

不同畜禽肌肉脂质热氧化过程中挥发性化合物的生成机制

王英, 毕新慧, 黄旭辉, 李冬梅, 秦磊, 张玉莹*

(大连工业大学食品学院, 海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034)

摘要: 该文以猪、牛、羊、鸡、鸭为研究对象提取油脂, 新鲜油和氧化油 (120 °C, 2 h) 通过感官评定、电子鼻、固相微萃取-气相色谱质谱、棒状薄层色谱、超高效液相串联复合四极杆-轨道离子阱质谱测定挥发性风味物质、脂肪酸组成、脂质组成的变化, 探究热加工过程不同肌肉组织脂质氧化产香规律。氧化后感官差异显著, 牛油和羊油具有突出的奶香味。氧化后脂质中醛类化合物种类和含量显著升高。不同肌肉组织脂质组成不同, 氧化后各类脂质含量变化差异显著, 牛油中甘油三酯含量由 4 085.44 ng/g 下降到 1 363.12 ng/g, 鸡油中磷脂酰胆碱含量由 1 060.53 ng/g 下降到 503.46 ng/g。脂肪酸的酯化形式影响其热氧化后挥发性化合物的生成, 氧化牛油中庚醛、庚醛、2-庚醛可能是由甘油三酯上 C18:1、C18:2 氧化产生, 氧化羊油中己醛、庚醛可能是由磷脂酰胆碱、磷脂酰乙醇胺上 C18:2 氧化降解产生, 氧化鸡、鸭油中 1-辛烯-3-醇可能是由磷脂酰乙醇胺上 C18:1 氧化降解产生。该研究以期脂质风味调控提供研究方法及理论参考。

关键词: 脂质; 热氧化; 风味; 前体物质

文章编号: 1673-9078(2025)07-40-53

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0595

Formation Mechanisms of Volatile Compounds during Thermal Oxidation of Lipids in Different Livestock Muscles

WANG Ying, BI Xinhui, HUANG Xuhui, LI Dongmei, QIN Lei, ZHANG Yuying*

(School of Food Science and Technology, State Key Laboratory of Marine Food Processing & Safety Control, National Engineering Research Center of Seafood, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Oil was extracted from pork, beef, mutton, as well as chicken and duck meat samples. The changes in volatile flavor compounds, fatty acid composition, and lipid composition of fresh oil and oxidized oil (heated at 120 °C for 2 h) were determined by sensory evaluation, electronic nose analysis, solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, thin-layer chromatography-flame-ionization detection, and ultrahigh performance liquid chromatography-quadrupole-orbitrap mass spectrometry. The ultimate aim was to investigate the lipid oxidation and aroma formation patterns

引文格式:

王英, 毕新慧, 黄旭辉, 等. 不同畜禽肌肉脂质热氧化过程中挥发性化合物的生成机制[J]. 现代食品科技, 2025, 41(7): 40-53.

WANG Ying, BI Xinhui, HUANG Xuhui, et al. Formation mechanisms of volatile compounds during thermal oxidation of lipids in different livestock muscles [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(7): 40-53.

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 辽宁省自然科学基金计划 (博士科研启动计划) 项目 (2023-BS-178); 辽宁省教育厅基本科研项目 (青年项目) (LJKQZ20222398)

作者简介: 王英 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 脂质氧化与风味形成机理, E-mail: yingwangwy2117@163.com

通讯作者: 张玉莹 (1992-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 水产品加工理论与技术, E-mail: zhangyuying@dlpu.edu.cn

in different muscle tissues during thermal oxidation. The sensory quality significantly changed during oxidation. Oxidized beef and mutton oil emanated a prominent milky aroma. The types and contents of aldehydes in lipids increased significantly after oxidation. The lipid compositions of different muscle tissues differed, and the contents of different lipid species changed significantly during oxidation. The triglyceride content of beef oil decreased from 4 085.44 ng/g to 1 363.12 ng/g, and the phosphatidylcholine content of chicken oil decreased from 1 060.53 ng/g to 503.46 ng/g after thermal oxidation. This indicates that the esterified forms of fatty acids affect the formation of volatile compounds after thermal oxidation. Heptanol, heptanal, and 2-heptanal in oxidized beef oil are possibly produced by C18:1 and C18:2 on the triglyceride, and hexanal and heptanal in oxidized mutton oil are probably produced by the oxidative degradation of C18:2 on phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine. Lastly, 1-octen-3-ol in oxidized chicken and duck oil samples may be produced by the oxidative degradation of C18:1 on phosphatidylethanolamine. This study aimed to provide research methods and theoretical support for lipid flavor control.

Key words: lipid; thermal oxidation; flavor; precursor substances

我国是肉类消费大国，畜牧业对于保持国民经济的持续增长至关重要。根据中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报，全年猪牛羊禽肉产量高达 9 641 万 t，相比 2022 年增长了 4.5%。从肉类消费结构来看，猪肉和禽肉消耗将保持稳定，牛羊肉成为动物蛋白消费的主要增量^[1]。肉制品是人类饮食的重要组成部分，也是蛋白质和脂类等营养物质的来源，但是生肉的风味清淡，咸味、金属味和血腥味较重，没有肉香味^[2]。为了满足消费者对食品风味、营养价值、食品安全的需求，热加工是动物源食品的重要加工手段。

加工方法直接影响着食物的营养价值、感官属性以及食用者的健康。加工方法通过控制时间^[3]、温度、氧气条件^[4]、盐含量^[5]、pH 值和光照条件来影响脂质氧化的程度，从而影响风味形成。加工方法包括热加工、非热加工、盐析、发酵^[6]等。热加工是肉制品产生良好风味的重要方式，热加工过程中脂质氧化产生的挥发性香味成分是形成肉特征香味的重要途径。烹饪加速了不饱和脂肪酸的分解，增加了氢过氧化物和总脂肪酸含量，产生风味化合物^[7]。如加热烹制肉制品，高温加速了不饱和脂肪酸的分解，并发生脂源性氧化产物与美拉德反应产物的级联反应，为肉类提供熟肉的香味，而过度的脂质氧化会产生哈喇味，脂质氧化也会引起异味的产生^[8]。

