution factors representing the roasted duck leg odors. It suggested harmonious and more prominent roasted and fatty aromas pertaining to the sample without tinfoil paper wrapping, which agreed with the sensory analysis results.

**Key words**: electric oven; roasted duck leg; nutritional index; cooking loss; volatile flavor compounds; gas chromatography-olfactometry (GC-O)

鸭肉因其营养价值高、多汁柔软的口感和独特的风味深受消费者喜爱[1]。据不完全统计，在我国肉鸭的年出栏量约 42 亿只，居世界首位，鸭肉总产量占肉类总量的 12.50%[2]。肉在烹饪过程中发生复杂的物理化学变化。烹饪方式对于肉的风味及氨基酸、脂肪酸等营养指标有重要影响。Yu 等[3] 比较了煮、炸、烤三种方式烹饪的云南瓢鸡肉，发现烤制的肉中油酸含量及游离氨基酸总含量均最高，风味物质 3-甲硫基丙醛、苯甲醛、丙酮、2-丁酮、γ-丁内酯、2-乙基呋喃的含量最高。由于鸭肉中的磷脂易氧化产生令人不悦的腥味[4−5]，因此鸭肉多以烤制为主。鸭肉的传统烤制已有六百多年历史，至今形成了北京烤鸭、南京烤鸭和广式烧鸭几种烤鸭制品。根据加工方式的不同，传统方式烤鸭主要分为挂炉烤鸭和焖炉烤鸭两大流派。对于传统烤鸭的挥发性风味物质分析已有一些报道，Liu 等[6] 采用顶空固相微萃取/气相色谱-嗅闻-质谱联用仪（HS-SPME/GC-O-MS）分析传统挂炉烤鸭鸭胸肉的风味，鉴定出糠硫醇、二甲基三硫、3-甲硫基丙醛、己醛等物质。蒋平香等[7] 采用 HS-SPME/GC-MS 分析发现（E,E）-2,4-壬二烯醛、己醛、1-庚醇、1-辛烯-3-醇、苯甲醛等为广式烧鸭不同加工阶段的特征性挥发性成分。刘欢等[8] 采用 HS-SPME/GC-O-MS 分析北京烤鸭腿肉，检测出关键挥发性风味物质为糠硫醇、二甲基三硫、3-甲硫基丙醛、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、（E,E）-2,4-癸二烯醛与 1-辛烯-3-醇。

传统方式烤鸭具有制作周期长、污染环境、食品安全性不高等缺点[9−10]。而电烤箱烤制因其安全、无污染、方便快捷等优势，越来越受到人们的青睐[11]。本实验使用电烤箱采用两种方式（直接烤、包锡纸烤）烤制鸭腿，比较了二者烤制后肉的脂肪酸、氨基酸组成营养指标，采用 HS-SPME/GC-MS、GC-O 分析了二者的挥发性风味物质构成差异。研究结果对于发展新型的电烤箱烤鸭技术具有指导意义。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

鸭腿（樱桃谷鸭，45 天日龄，冷链运输，−18 ℃ 冷冻保存）　正大食品公司；二氯甲烷、$C_5$~$C_{29}$ 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；噻吩、2-甲基-3-呋喃硫醇、糠硫醇、2,4,5-三甲基噻唑、3-甲硫基丙醛、2-乙酰基-2-噻唑啉、苯并噻唑、双（2-甲基-3-呋喃基）二硫、2,6-二甲基吡嗪、己醛、壬醛、（E,E）-2,4-庚二烯醛、苯甲醛、（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、1-辛烯-3-醇、2,5-二甲基-4-羟基-3-呋喃酮、对甲酚（纯度均≥95%）、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。

锡纸（20m×40 cm 厚度 0.0125 μm）　太仓市鑫铭塑料制品有限公司；萃取纤维 DVB/CAR/PDMS（2 cm, 50/30 μm）　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；AT4516 多路温度测试仪　常州安柏精密仪器有限公司；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。

### 1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　将生鸭腿解冻，擦干表面水分，放于烤盘中，鸭腿用锡纸包裹好或不包裹，按照实验设计条件进行烤制，即设置烤箱温度 230 ℃，烤制时间 40 min。称量、计算烹饪损失并进行感官评价；去除骨和皮，取鸭腿瘦肉部分，液氮冷冻下搅碎成肉泥，备用。

按如下公式计算烹饪损失：

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

式中：$m_1$ 表示生鸭腿的质量（g）；$m_2$ 表示烤制后鸭腿的质量（g）。

1.2.2　感官评价　感官评价小组由 8 位食品风味领域研究生（6 女、2 男）组成，均有一年以上的肉制品感官评定经验，经感官评价小组评价样品及讨论，确

定四个代表性感官属性描述词: 烤肉味、腥味、蒸煮味、口感(肉嫩、不柴), 对各感官属性按照满分 5 分进行口尝打分, 结果取平均值, 每次评价前用温水漱口, 打分标准如表 1 所示。

表 1 感官评价计分标准

Table 1 Standard for sensory evaluation

| | 分数 | 烤肉味 | 腥味 | 蒸煮味 | 口感 |
|---|---|---|---|---|---|
| 评分标准 | 0~1 | 烤肉味弱 | 腥味弱 | 蒸煮味弱 | 肉硬、柴 |
| | 2~3 | 烤肉味较强 | 腥味较强 | 蒸煮味较强 | 肉较嫩、较柴 |
| | 4~5 | 烤肉味强 | 腥味强 | 蒸煮味强 | 肉嫩、不柴 |

1.2.3 脂肪酸分析 脂肪提取及含量测定: 参考国标 GB 5009.168-2016 进行[12]。称取 1.2.1 中的样品 4 g 置于圆底烧瓶中, 加入 20 mL 二氯甲烷-甲醇溶液($V_1$:$V_2$=2:1), 25 ℃ 超声提取(功率 70%)15 min, 用滤纸滤出提取液, 重复上述操作三次, 合并提取液并旋转蒸发至干, 得到脂肪样品, 称量。

脂肪酸衍生化: 参考 GB 5009.168-2016 的方法[12]。向圆底烧瓶中加入 2 mL 内标十三烷酸甲酯(5 mg/mL), 再加入 4 mL 异辛烷和 100 μL 氢氧化钾-甲醇溶液(2 mol/L), 猛烈振摇溶解。再加入 1 g 无水硫酸氢钠, 猛烈振摇, 静置 10 min, 取上清液进行 GC-MS 分析。

GC 条件: HP-5MS 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm); 升温程序: 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 μL; 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 ℃; 辅助加热线温度 250 ℃; 四级杆温度 150 ℃; 全扫描模式; 扫描质量范围 33~450 amu。

通过检索 NIST 11 谱库及进样标品鉴定脂肪酸甲酯。脂肪酸甲酯含量按如下公式计算, 脂肪酸甲酯与脂肪酸之间的转化系数参照 GB 5009.168-2016[12]。

$$x_i = 100 \times \frac{A_i C_s V}{A_s m} \times F$$

式中: $x_i$ 表示脂肪酸含量(mg/g); $A_i$ 表示脂肪酸酯峰面积; $A_s$ 表示内标十三烷酸甲酯的峰面积; V 表示加入内标十三烷酸甲酯的体积(mL); $C_s$ 表示十三烷酸甲酯的浓度(mg/mL); m 表示肉的质量(mg); F 表示脂肪酸甲酯转化为脂肪酸的系数。