风味是动物源食品重要的品质特征之一，也是影响肉制品整体可接受度的关键因素。动物源食品挥发性风味物质的形成与脂肪酸组成及动物体内的脂质组成有着密切联系。动物源食品风味物质中直链醛、醇、烃和酮类等风味物质^[9]，主要来源于脂

质的水解和氧化。动物脂肪适度氧化降解是制备脂肪型氧化香精的重要组成部分^[10]。何小燕等^[11]通过单因素和正交实验，探讨了氧化温度、空气流量和氧化时长对羊脂氧化过程的影响，并确定了羊脂氧化的最佳工艺条件，确定了羊脂氧化的最佳工艺条件为 130 °C 加热 2.5 h；王淑慧^[12]制备脂肪氧化型鸭肉香精最佳工艺为 120 °C 加热 2 h；徐永霞等^[13]确定了猪脂控制氧化相对优化工艺为 120 °C 加热 2 h。大部分肉味香精的氧化工艺条件是 100~160 °C^[13]，氧化时间为 2~4 h。因此将脂质氧化条件设为 120 °C 加热 2 h，以获得较好的感官和香气。

脂质在肉制品风味形成中起着至关重要的作用，但由于脂质种类繁多，其在加工过程中的变化规律尚不清楚，同时，关键前体脂质与特征风味物质之间的关系也尚未明确。甘油三酯和磷脂水解是形成香味的基础因素，因此本研究，以猪、牛、羊、鸡、鸭肌肉为研究对象，提取脂质，对比不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂质组成、脂肪酸以及挥发性风味物质的差异，建立脂质分子种、脂肪酸和挥发性化合物之间的相关性，探究不同肌肉组织脂质氧化的产香规律。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

新鲜猪肉、牛肉、羊肉（均为里脊部位）、鸡肉（鸡胸肉）、鸭肉（去皮鸭腿肉）均购买于辽宁大连仟和市场，将肌肉部分洗涤干净后搅拌斩碎进行冷冻干燥。干燥后的样品置于 -80 °C 备用。

三氯甲烷（氯仿）、甲醇、无水乙醚，天津

大茂化学试剂有限公司；环己酮、无水硫酸钠、氢氧化钾、磷脂酰甘油（Phosphatidylglycerol, PG17:0/17:0）、磷脂酰乙醇胺（Phosphatidylethanolamine, PE17:0/17:0）、磷脂酰胆碱（Phosphatidylcholine, PC17:0/17:0），上海阿拉丁生化科技股份有限公司；甲醇、异丙醇、正己烷（色谱级），美国 Spectrum 化学试剂公司；甲酸、甲酸铵、乙腈、溶血磷脂酰胆碱（Lysophosphatidylcholine, LPC17:0）、甘油三酯（Triacylglycerol, TAG17:0/17:0/17:0）、37 脂肪酸甲酯混合液，美国 Sigma Aldrich 化学试剂公司；盐酸、硫酸（均为分析级），天津科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

MDF-U54V 超低温冰箱（-80 ℃），日本三洋公司；UHPLC-Q Exactive HF-X 超高效液相色谱高分辨率质谱联用仪（Ultra-High Performance Liquid Chromatography-quadrupole-orbitrap Mass Spectrometry, UHPLC-MS），德国赛默飞世尔科技公司；PEN33 电子鼻，德国 Airsense Analytics 公司；7890B-5977A 气相色谱-质谱联用仪，美国安捷伦科技有限公司；BPG-9140A 精密鼓风干燥箱，上海一恒科学仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

根据 Folch 法从不同畜禽肌肉中分离脂质^[14]。称取 2 g 冻干粉，加水（1:4，*m/V*）混合均匀，加入 15 mL 氯仿 / 甲醇（2:1，*V/V*），涡旋震荡 2 min，9 190×g 离心 10 min，取有机层，氮吹称量后备用。热氧化脂质采用 120 ℃，加热 2 h。

1.3.2 感官评定

表 1 脂质气味感官评价标准
Table 1 Criteria for sensory evaluation of lipid

评分项目	评分标准
果香味	0~5
奶香味	0~5
脂肪味	0~5
肉香味	0~5
肉腥味	0~5
哈喇味	0~5
金属味	0~5

选择 17 名完成感官训练的感官评价员（7 男，10 女）对新鲜脂质和热氧化脂质进行感官描述词的

收集，并根据感官词典选择 8 种感官描述，即果香味、奶香味、脂肪味、肉香味、肉腥味、哈喇味、金属味。感官评价对新鲜脂质和热氧化脂质进行感官评价。评分标准如表 1 所示，根据所闻到的气味对相应的描述词进行打分，味道越浓烈，评分越高，评分范围为 0~5 分。以 17 名感官评价员评分的总和作为最终感官评定分值。

1.3.3 电子鼻测定

分别取 10 mg 1.3.1 中的脂质于顶空瓶中，采用 PEN33 型电子鼻新鲜脂质和热氧化脂质整体气味轮廓进行评价。传感器响应类型见表 2。电子鼻测试参数如下：洗气时间：20 s；预运行时间：5 s；测定时间：100 s；结束后运行时间：5 s；气体流速：200 mL/min。取 60 s 时稳定的电极的数值进行后续分析。

表 2 PEN33型电子鼻传感器类型
Table 2 The types of PEN33 electronic nose sensors

阵列序号	传感器名称	响应类型
1	W1C	芳香成分苯类
2	W5S	灵敏度大，对氮氧化合物很灵敏
3	W3C	氨类，对芳香成分灵敏
4	W6S	主要对氢化物有选择性
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分，对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.3.4 挥发性化合物测定

取 50 mg 新鲜和热氧化脂质于顶空瓶中，加入 50 mg/L 的环己酮 20 μL 进行半定量。采用 Agilent 7890B/5977A 气相色谱质谱联用仪（Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS）进行测定。采用固相微萃取法（Solid Phase Microextraction, SPME）对挥发性化合物进行富集提取，萃取涂层为二乙烯基苯 / 羧基 / 聚二甲基硅氧烷，萃取温度为 60 ℃，萃取时间为 20 min。

仪器参数如下：采用非极性 HP-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）。不分流模式；进样口 250 ℃下解析 5 min。升温程序：45 ℃，持续 3 min，以 5 ℃ /min 从 45 ℃到 250 ℃，在 250 ℃下保持 10 min。电离电压为 70 eV，质量扫描范围为 40~400 *m/z*。

1.3.5 总脂肪酸测定

取 10 mg 干燥后的新鲜和氧化脂质, 加入 2 mL 氢氧化钾-甲醇, 充氮密封于 60 °C 水浴 2 h, 冷却后用盐酸滴定至酸性, 用正己烷萃取三次, 取上层 35 °C 氮吹恒重。加入 0.5 mL 色谱级正己烷, 2 mL 甲基化试剂(1% 的硫酸-甲醇) 萃取, 70 °C 水浴 1 h, 冷却后加入去离子水至中性, 取上层加入无水硫酸钠备用。参考张玉莹^[15]的方法, 采用安捷伦 7890B/5977A 气质联用仪进行脂肪酸分析。根据已知结构的脂肪酸甲酯混合标品, 根据保留时间和 NIST 谱库获得脂肪酸结构。参考李晓东等^[16]的方法, 使用峰面积归一化法计算各脂肪酸组分相对百分含量。

1.3.6 棒状薄层色谱测定

将干燥的新鲜和氧化后脂质用氯仿溶解, 质量浓度为 10 mg/mL, 取 0.5 μ L 样品点到硅胶板上 5 次。以正己烷/无水乙醚/甲酸(42:28:0.3, V/V/V) 的混合溶液作为展开剂, 展开 20 min。棒状薄层参数设定: 空气流速为 2 L/min, 氢气流速量为 160 mL/min。

1.3.7 脂质分子种测定

取干燥后的新鲜和氧化后脂质样品, 用异丙醇/乙腈(1:1, V/V) 溶液溶解, 加入内标 TAG(17:0/17:0/17:0)、PC(17:0/17:0)、PE(17:0/17:0)、LPC(17:0)、PG(17:0/17:0), 使样品质量浓度为 1 mg/mL, 内标质量浓度为 10 μ g/mL。在 10 °C 离心(20 000 $\times$ g, 2 min) 后取上清液进样检测。

色谱柱为 Acquity UPLC BEH-C₈ 柱(2.1 $\times$ 100 mm; 1.7 μ m), 通过 UHPLC-Q Exactive HF-X 对样品的脂质分子种进行分析。流动相 A 为乙腈/水(6:4, V/V), 流动相 B 为异丙醇/乙腈(9:1, V/V), 含 10 mmol/L 甲酸铵。柱温 65 °C, 流速 0.6 mL/min, 进样量 1 μ L。洗脱方法和质谱参数参考 Zhou 等^[17]的研究。使用 MS-DIAL(版本 3.30, http://prime.psc.riken.jp/Metabolomics_Software/MS-DIAL/index2.html) 识别脂质, MS-FINDER 根据 Lipidblast 数据库、在线 LIPID MAPS 数据库(<http://www.lipidmaps.org/>) 和 HMDB(<http://www.hmdb.ca/>) 解析脂质分子种结构。脂质的定量方法采用内标法, 根据脂质内标的峰面积与样品中脂质分子种峰面积之比, 计算样品中单一脂质分子种的含量。公式如下:

$$m_1 = \frac{A_1}{A_2} \times C_2 \times V \times \frac{1000}{m_2} \quad (1)$$

式中:

m_1 ——样品脂质含量, ng/g;

A_1 ——样品脂质分子种峰面积;

A_2 ——内标脂质峰面积;

C_2 ——内标质量浓度, μ g/mL;

V ——溶解体积, mL;

m_2 ——脂质取样量, g。

1.3.8 统计分析

实验重复三次, 以平均值 $\pm$ 标准差表示。使用 IBM SPSS 20.0 进行显著性差异分析, 图由 Origin 2022 绘制。用 MetaboAnalysts 4.0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>) 进行偏最小二乘判别分析(Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA) 和主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)。

2 结果与讨论

2.1 热氧化后不同畜禽肌肉脂质感官评定分析

受过感官训练的评价人员对产品的感官属性具有较好的认知, 拥有较强的感官评价能力。热氧化后的畜禽肌肉脂质感官评定如图 1 所示。猪、牛、羊、鸡、鸭脂质脂肪味突出, 牛油和羊油具有显著的奶香气味, 肉香味较淡。鸭油、鸡油以及猪油具有突出的肉香味和肉腥味。羊油具有明显的哈喇味和金属味。氧化后五种畜禽脂质感官差异显著。

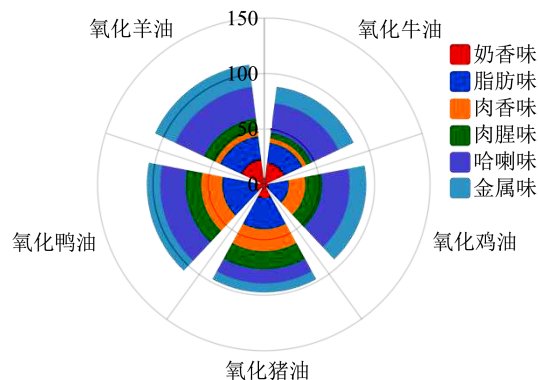


图 1 不同畜禽肌肉脂质氧化感官评定分析

Fig.1 Sensory evaluation analysis of lipid in different livestock and poultry muscles after thermal oxidation

2.2 热氧化后不同畜禽肌肉脂质电子鼻分析

电子鼻技术能够对综合气味进行整体信息的评价, 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后电子鼻分析如图 2 所示, 由图可知热加工前, 猪、牛、鸡、鸭中的挥发性组分氮氧化合物(W5S)、氨基芳香成分(W3C)、长链烷烃(W3S)、苯类芳香成分(W1C)