1.2.4 总氨基酸分析 氨基酸提取: 参考 GB 5009.124−2016 进行[13]。称取 1.2.1 中的样品 0.5 g 于 50 mL 耐压管中, 加入 25 mL(6 mol/L)盐酸, 置于烘箱中 110 ℃ 酸解 24 h, 使用滤纸滤出液体, 用去离子水定容至 50 mL, 备用。

氨基酸衍生化: 参考黄志等[14] 的方法, 取 100 μL 上述氨基酸提取液到进样瓶中, 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(MTBSTFA)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 条件: HP-5MS 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm); 升温程序: 起始温度 80 ℃, 保持 1 min, 以 20 ℃/min 升至 140 ℃, 再以 3.5 ℃/min 升至 290 ℃, 保持 15 min; 进样口温度 280 ℃; 载气 He; 流速 1.2 mL/min; 进样量 1 μL; 不分流模式进样。

MS 质谱条件: 电子轰击离子源(EI); 能量 70 eV; 离子源温度 230 ℃; 四级杆温度 150 ℃; 辅助加热线温度 250 ℃; 溶剂延迟 8 min; 选择离子扫描模式, 各氨基酸的扫描离子也参照黄志等[14] 的方法。

氨基酸含量计算: 配制混合氨基酸标准溶液, 进行系列稀释和气-质分析, 绘制峰面积与各氨基酸浓度的外标工作曲线($R^2$ 均达到 0.99 以上)。根据标准曲线计算样品中的各个氨基酸浓度(μg/mL),然后进一步计算得出肉中各氨基酸的含量(g/100 g 肉), 各氨基酸的标准曲线见表 2。

表 2 17 种氨基酸的标准曲线

Table 2 Calibration curves of 17 amino acids standards

| 氨基酸 | 线性方程 | $R^2$ |
|---|---|---|
| 丙氨酸Ala | $y=6.00\times10^{-5}x$ | 0.9967 |
| 甘氨酸Gly | $y=3.00\times10^{-6}x$ | 0.9980 |
| 缬氨酸Val | $y=6.00\times10^{-6}x$ | 0.9947 |
| 亮氨酸Leu | $y=2.10\times10^{-6}x$ | 0.9946 |
| 异亮氨酸Ile | $y=2.01\times10^{-6}x$ | 0.9946 |
| 脯氨酸Pro | $y=5.03\times10^{-1}x$ | 0.9958 |
| 蛋氨酸Met | $y=5.30\times10^{-3}x$ | 0.9977 |
| 丝氨酸Ser | $y=1.00\times10^{-4}x$ | 0.9940 |
| 苏氨酸Thr | $y=1.00\times10^{-5}x$ | 0.9999 |
| 苯丙氨酸Phe | $y=3.60\times10^{-3}x$ | 0.9941 |
| 天冬氨酸Asp | $y=2.56\times10^{-1}x$ | 0.9928 |
| 谷氨酸Glu | $y=7.00\times10^{-6}x$ | 0.9950 |
| 赖氨酸Lys | $y=6.00\times10^{-6}x$ | 0.9993 |
| 组氨酸His | $y=2.23\times10^{-1}x$ | 0.9924 |
| 酪氨酸Tyr | $y=2.00\times10^{-6}x$ | 0.9977 |
| 精氨酸Arg | $y=2.30\times10^{-3}x$ | 0.9993 |
| 半胱氨酸Cys | $y=1.40\times10^{-3}x$ | 0.9921 |

1.2.5 挥发性风味物质分析 HS-SPME 条件: 称取 2.0 g 样品于 20 mL 样品瓶中, 加入 2.5 g 水、0.5 g NaCl、3 μL 邻二氯苯内标(81.475 μg/mL, 溶剂二氯甲烷)混合均匀, 样品 65 ℃ 下预平衡 10 min, 再于该温度下萃取 40 min。

GC 条件: DB-WAX(30 m×0.25 mm×0.25 μm); 升温程序: 初始柱温 35 ℃, 保持 5 min, 以 2 ℃/min 升至 70 ℃, 以 3 ℃/min 升至 130 ℃, 再以 10 ℃/min 升至 230 ℃; 进样口温度 250 ℃, 载气(He)流速 1.0 mL/min, 不分流模式, 解吸 3 min。

MS 质谱条件: 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: 33~450 amu; 溶剂延迟 3 min。

在相同色谱条件下进样正构烷烃（$C_5$~$C_{29}$），RI 值计算公式如下：

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

式中：$t_n$ 和 $t_{n+1}$ 分别表示碳数为 n，n+1 的正构烷烃保留时间；$t_i$ 表示碳数在 n 和 n+1 之间出峰的化合物保留时间。

通过检索 NIST11 谱库、对比保留指数、进样标准品鉴定化合物。化合物含量计算如下：

$$m_i = \frac{\left( \frac{A_i}{A_0} \times C_0 \times V_0 \right)}{m}$$

式中：$m_i$ 表示化合物在肉中的含量（ng/g 肉）；$A_i$ 表示化合物的峰面积；$A_0$ 表示内标的峰面积；$C_0$ 表示内标的浓度（μg/mL）；$V_0$ 表示加入内标的体积（μL）；m 表示样品质量（g）。

1.2.6　GC-O 分析　HS-SPME 条件同上。GC-O 装置由 Agilent 7890A GC 及气味测量仪组成，毛细管柱为 DB-WAX（30 m×0.25 mm×0.25 μm），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，进样口温度 250 ℃，萃取纤维解吸 3 min。

采用稀释法（Aroma extract dilution analysis，AEDA）进行嗅闻分析，设置进样口分流比为不分流、2∶1、4∶1、8∶1、16∶1、32∶1、64∶1、128∶1，由三名评价人员进行嗅闻。基于 GC-MS 结果、对比保留指数、气味特征及进样标准品鉴定化合物。

### 1.3　数据处理

实验结果表示为平均值±标准偏差（n=2）。所有表格使用 Microsoft excel 2016 软件绘制。采用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件进行显著性差异（$P$<0.05），SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA）。雷达图采用 Origin 2021 软件绘制。

## 2　结果与分析

### 2.1　感官评价和烹饪损失

感官品质和烹饪损失是评价加工肉产品质量的重要指标。感官评分越高，则产品越容易被消费者接受；烹饪损失越大，表明烹饪产品的得率越低。由表 3 可见，与包锡纸烤制鸭腿相比，直接烤制鸭腿的烹饪损失高，为 36.89%。直接烤制时烹饪损失高，主要与烤制时汁液流出较多有关。Küçüközet 等[15] 使用烤箱直接烤制鸡腿，烹饪损失为 35.27%±3.92%，与本实验结果类似。相比之下，直接烤制鸭腿的烤肉味更强，而包锡纸烤制的鸭腿肉的烤肉味较弱、有蒸煮味和腥味较重、肉更嫩。

表 3　两种烤制方式鸭腿的感官评价和烹饪损失

Table 3　Sensory evaluation and cooking loss of duck leg with two roasting methods

| 烤制方式 | 感官评价 | | | | 烹饪损失(%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 烤肉味 | 腥味 | 蒸煮味 | 口感 | |
| 直接烤制 | 4.88 | 0.25 | 0.25 | 4.40 | 36.89±0.46 |
| 包锡纸烤制 | 3.25 | 2.65 | 2.38 | 4.75 | 32.29±1.32 |