等维持在同一水平，热氧化后五种畜禽肌肉脂质风味轮廓显著改变，其氧化脂质电子鼻 W5S、W1W、W2W 传感器的响应值显著大于新鲜油脂，五种畜禽 W5S、W1W、W2W 传感器响应程度差异较大，表明硫化物、芳香化合物和氮氧化合物可能是导致畜禽氧化前后香气轮廓差异的重要原因。

2.3 热氧化后不同畜禽肌肉脂质挥发性化合物分析

不同动物脂质热氧化后产生的气味特征是由其特定的脂肪酸组成和氧化过程中生成的挥发性化合物决定的。表 3 是不同畜禽肌肉热氧化前后挥发性风味物质种类及其含量的变化，不同畜禽脂质热氧化前后共鉴定出 62 种挥发性化合物，其中包括醛类 18 种、醇类 9 种、酮类 7 种、烃类 20 种、酯类 1 种、酸类 1 种及其他类 6 种。新鲜油脂中鉴定到的挥发性化合物以烷烃为主，由于这些物质的阈值较高，对风味的贡献较小^[18]。己醛是新鲜脂质含量最高的醛类，具有青草味和脂肪味^[6]。氧化后，风味化合物种类和含量差异显著，反式-2-己烯醛是牛油特有的醛类，癸醛（油脂味）、十三醛在氧化猪油中检测到，氧化后猪、牛油醛类种类和含量显著增加，戊醛、辛醛（青草味）、反式-2-癸烯醛（油脂味）、十一醛、2-十一醛、十二醛、肉豆蔻醛、十五碳醛是氧化猪、牛油特有的醛类，其中壬

醛含量最高，含量达到 529.44 μg/g（氧化猪油）、536.38 μg/g（氧化牛油），崔晓红等^[19]研究结果表明壬醛（清香）、己醛（清香、草香）等共同形成了猪肉香气的主要特征成分。由表可知己醛、庚醛、2-庚醛是鸡油的主要挥发性醛类，氧化后羊和鸭油的醛类种类和含量较少，己醛、壬醛是羊、鸭的主要挥发性醛类，己醛是鸭肉中最高的醛类，由于醛的风味低阈值及在脂质氧化中生成率较快，对特征风味的形成具有较大影响^[9]。

醇类是畜禽肌肉脂质氧化后的第二类挥发性风味物质，醇类物质阈值较高，相比饱和醇，不饱和醇的阈值较低，对肉类风味的形成起着关键作用。在高温热加工过程中，不饱和醇对脂肪风味的生成起到重要作用^[20]。氧化后 1-辛烯-3-醇是氧化脂质中共有的物质，具有蘑菇味^[21]，但含量差异较大，氧化猪、牛、鸡油中含量为 195.18、115.46、177.68 μg/g，氧化羊油和鸭油中含量分别为 45.17、64.07 μg/g。1-辛烯-3-醇可能是造成肉风味差异的关键物质。正戊醇和庚醇（坚果味）是氧化猪牛鸡油中的次要醇类，具有青草味和坚果味等，其可能是由脂肪酸氢过氧化物分解，或羰基化合物的还原生成^[22]。此外，2-戊基呋喃含量差异显著，氧化猪、牛、鸡油中含量为 213.25、170.90、160.11 μg/g，氧化羊油和鸭油中含量分别为 32.62、66.03 μg/g，可释放出奶香味。与电子鼻结果趋势相似。

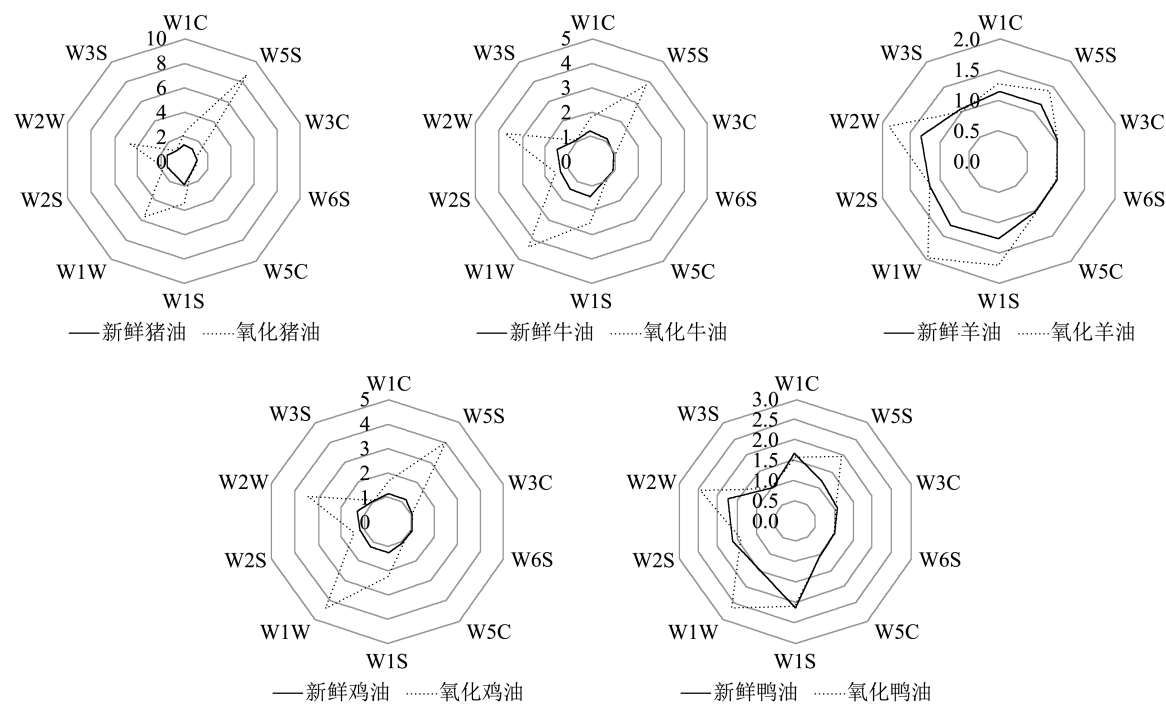


图 2 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后电子鼻雷达图

Fig.2 Electronic nose radar chart of different livestock and poultry muscle lipids before and after thermal oxidation