### 2.2　脂肪酸分析结果

脂肪酸是肉的重要营养成分。为此，测定烤制前后鸭腿肉的脂肪酸组成，以评价鸭腿烤制后营养性变化。由表 4 可知，生鸭腿肉的脂肪含量为 3.23%，包锡纸烤制和直接烤制后，肉中脂肪含量分别为 4.93% 和 5.83%。生鸭腿肉中共检测出 12 种脂肪酸，含量最高的为油酸、其次为棕榈酸、亚油酸、硬脂酸、花生四烯酸，这与秦乐蓉等[16] 分析樱桃谷鸭胸肉的脂肪酸组成结果类似。与生鸭腿肉相比，采用两种方式烤制后，肉的脂肪含量和各个脂肪酸的含量均显著升高，且直接烤制升高幅度更大。鸭腿烤制后肉中脂肪酸组成变化主要与肉的失水[17]、热解的皮下脂肪向肉中迁移[6] 两方面有关。直接烤制时，烤制过程汁水损失大，烹饪损失大（表 3），故烤制后肉的脂肪含量以及各脂肪酸含量升高幅度更大。

表 4　烤制前后鸭腿肉的脂肪酸组成

Table 4　Composition of fatty acids in duck leg meat before and after roasting

| 组成成分 | 名称 | 生肉 | 直接烤制 | 包锡纸烤制 |
|---|---|---|---|---|
| 脂肪含量(%) | | 3.23±0.02$^c$ | 5.83±0.08$^a$ | 4.93±0.13$^b$ |
| 脂肪酸组成（mg/g肉） | 饱和脂肪酸（SFA） | | | |
| | 棕榈酸($C_{16:0}$) | 2.17±0.00$^c$ | 3.37±0.04$^a$ | 3.13±0.04$^b$ |
| | 硬脂酸($C_{18:0}$) | 1.09±0.03$^c$ | 2.24±0.08$^a$ | 1.93±0.02$^b$ |
| | 花生酸($C_{20:0}$) | – | 0.03±0.00$^a$ | 0.02±0.01$^a$ |
| | 小计 | 3.26±0.01$^c$ | 5.64±0.12$^a$ | 5.09±0.03$^b$ |
| | 单不饱和（MUFA） | | | |
| | 棕榈油酸($C_{16:1}$) | 0.16±0.01$^c$ | 0.60±0.01$^a$ | 0.29±0.01$^b$ |
| | 油酸($C_{18:1}$) | 2.84±0.02$^c$ | 6.63±0.03$^a$ | 4.28±0.13$^b$ |
| | 二十碳烯酸($C_{20:1}$) | 0.02±0.00$^c$ | 0.11±0.02$^a$ | 0.06±0.01$^b$ |
| | 小计 | 3.03±0.02$^c$ | 7.34±0.04$^a$ | 4.63±0.11$^b$ |
| | 多不饱和脂肪酸(PUFA) | | | |
| | 亚油酸($C_{18:2}$) | 1.77±0.02$^b$ | 2.58±0.04$^a$ | 2.52±0.02$^a$ |
| | 二十碳二烯酸($C_{20:2}$) | 0.07±0.00$^c$ | 0.17±0.01$^a$ | 0.12±0.02$^b$ |
| | 二十碳三烯酸($C_{20:3}$) | 0.11±0.01$^c$ | 0.39±0.02$^a$ | 0.23±0.02$^b$ |
| | 花生四烯酸($C_{20:4}$) | 0.68±0.01$^c$ | 1.20±0.03$^a$ | 0.88±0.00$^b$ |
| | 二十二碳四烯酸($C_{22:4}$) | 0.08±0.01$^b$ | 0.29±0.01$^a$ | 0.28±0.01$^a$ |
| | 二十二碳五烯酸($C_{22:5}$) | 0.10±0.01$^b$ | 0.32±0.00$^a$ | 0.31±0.01$^a$ |
| | 二十二碳六烯酸($C_{22:6}$) | 0.01±0.00$^b$ | 0.06±0.00$^a$ | 0.05±0.00$^a$ |
| | 小计 | 2.81±0.01$^c$ | 5.01±0.02$^a$ | 4.39±0.28$^a$ |
| | 总计 | 9.10±0.03$^c$ | 17.98±0.09$^a$ | 14.11±0.03$^b$ |
| | PUFA/SFA | 0.86±0.01$^b$ | 0.89±0.02$^a$ | 0.86±0.02$^b$ |

注：标“–”表示未检测到该脂肪酸；同一行不同字母表示差异显著（$P$<0.05），表5、表6同。

常通过计算 PUFA(多不饱和脂肪酸)/SFA(饱和脂肪酸)比值进行评价肉制品的脂肪酸营养指标，该值越大表示肉的营养价值越高。表 4 中包锡纸烤后的肉中 PUFA/SFA 值低于直烤，说明包锡纸烤后的鸭腿肉的营养指标不如直烤。黄业传等[18] 比较了包锡纸和直接烤制的猪肉的脂肪酸组成，用锡箔纸包裹烤制时 PUFA/SFA 值也显著降低，与本实验结果一致。烤制过程中皮下脂肪热解，采用包锡纸烤制方式烤制鸭腿时热解的脂肪不容易流出，更多地向肉中迁移，因此包锡纸烤制鸭腿肉的 PUFA/SFA 值低于直接烤制鸭腿肉。

## 2.3 氨基酸分析结果

氨基酸的分析结果如表 5 所示。生肉中含量最高的氨基酸为谷氨酸，其次为赖氨酸、天冬氨酸、亮氨酸，与谢程炜等[19] 的研究结果一致。采用两种方式烤制后肉的氨基酸含量均升高，这主要与烤制时肉失水造成蛋白质含量升高有关[20]。与包锡纸烤制比较，由于直接烤制失水更多，因此直接烤制肉中各氨基酸的含量及氨基酸的总含量上升幅度均较大。