表 3 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后挥发性化合物含量的变化 (μg/g)
Table 3 Changes in volatile compound contents in lipids of different livestock and poultry muscles before and after thermal

序号	名称	保留时间/min	oxidation (μg/g)									
			猪油	牛油	羊油	鸡油	鸭油	氧化猪油	氧化牛油	氧化羊油	氧化鸡油	氧化鸭油
1	戊醛	3.933	—	69.59 ± 8.45	—	—	—	58.37 ± 6.92 ^a	49.73 ± 2.51 ^b	—	11.79 ± 3.64 ^c	5.49 ± 0.83 ^d
2	正己醛	6.367	486.85 ± 123.60 ^b	735.20 ± 42.76 ^a	43.91 ± 9.24 ^e	9.32 ± 2.53 ^e	292.36 ± 39.71 ^e	351.17 ± 56.00 ^e	327.41 ± 20.84 ^e	76.64 ± 7.87 ^e	190.51 ± 44.25 ^d	36.79 ± 6.23 ^e
3	反式-2-己烯醛	8.127	—	—	—	—	—	—	43.40 ± 8.39	—	—	—
4	庚醛	9.614	5.35 ± 1.02 ^f	22.29 ± 2.65 ^e	—	—	-	184.56 ± 5.89 ^b	253.77 ± 19.09 ^d	45.10 ± 4.43 ^d	68.19 ± 14.08 ^e	—
5	2-庚醛	11.342	67.79 ± 18.33 ^e	67.87 ± 8.22 ^e	—	—	20.54 ± 2.84 ^d	271.25 ± 30.58 ^a	237.08 ± 15.42 ^b	—	85.67 ± 24.51 ^e	—
6	正辛醛	12.828	—	—	—	—	—	303.87 ± 18.72 ^b	459.16 ± 22.18 ^a	—	—	—
7	2-乙基己烯醛	12.967	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13.38 ± 1.71
8	5-乙基环戊-1-烯甲醛	13.695	—	—	—	—	—	114.42 ± 15.82 ^a	73.77 ± 0.98 ^b	4.95 ± 0.21 ^e	—	—
9	反-2-辛烯醛	14.578	82.18 ± 23.36 ^e	154.10 ± 12.34 ^b	-	—	82.77 ± 6.61 ^e	248.04 ± 4.41 ^a	248.58 ± 17.89 ^a	—	60.42 ± 13.67 ^d	—
10	壬醛	16.016	33.16 ± 8.53 ^{de}	92.33 ± 1.91 ^b	—	—	76.17 ± 7.47 ^{bc}	529.44 ± 45.32 ^a	536.38 ± 19.55 ^a	52.78 ± 10.72 ^{cd}	—	10.29 ± 1.13 ^{de}
11	癸醛	19.006	—	—	—	—	—	37.17 ± 3.42	—	—	—	—
12	反式-2-癸烯醛	20.578	—	—	—	—	—	138.50 ± 17.13 ^b	248.46 ± 53.32 ^a	—	—	—
13	十一醛	21.830	—	—	—	—	—	21.33 ± 1.83 ^b	27.23 ± 6.34 ^a	—	—	—
14	2-十一烯醛	23.328	—	—	—	—	—	74.40 ± 16.55 ^b	129.88 ± 35.85 ^a	—	—	—
15	十二醛	24.488	—	—	—	—	—	29.16 ± 7.88 ^a	23.93 ± 0.96 ^b	—	—	—
16	十三醛	27.002	—	—	—	—	—	14.81 ± 1.93	—	—	—	—
17	肉豆蔻醛	29.377	0.95 ± 0.17 ^b	—	—	—	—	22.36 ± 2.54 ^a	22.37 ± 0.03 ^a	—	—	—
18	正十五碳醛	31.639	4.51 ± 1.09 ^b	12.38 ± 3.05 ^a	—	—	—	13.77 ± 0.27 ^a	12.18 ± 1.38 ^a	—	—	—
19	正戊醇	5.709	15.50 ± 3.91 ^d	31.42 ± 1.27 ^e	—	—	—	67.78 ± 16.74 ^a	48.55 ± 5.37 ^b	—	55.00 ± 6.34 ^b	14.99 ± 2.45 ^d
20	正己醇	8.651	—	—	—	—	—	—	11.21 ± 1.28	—	—	—
21	庚醇	11.823	—	—	—	—	—	61.29 ± 6.97 ^b	84.90 ± 2.95 ^a	14.44 ± 0.75 ^d	34.10 ± 3.74 ^c	—
22	1-辛烯-3-醇	12.106	—	98.69 ± 1.36 ^b	—	—	71.36 ± 3.58 ^e	195.18 ± 38.13 ^a	115.46 ± 4.56 ^b	45.17 ± 2.74 ^e	177.68 ± 31.58 ^a	64.07 ± 7.46 ^c
23	3,5-辛二烯-2-醇	13.984	—	—	—	—	8.82 ± 0.83 ^d	—	99.76 ± 7.03 ^a	17.53 ± 2.32 ^e	83.59 ± 12.29 ^b	13.51 ± 1.82 ^{de}