表 5 烤制前后鸭腿肉氨基酸组成

Table 5 Composition of amino acids in duck leg meat before and after roasting

| 氨基酸 | 含量(g/100 g 肉) | | |
|---|---|---|---|
| | 生肉 | 直接烤制 | 包锡纸烤制 |
| 必需氨基酸(EAA) | | | |
| 苏氨酸Thr | 0.63±0.01$^{c}$ | 0.80±0.01$^{b}$ | 0.86±0.02$^{a}$ |
| 缬氨酸Val | 1.01±0.01$^{b}$ | 1.20±0.03$^{a}$ | 1.17±0.01$^{a}$ |
| 蛋氨酸Met | 0.45±0.00$^{b}$ | 0.63±0.01$^{a}$ | 0.46±0.03$^{b}$ |
| 异亮氨酸Ile | 0.71±0.01$^{c}$ | 0.86±0.02$^{a}$ | 0.75±0.01$^{b}$ |
| 亮氨酸Leu | 1.32±0.01$^{b}$ | 1.49±0.03$^{a}$ | 1.24±0.01$^{b}$ |
| 苯丙氨酸Phe | 0.85±0.01$^{b}$ | 1.01±0.01$^{a}$ | 0.84±0.01$^{b}$ |
| 赖氨酸Lys | 1.76±0.02$^{c}$ | 1.84±0.01$^{a}$ | 1.89±0.02$^{a}$ |
| 合计 | 6.73±0.01$^{b}$ | 7.83±0.02$^{a}$ | 7.21±0.03$^{b}$ |
| 非必需氨基酸(NEAA) | | | |
| 天冬氨酸Asp | 1.61±0.01$^{b}$ | 1.73±0.01$^{a}$ | 1.75±0.01$^{a}$ |
| 丝氨酸Ser | 0.61±0.00$^{b}$ | 0.81±0.01$^{a}$ | 0.63±0.02$^{b}$ |
| 谷氨酸Glu | 2.81±0.03$^{c}$ | 3.19±0.04$^{a}$ | 2.95±0.00$^{b}$ |
| 组氨酸His | 0.50±0.01$^{b}$ | 0.60±0.01$^{a}$ | 0.56±0.01$^{a}$ |
| 脯氨酸Pro | 0.83±0.01$^{b}$ | 0.95±0.02$^{a}$ | 0.91±0.03$^{a}$ |
| 甘氨酸Gly | 0.74±0.04$^{b}$ | 0.92±0.00$^{a}$ | 0.72±0.06$^{b}$ |
| 丙氨酸Ala | 1.13±0.02$^{b}$ | 1.32±0.02$^{a}$ | 1.16±0.04$^{b}$ |
| 酪氨酸Tyr | 0.66±0.01$^{c}$ | 0.80±0.01$^{a}$ | 0.77±0.02$^{a}$ |
| 精氨酸Arg | 0.92±0.03$^{b}$ | 1.00±0.01$^{a}$ | 1.03±0.01$^{a}$ |
| 半胱氨酸Cys | 0.24±0.01$^{a}$ | 0.21±0.00$^{b}$ | 0.24±0.02$^{a}$ |
| 合计 | 10.07±0.03$^{c}$ | 11.53±0.01$^{a}$ | 10.72±0.02$^{b}$ |
| TAA总计 | 16.78±0.03$^{c}$ | 19.36±0.02$^{a}$ | 17.93±0.05$^{b}$ |
| EAA/TAA | 40.10% | 40.44% | 40.21% |

氨基酸的种类和含量对肉类营养价值有重要影响，必需氨基酸(EAA)与总氨基酸(TAA)的比值(EAA/TAA)可作为评价肉的营养指标，该值越大表示肉的营养价值越高[21]。表 5 中，直接烤制肉的必需氨基酸与总氨基酸的比值为 40.44%，而包锡纸烤制肉的必需氨基酸与总氨基酸的比值为 40.21%，前者的营养指标高于后者。

## 2.4 挥发性风味物质分析结果

采用 HS-SPME/GC-MS 对两种烤制方式鸭腿肉的香气成分进行分析，由表 6 可知，共检测到 44 种化合物，包括醛类 20 种、醇类 6 种、酮类 4 种、含硫化合物 1 种、呋喃类 1 种、酯类 2 种、酸类 1 种、烷烃类 7 种、其它类 2 种。

脂肪族的醛、酮、醇、酸、酯、烃等化合物均产生于脂质氧化降解反应。两种烤制方式下鸭腿肉中醛类物质的种类最多，且总含量最大，其次为醇类、酮类和烃类物质。检测到的醛类包括己醛、戊醛、3-甲基丁醛、壬醛、辛醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、庚醛等。脂肪醛对于动物肉的特征香气形成起重要作用，主要来源于脂质的氧化降解[22]。在传统北京烤鸭中曾检测到壬醛、辛醛、庚醛、癸醛、戊醛、己醛、(E)-2-辛烯醛、(E)-2-庚烯醛、(E)-2-癸烯醛、苯甲醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛[23]，这些在本实验中也检测到。罗佳峰等[24] 在蜜汁烤鸭腿中也曾检测到壬醛、己醛、癸醛、辛醛、庚醛、(E)-2-壬烯醛、(E)-2-癸烯醛，与本实验结果一致。本文两种样品检测到的化合物中含量较高的(>150 ng/g)有己醛、3-甲基丁醛、戊醛、庚醛、辛醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛。3-甲基丁醛可来源于亮氨酸的 Strecker 降解[25]，(E,E)-2,4-癸二烯醛主要来源于亚油酸氧化降解，庚醛来源于花生四烯酸的氧化降解，戊醛、辛醛和壬醛主要来源于油酸氧化降解[26] 。

检测到的醇包括 1-辛烯-3-醇、1-戊醇、1-己醇、1-庚醇、(Z)-2-辛烯-1-醇、1-辛醇。其中 1-辛烯-3-醇在两样品中的含量均最高，分别为 506.29±19.92 ng/g 和 306.33±41.66 ng/g。其次 1-辛醇在两种样品中的含量也均较高(>100 ng/g)。1-辛烯-3-醇具有明显的蘑菇味[7]，由 n-3,n-6 多不饱和脂肪酸经加热降解生成[23]。孙震等[27] 在烤鸭腿中也曾检测到较高含量的 1-辛烯-3-醇。本实验检测出 4 种酮，为 2-庚酮、2,3-辛二酮、2,5-辛二酮、3,5-辛二烯-2-酮。在直接烤制样品中，2,3-辛二酮含量高达 413.44±2.34 ng/g，但在包锡纸烤制样品中只检测到了 2,5-辛二酮(65.24±0.32 ng/g)。酸和酯仅在直接烤制的肉中检测到，包括辛酸、苯甲酸乙酯和 γ-壬内酯，其中含量最高的为苯甲酸乙酯(37.77±0.26 ng/g)。检测到了 7 种烷烃类物质，但该类物质由于气味阈值高，往往对风味的贡献小[28]。本实验检出一种呋喃类物质为 2-戊基呋喃，Zhou 等[29] 在电烤箱烤鸭中也曾检测到。2-戊基呋喃也为脂质氧化降解产物，可由亚油酸氧化产生的 2-壬烯醛环化生成[30]。

含硫化合物对肉香味有重要贡献，大多具有气味阈值低和在肉中的含量极低的特点，采用 GC-MS 常常难以检测到。本实验 GC-MS 只检测出一种含硫化合物——甲硫醇，该化合物来源于蛋氨酸的降解反应[31]。此外，本实验还检测到的柠檬烯和 2,5-

表 6　两种烤制方式鸭腿肉 HS-SPME/GC-MS 分析结果

Table 6　Results of HS-SPME/GC-MS analysis of the roasted duck leg meat by two roasting methods

| RI | 化合物 | 含量(ng/g) | | 鉴定方法 |
|---|---|---|---|---|
| | | 直接烤制 | 包锡纸烤制 | |
| | 醛类(20种) | 19种 | 16种 | |
| 865 | 丁醛 | 27.90±4.41 | / | MS,RI |
| 910 | 3-甲基丁醛 | 485.43±4.87$^{b}$ | 545.19±15.13$^{a}$ | MS,RI |
| 971 | 戊醛 | 510.23±10.07$^{a}$ | 418.48±59.62$^{b}$ | MS,RI |
| 1091 | 己醛 | 725.19±45.71$^{b}$ | 825.71±36.44$^{a}$ | MS,RI,S |
| 1190 | 庚醛 | 163.41±3.85$^{b}$ | 186.21±5.67$^{a}$ | MS,RI |
| 1309 | 辛醛 | 244.44±5.53$^{b}$ | 380.46±5.34$^{a}$ | MS,RI |
| 1341 | (E)-2-庚烯醛 | 52.70±3.16$^{a}$ | 29.84±0.11$^{b}$ | MS,RI |
| 1399 | 壬醛 | 360.85±8.79$^{b}$ | 399.49±3.38$^{a}$ | MS,RI,S |
| 1434 | (E)-2-辛烯醛 | 91.03±8.44$^{a}$ | 53.86±1.78$^{b}$ | MS,RI |
| 1510 | 癸醛 | 106.36±0.28$^{a}$ | 59.26±1.05$^{b}$ | MS,RI |
| 1523 | 苯甲醛 | 87.86±4.02$^{a}$ | 85.27±5.80$^{a}$ | MS,RI,S |
| 1540 | (E)-2-壬烯醛 | 73.03±1.68$^{a}$ | 33.98±1.20$^{b}$ | MS,RI,S |
| 1631 | (E)-2-癸烯醛 | 118.65±1.99$^{a}$ | 80.71±1.33$^{b}$ | MS,RI |
| 1670 | (E,Z)-2,4-壬二烯醛 | / | 55.07±0.81 | MS,RI |
| 1710 | (E,E)-2,4-壬二烯醛 | 46.89±10.83 | / | MS,RI,S |
| 1764 | (E)-2-十一烯醛 | 113.74±6.72$^{a}$ | 89.34±2.23$^{b}$ | MS,RI |
| 1810 | (E,E)-2,4-癸二烯醛 | 307.80±29.96$^{a}$ | 187.35±9.93$^{b}$ | MS,RI,S |
| 2010 | 4-戊基苯甲醛 | 43.59±1.61 | / | MS,RI |
| 1930 | 十四碳醛 | 133.59±1.21 | / | MS,RI |
| 2157 | 十六碳醛 | 325±34.53$^{a}$ | 84.37±2.37$^{b}$ | MS,RI |
| | 小计 | 4017.69 | 3514.59 | |
| | 醇类(6种) | 6种 | 4种 | |
| 1254 | 1-戊醇 | 58.78±5.89$^{a}$ | 30.29±2.43$^{b}$ | MS,RI |
| 1381 | 1-己醇 | 32.63±2.99 | / | MS,RI |
| 1440 | 1-庚醇 | 46.45±2.25$^{a}$ | 43.50±4.07$^{a}$ | MS,RI |
| 1460 | 1-辛烯-3-醇 | 506.29±19.92$^{a}$ | 306.33±41.66$^{b}$ | MS,RI |
| 1542 | (Z)-2-辛烯-1-醇 | 73.30±1.54 | / | MS,RI |
| 1556 | 1-辛醇 | 139.16±4.42$^{a}$ | 105.25±2.95$^{b}$ | MS,RI |
| | 小计 | 856.61 | 485.37 | |
| | 酮类(4种) | 3种 | 1种 | MS,RI |
| 1173 | 2-庚酮 | 23.62±0.63 | / | MS,RI |
| 1323 | 2,3-辛二酮 | 413.44±2.34 | / | MS,RI |
| 1325 | 2,5-辛二酮 | / | 65.24±0.32 | MS,RI |
| 1559 | 3,5-辛二烯-2-酮 | 11.42±0.98 | / | MS,RI |
| | 小计 | 448.48 | 65.24 | |
| | 含硫化合物(1种) | 1种 | 1种 | |
| 665 | 甲硫醇 | 69.69±5.31$^{a}$ | 40.73±4.96$^{b}$ | MS,RI |
| | 小计 | 69.69 | 40.73 | |
| | 呋喃类(1种) | 1种 | 1种 | |
| 1242 | 2-戊基呋喃 | 45.70±2.33$^{a}$ | 50.02±4.91$^{a}$ | MS,RI |
| | 小计 | 45.70 | 50.02 | |
| | 酸和酯类(3种) | | | |
| 1647 | 苯甲酸乙酯 | 37.77±0.26 | / | MS,RI |
| 2010 | γ-壬内酯 | 34.20±1.58 | / | MS,RI |
| 2072 | 辛酸 | 29.07±1.33 | / | MS,RI |
| | 小计 | 101.04 | 0 | |
| | 烷烃类(7种) | 7种 | 3种 | |
| 511 | 戊烷 | 25.65±2.93$^{a}$ | 28.44±8.45$^{a}$ | MS,RI |
| 696 | 庚烷 | 67.30±2.26$^{a}$ | 60.97±3.57$^{a}$ | MS,RI |
| 810 | 辛烷 | 68.48±3.88$^{a}$ | 51.15±18.98$^{b}$ | MS,RI |
| 1195 | 十二烷 | 30.70±0.25 | / | MS,RI |

**续表 6**

| RI | 化合物 | 含量(ng/g) | | 鉴定方法 |
|---|---|---|---|---|
| | | 直接烤制 | 包锡纸烤制 | |
| 1410 | 十四烷 | 19.97±2.45 | / | MS,RI |
| 1518 | 十五烷 | 31.30±0.31 | / | MS,RI |
| 1615 | 十六烷 | 27.94±0.96 | / | MS,RI |
| | 小计 | 271.34 | 140.56 | |
| | 其他类(2种) | 1种 | 2种 | |
| 1183 | 柠檬烯 | / | 72.46±17.44 | MS,RI |
| 2285 | 2,5-二叔丁基苯酚 | 84.96±6.03[a] | 70.62±5.32[b] | MS,RI |
| | 小计 | 84.96 | 143.08 | |
| | 总计 | 5895.51 | 4439.59 | |

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。

二叔丁基苯酚, 这两个化合物很可能来源于喂养动物的饲料[32]。

比较两种样品的挥发性组成, 包锡纸烤制样品中不仅各类化合物的数量少、且总含量低(表 6)。这可能是由于包锡纸烤制不利于传热, 空气被一定程度的隔绝, 烤制过程渗出的水分不能流出, 从而影响脂质氧化和美拉德反应风味物质的产生[33]。但包锡纸烤肉具有肉嫩、不污染烤箱的优点, 在烤制过程中伴随由脂质氧化或美拉德反应, 产生的不安全性因子含量可能会低[34]。进一步以表 6 中的挥发性化合物作为因变量, 以两种烤制方式作为自变量, 采用 OPLS-DA 数据处理, 所得结果见图 1A~C。图 1A 表明两种方式烤制的鸭腿肉的挥发性组成得到明显区分。图 1B 显示 OPLS-DA 分析中的自变量拟合指数