续表3

序号	名称	保留时间/min	猪油	牛油	羊油	鸡油	鸭油	氧化猪油	氧化牛油	氧化羊油	氧化鸡油	氧化鸭油
24	正辛醇	15.016	—	—	—	—	—	102.49 ± 13.20 ^b	140.13 ± 4.71 ^a	—	—	—
25	烯丙基正戊基甲醇	15.738	—	—	—	—	37.70 ± 3.29	—	—	—	—	—
26	4,6,6-三甲基-双环庚烷-2-醇	18.428	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.29 ± 0.19
27	己基癸醇	26.548	—	—	—	—	—	10.92 ± 1.51	—	—	—	—
28	2-甲基 3-辛烷酮	12.250	—	—	—	—	—	60.25 ± 8.04 ^a	—	15.19 ± 1.04 ^c	44.49 ± 1.29 ^b	—
29	2,3-辛二酮	12.261	—	44.55 ± 2.19 ^a	—	—	12.96 ± 2.04 ^d	—	15.61 ± 0.28 ^c	—	—	22.00 ± 0.99 ^b
30	3-辛-2-酮	13.983	—	—	—	—	—	116.05 ± 5.90	—	—	—	—
31	甲基庚基甲酮	15.658	—	—	—	—	—	—	—	6.06 ± 0.10 ^b	—	19.27 ± 0.98 ^a
32	5-甲基-4-己烯-3-酮	15.674	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
33	3-壬烯-2-酮	17.081	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
34	2-癸酮	18.653	—	—	—	—	—	—	—	—	21.19 ± 1.73 ^a	16.01 ± 1.26 ^b
35	2-正戊基呋喃	12.487	168.17 ± 34.54 ^{bc}	135.63 ± 10.79 ^c	10.10 ± 2.40 ^c	4.11 ± 0.79 ^c	179.03 ± 28.79 ^{ab}	213.25 ± 40.75 ^a	170.90 ± 6.27 ^{bc}	32.62 ± 0.47 ^{de}	160.11 ± 31.25 ^{bc}	66.03 ± 9.31 ^d
36	反式-2-(2-戊烯基)呋喃	12.818	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
37	2-辛基呋喃	21.482	—	—	—	—	—	29.94 ± 4.02	—	—	—	—
38	丙位庚内酯	17.476	—	—	—	—	—	—	23.11 ± 2.10	—	—	—
39	己内酯	14.465	—	—	—	—	—	—	43.80 ± 2.34 ^a	5.23 ± 0.82 ^c	39.03 ± 7.31 ^b	4.94 ± 0.80 ^c
40	己酸	12.748	—	—	—	—	6.53 ± 0.94	—	—	—	—	—
41	1,3-二氯苯	13.850	—	—	—	3.11 ± 0.57	—	—	—	—	—	—
42	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	13.690	—	—	—	—	—	—	—	—	67.00 ± 16.64	—
43	正癸烷	13.213	—	—	2.36 ± 0.24 ^a	2.04 ± 0.27 ^b	—	—	—	—	—	—

续表3

序号	名称	保留时间/min	猪油	牛油	羊油	鸡油	鸭油	氧化猪油	氧化牛油	氧化羊油	氧化鸡油	氧化鸭油
1-甲-5-(1-甲基乙烯基)环己烯												
44		13.647	—	—	—	4.00 ± 0.89	—	—	—	—	—	—
2-甲基癸烷												
45		14.765	—	—	—	—	13.24 ± 0.83	—	—	—	—	—
46	十一烷	15.893	—	57.23 ± 9.06 ^c	31.82 ± 3.25 ^d	42.80 ± 7.56 ^d	84.05 ± 18.94 ^b	—	—	12.17 ± 2.13 ^e	193.89 ± 40.13 ^a	7.79 ± 1.53 ^e
2,4,6-三甲基癸烷												
47		16.722	2.52 ± 0.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-甲基十一烷												
48		17.808	4.41 ± 0.34 ^d	19.72 ± 3.83 ^a	9.33 ± 1.38 ^e	14.96 ± 2.59 ^b	22.00 ± 1.89 ^a	—	—	—	—	—
49	3-甲基十一烷	18.001	3.08 ± 0.64 ^c	159.08 ± 13.16	5.21 ± 0.70 ^{bc}	7.25 ± 1.12 ^{bc}	11.45 ± 1.96 ^b	—	—	—	—	—
50	十二烷	18.857	68.94 ± 8.69 ^{bc}	—	89.20 ± 6.96 ^b	166.43 ± 33.28 ^a	173.94 ± 27.31 ^a	—	58.43 ± 9.31 ^{bcd}	40.90 ± 5.44 ^{cd}	79.19 ± 27.34 ^b	28.16 ± 6.37 ^{de}
2,6-二甲基十一烷												
51		19.258	—	—	16.27 ± 1.15 ^c	31.75 ± 5.92 ^a	20.89 ± 3.05 ^b	—	—	—	—	—
对-二叔丁基苯												
52		20.391	25.46 ± 3.40 ^{fg}	89.24 ± 3.16 ^b	54.24 ± 4.17 ^d	118.12 ± 15.13 ^a	83.46 ± 8.86 ^{bc}	10.51 ± 1.56 ^b	42.83 ± 2.34 ^{de}	30.76 ± 5.52 ^{ef}	71.95 ± 13.44 ^c	14.85 ± 3.38 ^{gh}
2,6,11-三甲基十二烷												
53		21.114	18.71 ± 1.10 ^c	58.17 ± 1.76 ^a	—	—	—	—	34.83 ± 6.84 ^b	—	51.72 ± 12.50 ^a	9.93 ± 1.39 ^d
54	十三烷	21.643	54.78 ± 6.93 ^b	89.04 ± 4.53 ^a	36.17 ± 2.67 ^c	53.62 ± 9.05 ^b	87.92 ± 4.04 ^a	—	58.14 ± 4.75 ^b	19.13 ± 3.22 ^d	48.80 ± 10.87 ^b	—
4,6-二甲基十二烷												
55		22.349	—	—	—	33.51 ± 9.31	—	—	—	—	—	—
1-甲氧基-4-甲基双环辛烷												
56		22.793	—	—	—	—	—	—	44.97 ± 7.79	—	—	—
2-甲基十五烷												
57		23.323	—	—	—	11.09 ± 2.62	—	—	—	—	—	—
58	十四烷	24.258	21.32 ± 1.96 ^c	47.12 ± 5.39 ^b	25.28 ± 2.76 ^c	62.96 ± 17.33 ^a	42.00 ± 0.19 ^b	20.34 ± 0.43 ^c	37.10 ± 2.06 ^b	17.71 ± 2.64 ^c	67.57 ± 7.30 ^a	—
59	十五烷	26.746	—	—	—	—	9.66 ± 1.47 ^b	—	—	—	—	17.70 ± 2.24 ^a
2,6,10-三甲基十四烷												
60		27.725	—	—	—	—	6.81 ± 0.87 ^b	—	9.59 ± 1.31 ^a	—	—	—
十六烷												
61		29.094	3.10 ± 0.37 ^c	—	—	5.45 ± 0.70 ^b	5.48 ± 0.21 ^b	—	—	—	15.01 ± 1.47 ^a	—
62	十六烷	33.779	—	—	—	—	—	38.61 ± 0.74 ^a	20.61 ± 0.01 ^b	—	16.78 ± 1.16 ^c	—