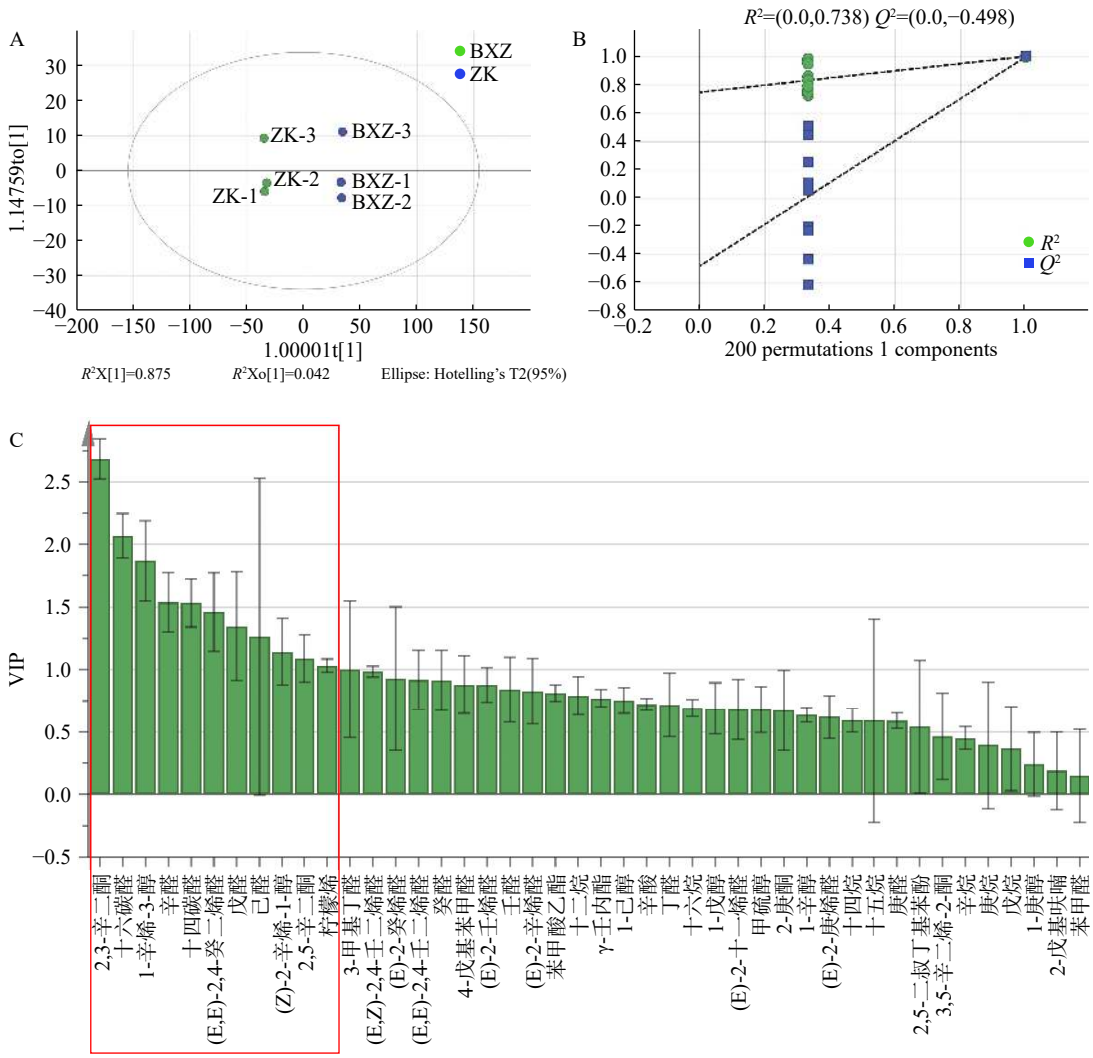


图 1 两种烤制方式鸭腿肉挥发性风味物质的 OPLS-DA 得分图(A), 置换检验结果(B)和挥发性风味物质 VIP 图(C)

Fig.1 Scores plots of OPLS-DA model of volatile compounds in duck legs meat with two roasting methods (A), permutations plot (B) and VIP plots of volatile flavor compounds (C)

（$R^2$x）为 0.945，模型预测指数（$Q^2$）为 0.999，经过 200 次置换检验（Permutation test），$Q^2$ 回归线与纵轴的相交点小于零，表明模型验证有效，模型不存在过拟合。图 1C 为筛选出的区分两种样品挥发性组成的标志性化合物（Variable importance projection, VIP>1）共 11 个，按 VIP 值由高到低顺序分别为：2,3-辛二酮、十六碳醛、1-辛烯-3-醇、辛醛、十四碳醛、（E,E）-2,4-癸二烯醛、戊醛、己醛、（Z）-2-辛烯-1-醇、2,5-辛二酮、柠檬烯。除柠檬烯外，其余化合物均为脂质氧化降解反应产生，间接地表明两种方式的脂质氧化程度有明显差别，但还有待于将来通过进一步的实验验证。

### 2.5　GC-O 分析结果

由表 7 可知，GC-O 共鉴定出 22 种气味活性化合物，包括醛类 9 种、醇类 1 种、含硫化合物 8 种、吡嗪类 2 种、含氧杂环 1 种、其他类 1 种。与 GC-MS 分析结果一致，仍然是醛类物质的数量最多。由于人鼻的高灵敏度，GC-O 新检测到 8 种含硫化合物及 2 种吡嗪类化合物，未在 GC-MS 中检测到。但 GC-MS 检测的酸类、酯类、烃类等，GC-O 均没检测到，这主要与它们具有较高的气味阈值有关。

比较直接烤制和包锡纸烤制两种烤鸭腿肉样品，GC-O 分析分别检测出 20 种和 16 种化合物。与 GC-MS 结果一致，仍然是直接烤制样品中鉴定出的化合物数量多。采用 AEDA/GC-O 分析时，化合物的稀释因子（Flavor dilution factor, FD）越高，表明其对样品总体香气的贡献越大。直接烤制的样品中，稀释因子大（$\log_2$FD≥3）的化合物为（E,E）-2,4-庚二烯醛、（E,E）-2,4-壬二烯醛、（E,E）-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、糠硫醇、3-甲硫基丙醛、2-乙酰基-2-噻唑啉、己醛、（E）-2-壬烯醛。包锡纸烤制的样品中，稀释因子大（$\log_2$FD≥3）的化合物为壬醛、己醛、2-乙酰基-2-噻唑啉、2,4,5-三甲基噻唑、（E,E）-2,4-庚二烯醛、糠硫醇、3-甲硫基丙醛、1-辛烯-3-醇、（E,E）-2,4-癸二烯醛。Liu 等[6] 使用 HS-SPME/GC-O-MS 在传统北京烤鸭的腿肉中也曾检测到己醛、壬醛、（E）-2-壬烯醛、（E,E）-2,4-癸二烯醛、糠硫醇、3-甲硫基丙醛、1-辛烯-3-醇。本实验检测到的（E,E）-2,4-庚二烯醛、2-甲基-3-呋喃硫醇、（E,E）-2,4-壬二烯醛，在江新业等[35] 采用同时蒸馏提取法（SDE 法）结合

表 7　两种烤制方式鸭腿肉 HS-SPME/GC-O 分析结果

Table 7　Results of HS-SPME/GC-O analysis of the roasted duck leg meat by two roasting methods

| 嗅闻保留指数 | 化合物 | 气味描述词 | $\log_2$FD | | 定性方式 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 直接烤制 | 包锡纸烤制 | |
| | 醛类（9种） | | | | |
| 1068 | 己醛 | 青香 | 3 | 5 | MS,RI,odor,S |
| 1394 | 壬醛 | 脂肪、柑橘 | 4 | 6 | MS,RI,odor,S |
| 1486 | （E,E）-2,4-庚二烯醛 | 青香、脂肪 | 5 | 4 | RI,odor,S |
| 1553 | 苯甲醛 | 杏仁 | 0 | 0 | MS,RI,odor,S |
| 1565 | （E）-2-壬烯醛 | 青香、脂肪 | 3 | 1 | MS,RI,odor,S |
| 1760 | （E,E）-2,4-壬二烯醛 | 青香、脂肪 | 5 | 0 | MS,RI,odor,S |
| 1783 | （E,E）-2,4-癸二烯醛 | 烤肉香、油脂 | 5 | 3 | MS,RI,odor,S |
| 1795 | （E）-2-十一烯醛 | 油脂、肥皂 | 0 | / | MS,RI,odor,S |
| 2010 | 4,5-环氧-2-癸烯醛 | 金属 | 0 | / | RI,odor |
| | 醇类（1种） | | | | |
| 1460 | 1-辛烯-3-醇 | 蘑菇 | 5 | 3 | MS,RI,odor,S |
| | 含硫化合物（8种） | | | | |
| 1059 | 噻吩 | 葱蒜 | / | 0 | RI,odor,S |
| 1325 | 2-甲基-3-呋喃硫醇 | 烤肉香 | 2 | / | RI,odor,S |
| 1410 | 2,4,5-三甲基噻唑 | 烤肉香 | 2 | 4 | RI,odor,S |
| 1420 | 糠硫醇 | 烤香、芝麻香 | 4 | 3 | RI,odor,S |
| 1449 | 3-（甲硫基）丙醛 | 烤肉香、煮土豆香 | 4 | 3 | RI,odor,S |
| 1727 | 2-乙酰基-2-噻唑啉 | 米饭 | 4 | 4 | RI,odor,S |
| 1971 | 苯并噻唑 | 焦糖 | 0 | / | RI,odor,S |
| 2132 | 双（2-甲基-3-呋喃基）二硫 | 肉香 | 0 | 0 | RI,odor,S |
| | 含氮杂环化合物（2种） | | | | |
| 1323 | 2,6-二甲基吡嗪 | 烤香、咖啡 | / | 0 | RI,odor,S |
| 1495 | 2-乙基-3,5-二甲基吡嗪 | 巧克力、坚果 | 0 | 0 | RI,odor,S |
| | 含氧杂环（1种） | | | | |
| 2016 | 2,5-二甲基-4-羟基-3-呋喃酮 | 焦糖 | 0 | / | RI,odor,S |
| | 其他（1种） | | | | |
| 2034 | 对甲酚 | 酚味、药味 | 1 | / | RI,odor,S |

注：基于质谱（MS）、保留指数（RI）、嗅闻气味（odor）及标品（S）鉴定；“/”表示未嗅闻到。

AEDA/GC-O 分析传统北京烤鸭中也曾检测到，并且也具有较高的稀释因子。

由以上讨论可知，两种烤制方式下，检测到的稀释因子大的化合物多数相同，但由于它们在两样品中的稀释因子不同，可造成两样品具有不同的总体香气特征[28]。本课题组曾采用气味有代表性及 GC-O 稀释因子高的化合物绘制雷达图，较好地比较出炖煮白猪肉和黑猪肉的肉汤的感官风味差异[36]。为此，兼顾稀释因子高和气味有代表性（青香、脂肪香、烤肉香）两方面，在两种样品中挑选 12 个化合物：己醛、1-辛烯-3 醇、(E)-2-壬烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛，主要归属青香香气；壬醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛，主要归属脂肪香气；3-甲硫基丙醛、糠硫醇、2-乙酰基-2-噻唑啉、2,4,5-三甲基噻唑、2-甲基-3-呋喃硫醇，主要归属烤肉香气，并对这些化合物在各自烤鸭腿肉样品中的最高 $\log_2$FD 值定义为 10 分，其它化合物的得分根据其 $\log_2$FD 值进行折算，最后根据化合物的得分绘制雷达图，见图 2。由图 2 可知，直接烤制样品的烤肉香、脂肪香和总体轮廓均明显大于包裹烤制样品，表明直接烤制样品的烤香突出、气味浓，该结果与两种方式烤制的鸭腿肉的感官评价结果相一致。

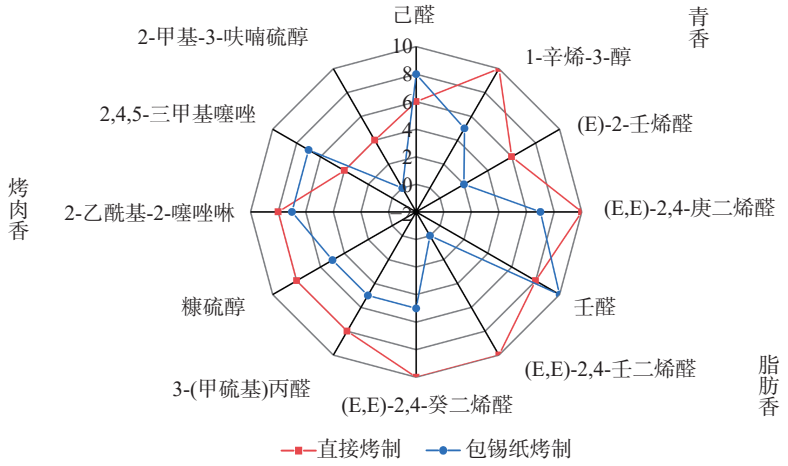


图 2 两种烤制方式鸭腿肉代表性香气活性成分雷达图

Fig.2 Radar chart of representative aroma-active components of duck leg meat with two roasting methods

## 3 结论

分析比较直接烤制和包锡纸烤制两种方式电烤箱烤制的鸭腿肉，发现多数感官指标以及脂肪酸和氨基酸的营养指标，前者优于后者。采用 GC-MS 分析比较两种烤鸭腿肉的挥发性构成，包锡纸烤制样品中检测的各类化合物的数量少、且含量低；OPLS-DA 分析显示 2,3-辛二酮、十六碳醛、1-辛烯-3-醇、辛醛等为构成两样品挥发性风味差异的主要化合物。采用 AEDA/GC-O 分析，共鉴定出 22 种气味活性化合物，两样品中检测到的气味强势化合物种类类似，但具有不同的稀释因子分布，采用绘制雷达图进行风味剖面比较，得到了与感官评价一致性的结果。

但考虑到直接烤制时，脂质氧化和美拉德反应程度会高。下一步将进一步比较两种方式烤制下的肉品氧化程度及食品安全性指标，为电烤箱烤鸭工艺的选择提供更全面的参考。

## 参考文献

[1] 张诗泉, 刘永峰, 葛鑫禹, 等. 鸭肉宰后成熟过程中食用品质、营养品质及嫩度变化研究[J/OL]. 食品与发酵工业:1−10.[2022-12-28]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032891. [ZHANG S Q, LIU Y F, GE X Y, et al. Study on the changes of edible quality, nutritional quality and tenderness during post-slaughter maturation of duck meat[J/OL].Food and Fermentation Industries: 1−10.[2022-12-28]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032891.]

[2] 齐千慧, 朱作艺, 王伟, 等. 中畜草原白羽肉鸭与樱桃谷鸭肌肉品质的比较[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 226−233. [QI Q H, ZHU Z Y, WANG W, et al. Comparison of the muscle quality between china prairie white plumage duck and cherry valley duck[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 226−233.]

[3] 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.

[4] PU D D, SHAN Y M, ZHANG L L, et al. Identification and inhibition of the key off-odorants in duck broth by means of the sensomics approach and binary odor mixture[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(41): 13367−13378.

[5] 赵改名, 王森, 祝超智, 等. 基于顶空气相离子迁移色谱对鸭肉腥味特征物质的鉴定[J]. 食品科学: 2023, 44(4): 247−255. [ZHAO G M, WANG S, ZHU C Z, et al. Identification of characteristic substances of fishy odour of duck meat based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectormetry[J]. Food Science, 2023, 44(4): 247−255.]