注：“—”表示未检出；同一指标不同小写字母表示存在显著差异（*P* < 0.05）。下同。

表 4 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后总脂肪酸含量变化 (%)

Table 4 Changes in fatty acid content in muscles of different livestock and poultry before and after lipid thermal oxidation (%)											
脂肪酸	保留时间/min	猪油	牛油	羊油	鸡油	鸭油	氧化猪油	氧化牛油	氧化羊油	氧化鸡油	氧化鸭油
C14:1 n-5	11.528	—	0.12 ± 0.05 ^b	—	—	—	—	0.25 ± 0.02 ^a	—	—	0.01 ± 0.00 ^c
C14:0	11.674	0.90 ± 0.19 ^c	2.57 ± 0.59 ^{ab}	2.30 ± 0.08 ^b	0.21 ± 0.04 ^d	0.25 ± 0.06 ^d	0.93 ± 0.34 ^c	2.92 ± 0.14 ^a	2.06 ± 0.69 ^b	0.27 ± 0.13 ^d	0.33 ± 0.005 ^d
C15:0	13.208	—	0.40 ± 0.03 ^b	0.59 ± 0.03 ^a	0.01 ± 0.0 ^c	0.04 ± 0.00 ^c	0.05 ± 0.01 ^c	0.58 ± 0.05 ^a	0.63 ± 0.21 ^a	0.05 ± 0.02 ^e	0.07 ± 0.01 ^c
C16:2 n-6	14.513	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03 ± 0.00
C16:1 n-7	14.576	2.48 ± 0.40 ^{abcd}	1.69 ± 0.15 ^d	1.98 ± 0.16 ^c	2.97 ± 0.09 ^{ab}	1.91 ± 0.47 ^{cd}	2.38 ± 0.59 ^{de}	2.27 ± 0.24 ^{bcd}	1.92 ± 0.43 ^{cd}	3.20 ± 0.99 ^a	2.59 ± 0.06 ^{abc}
C16:0	14.911	27.36 ± 1.64 ^d	32.10 ± 0.98 ^a	22.44 ± 1.29 ^f	27.27 ± 0.17 ^d	24.58 ± 1.05 ^e	29.43 ± 1.34 ^{bc}	29.68 ± 0.70 ^b	23.50 ± 1.30 ^{ef}	27.62 ± 0.08 ^{cd}	24.82 ± 1.20 ^e
C17:1 n-8	16.379	—	—	1.45 ± 0.10 ^a	—	—	0.08 ± 0.02 ^c	0.38 ± 0.03 ^b	1.33 ± 0.46 ^a	—	0.04 ± 0.00 ^c
C17:0	16.749	—	0.95 ± 0.03 ^d	1.85 ± 0.09 ^b	0.06 ± 0.01 ^{fg}	—	0.21 ± 0.04 ^c	1.30 ± 0.09 ^c	2.26 ± 0.21 ^a	0.14 ± 0.04 ^{cfe}	0.17 ± 0.01 ^{ef}
C18:3 n-3	16.774	—	—	—	0.02 ± 0.00	—	—	—	—	—	—
C18:2 n-6	18.045	8.78 ± 1.39 ^d	3.97 ± 0.16 ^e	4.14 ± 0.29 ^e	18.60 ± 0.40 ^b	21.50 ± 1.19 ^a	5.00 ± 1.27 ^e	2.91 ± 0.25 ^e	3.88 ± 0.64 ^e	15.15 ± 2.80 ^c	19.90 ± 1.59 ^{ab}
C18:1 n-7	18.179	44.22 ± 2.99 ^a	35.23 ± 0.83 ^e	41.08 ± 1.25 ^b	38.07 ± 0.39 ^{cd}	36.06 ± 1.20 ^{de}	40.91 ± 1.74 ^b	34.54 ± 0.53 ^e	38.57 ± 1.02 ^e	36.40 ± 3.01 ^{cde}	34.36 ± 0.47 ^e
C18:1 n-9	18.288	5.29 ± 0.53 ^c	1.87 ± 0.26 ^e	9.26 ± 0.35 ^a	3.68 ± 0.45 ^d	2.67 ± 0.39 ^e	4.94 ± 0.09 ^c	2.31 ± 0.19 ^e	8.01 ± 1.17 ^b	3.55 ± 0.23 ^d	2.46 ± 0.32 ^c
C18:0	18.654	10.26 ± 0.84 ^{fg}	21.00 ± 0.44 ^b	14.75 ± 0.39 ^d	8.98 ± 0.10 ^g	9.97 ± 0.42 ^{fg}	15.24 ± 0.44 ^d	22.62 ± 0.64 ^a	17.63 ± 1.43 ^c	11.90 ± 1.48 ^e	10.84 ± 0.74 ^{ef}
C20:4 n-6	21.248	0.25 ± 0.06 ^{bc}	0.09 ± 0.03 ^{bc}	0.17 ± 0.02 ^{bc}	0.13 ± 0.04 ^{bc}	2.63 ± 1.50 ^a	—	—	—	1.00 ± 0.48 ^b	2.71 ± 0.33 ^a
C20:3 n-6	21.586	—	—	—	—	—	—	—	—	0.17 ± 0.03 ^a	0.09 ± 0.01 ^b
C20:2 n-6	21.945	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.24 ± 0.02
C20:1 n-9	22.041	0.47 ± 0.22 ^{ab}	—	—	—	0.39 ± 0.13 ^b	0.66 ± 0.25 ^a	0.10 ± 0.01 ^c	0.11 ± 0.01 ^c	0.32 ± 0.11 ^b	0.52 ± 0.06 ^{ab}
C20:0	22.537	—	—	—	—	—	0.10 ± 0.03 ^b	0.09 ± 0.02 ^b	0.08 ± 0.01 ^b	0.09 ± 0.02 ^b	0.16 ± 0.03 ^a
C22:5 n-3	24.805	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.05 ± 0.02
C22:4 n-6	25.068	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5 ± 0.04
C22:1 n-9	25.857	—	—	—	—	—	0.06 ± 0.02 ^b	0.05 ± 0.01 ^b	—	0.12 ± 0.05 ^a	0.06 ± 0.02 ^b
C22:0	26.327	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04 ± 0.01 ^a	0.04 ± 0.01 ^a
SFA	—	38.52 ^f	57.02 ^a	41.93 ^d	36.53 ^g	34.84 ^h	45.96 ^c	57.19 ^a	46.16 ^b	40.11 ^c	36.43 ^g
MUFA	—	52.46 ^b	38.91 ^h	53.77 ^a	44.72 ^c	41.03 ^f	44.09 ^d	37.59 ^j	41.93 ^e	40.04 ^g	37.58 ⁱ
PUFA	—	9.03 ^g	4.06 ^j	4.31 ⁱ	18.75 ^d	24.13 ^b	9.94 ^f	5.22 ^h	11.89 ^e	19.87 ^c	25.98 ^a