[6] LIU H, WANG Z Y, ZHANG D Q, et al. Generation of key aroma compounds in Beijing roasted duck induced via Maillard reaction and lipid pyrolysis reaction[J]. Food Research International, 2020, 136: 109328.

[7] 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]. 食品工业科技, 2020, 41(11): 37−45, 50. [JIANG P X, DAI X W, WANG Q Z, et al. Study on volatile flavor compo-

nents of cantonese roast duck in different processing stages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(11): 37−45, 50. ]
[ 8 ] 刘欢, 张德权, 王振宇, 等. 北京烤鸭腿皮与腿肉关键挥发性风味物质解析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(2): 308−318. [ LIU H, ZHANG D Q, WANG Z Y, et al. Analysis of aroma compounds in leg skin and leg meat from Beijing roasted duck[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(2): 308−318. ]
[ 9 ] 徐敏, 何万清, 聂磊, 等. 传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3139−3145. [ XU M, HE W Q, NIE L, et al. Atmospheric pollutant emission characteristics from the cooking process of traditional beijing roast duck[J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3139−3145. ]
[ 10 ] 任琳, 赵冰, 赵燕, 等. 北京烤鸭加工过程中菌相变化规律及其特征[J]. 食品科学, 2013, 34(1): 281−284. [ REN L, ZHAO B, ZHAO Y, et al. Microflora variation and characteristics of Beijing roast duck during processing[J]. Food Science, 2013, 34(1): 281−284. ]
[ 11 ] 王雅琪, 饶伟丽, 田建文, 等. 烤鸭绿色制造技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(13): 315−319. [ WANG Y Q, RAO W L, TIAN J W, et al. Research progress in green manufacturing technology of roasted duck[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(13): 315−319. ]
[ 12 ] 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. GB5009.168-2016 食品中脂肪酸的测定[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. GB5009.168-2016 Determination of fatty acids in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2016. ]
[ 13 ] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.124-2016 食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社,2016. [ State Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. GB 5009.124-2016 National food safety standard determination of amino acids in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016. ]
[ 14 ] 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. ]
[ 15 ] KÜÇÜKÖZET A O, USLU M K. Cooking loss, tenderness, and sensory evaluation of chicken meat roasted after wrapping with edible films[J]. Food Science and Technology International, 2018, 24(7): 576−584.
[ 16 ] 秦乐蓉, 王欣, 曾池莉, 等. 樱桃谷鸭与 Z 型北京鸭原料理化特性的比较分析[J]. 食品科技, 2020, 45(12): 114−121. [ QIN L R, WANG X, ZENG C L, et al. Comparative analysis of physical and chemical characteristics between cherry valley meat duck and z-type Beijing duck[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(12): 114−121. ]
[ 17 ] DOMíNGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products[J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 429.
[ 18 ] 黄业传, 李洪军, 吴照民, 等. 猪肉烤制过程中脂肪含量和脂肪酸组成的变化[J]. 食品科学, 2011, 32(24): 213−219. [ HUANG Y C, LI H J, WU Z M, et al. Changes in lipid content and fatty acid composition of pork during roasting[J]. Food Science, 2011, 32(24): 213−219. ]
[ 19 ] 谢程炜, 诸永志, 王道营, 等. 3 个品种鸭肉排酸成熟后的氨基酸组成比较及评价[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1677−1681. [ XIE C W, ZHU Y Z, WANG D Y, et al. Amino acid composition and evaluation of three species of ducks after postmortem aging[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(4): 1677−1681. ]
[ 20 ] LIU Y X, WANG Z Y, ZHANG D Q, et al. Effect of protein thermal denaturation on the texture profile evolution of Beijing roast duck[J]. Foods, 2022, 11(5): 664.
[ 21 ] ZHANG X, DENG Y, HU S Q, et al. Comparative analysis of amino acid content and protein synthesis-related genes expression levels in breast muscle among different duck breeds/strains[J]. Poultry Science, 2023, 102(1): 102277.
[ 22 ] LI C, AL-DALALI S, WANG Z P, et al. Investigation of volatile flavor compounds and characterization of aroma-active compounds of water-boiled salted duck using GC–MS–O, GC–IMS, and E-nose[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132728.
[ 23 ] 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(20): 5847−5856.
[ 24 ] 罗佳峰, 孙震, 何俊, 等. 腌制及烤制时间对蜜汁烤鸭腿风味物质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(18): 191−198. [ LUO J F, SUN Z, HE J, et al. Effects of curing and roasting time on flavor of honey-roasted duck leg[J]. Food Science, 2021, 42(18): 191−198. ]
[ 25 ] 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.
[ 26 ] 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.
[ 27 ] 孙震, 黄苓, 赵金, 等. 三种香辛料水提物腌制对烤鸭腿脂质氧化和挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 24−30. [ SUN Z, HUANG L, ZHAO J, et al. Effects of marinating of three spice water extracts on lipid oxidation and volatile flavor substances in roasted duck legs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(23): 24−30. ]
[ 28 ] 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.
[ 29 ] ZHOU Y M, XIE F, ZHOU X L, et al. Effects of Maillard reaction on flavor and safety of Chinese traditional food: Roast duck[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(6): 1915−1922.
[ 30 ] ADAMS A, BOUCKAERT C, VAN LANCKER F, et al. Amino acid catalysis of 2-alkylfuran formation from lipid oxidation-derived $\alpha$, $\beta$-unsaturated aldehydes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(20): 11058−11062.
[ 31 ] BASSAM S M, NOLETO-DIAS C, FARAG M A. Dissecting grilled red and white meat flavor: Its characteristics, production mechanisms, influencing factors and chemical hazards[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131139.
[ 32 ] 赵健, 王蒙, 谢建春, 等. 黑猪肉关键香气物质分析鉴定[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 203−209. [ ZHAO J, WANG M, XIE J C, et al. Characterization of key aroma compounds in pork from black pig[J]. Food Science, 2018, 39(2): 203−209. ]

[ 33 ] 张建友, 赵瑜亮, 丁玉庭, 等. 脂质和蛋白质氧化与肉制品风味特征相关性研究进展[J]. 核农学报, 2018, 32(7): 1417−1424. [ ZHANG J Y, ZHAO Y L, DING Y T, et al. Relationships of lipid oxidation and protein oxidation with flavor characteristics of meat products[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(7): 1417−1424. ]

[ 34 ] 张晨萍, 王羽桐, 徐玉霞, 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, XU Y X, et al. Detection of volatile flavor compounds and harmful factors in four kinds of convenience food[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(2): 172−182. ]

[ 35 ] 江新业, 宋焕禄, 夏玲君. GC-O/GC-MS 法鉴定北京烤鸭中的香味活性化合物[J]. 中国食品学报, 2008(4): 160−164. [ JIANG X Y, SONG H L, XIA L J. Identification of aroma-active compounds of Beijng grilled ducks by GC-O/GC-MS[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2008(4): 160−164. ]

[ 36 ] 赵梦瑶, 赵健, 谢建春, 等. 白猪肉与黑猪肉热反应香精中香气物质分析鉴定[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 40−47. [ ZHAO M Y, ZHAO J, XIE J C, et al. Characterization of aroma compounds in two meat flavorings prepared from thermal reaction of enzymatic hydrolysates of black pig and common white pig meat proteinss with oxidized lard[J]. Food Science, 2017, 38(20): 40−47. ]