表 5 不同畜禽肌肉脂质相对含量 (%)

Table 5 Relative content of lipid composition in different livestock and poultry muscles (%)					
新鲜	甘油三酯	游离脂肪酸	胆固醇	甘油一酯	磷脂
猪	83.87±2.51 ^b	0.29±0.11 ^b	1.01±0.40 ^c	0.14±0.06 ^c	14.67±2.06 ^c
牛	79.63±0.98 ^c	0.29±0.12 ^b	0.72±0.05 ^d	—	19.36±0.87 ^b
羊	92.08±1.19 ^a	—	0.41±0.04 ^c	0.19±0.05 ^c	7.31±0.23 ^d
鸡	63.20±1.19 ^d	—	2.34±0.09 ^b	0.51±0.07 ^a	33.95±1.25 ^a
鸭	59.77±0.96 ^c	3.72±0.69 ^a	2.63±0.08 ^a	0.30±0.08 ^b	33.59±0.53 ^a

2.4 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂肪酸含量分析

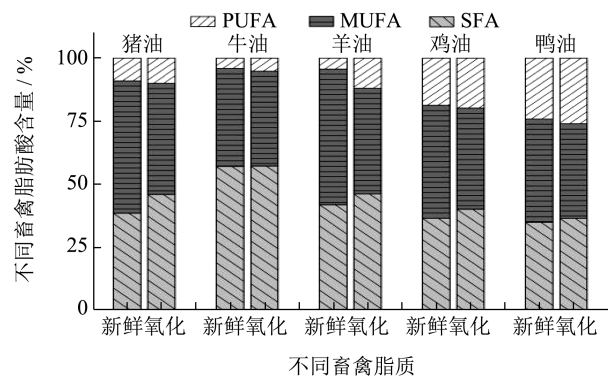


图 3 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂肪酸相对含量
Fig.3 Relative content of fatty acids in muscles of different livestock and poultry before and after lipid thermal oxidation

脂肪酸根据其分子结构中的双键数量，可分为饱和脂肪酸（Saturated Fatty Acids, SFA）、单不饱和脂肪酸（Monounsaturated Fatty Acids, MUFA）和多不饱和脂肪酸（Polyunsaturated Fatty Acids, PUFA）三种类型。醇、醛类挥发性化合物主要来源于不饱和脂肪酸的氧化降解^[8]。图 3 为不同畜禽脂质热氧化前后脂肪酸相对含量变化图。新鲜畜禽脂质鉴定出 14 种脂肪酸，5 种 SFA，6 种 MUFA，3 种 PUFA，SFA 和 MUFA 相对含量较高，如表 4 所示，牛和羊油中 SFA 和 MUFA 含量达到 95% 以上，新鲜畜禽油中棕榈酸（C16:0）和油酸（C18:1）含量最高，含量达到总脂肪酸含量的 60% 以上。五种畜禽脂质热氧化后共鉴定出 21 种脂肪酸，SFA 7 种，MUFA 7 种，PUFA 7 种，氧化后五种畜禽 SFA、MUFA 和 PUFA 种类有所增加，SFA 和 PUFA 含量升高，MUFA 含量降低，可能是热氧化过程中 PUFA 氧化速率大于其前体物质水解速率，导致 PUFA 积累，含量升高，而 MUFA 氧化速率大于前

体物质水解速率，导致其含量降低。

氧化畜禽油中含量最高的是油酸（为 34.36% 以上），亚油酸（C18:2）是五种样品中共同存在，含量差异显著，热氧化鸡、鸭油中含量最高，为 15.15%、19.90%。己醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃的主要来源是亚油酸^[23]。十六碳二烯酸（C16:2）、亚麻酸（C18:3）、二十二碳五烯酸（C22:5）、花生四烯酸（C22:4）仅在热氧化鸭油中检测到。研究表明，甘油三酯（Triacylglycerol, TAG）中主要脂肪酸是油酸、棕榈酸和硬脂酸，磷脂中主要是亚油酸、花生四烯酸、油酸、二十碳五烯酸、棕榈油酸。同一脂肪酸酯化形式为 TAG 和 PC 形式时，TAG 侧链上的油酸和亚油酸的氧化降解能力大于 PC，其原因可能是 PC 头部极性基团具有空间位阻，从而影响侧链脂肪酸的水解^[23]。

2.5 不同畜禽肌肉脂质组成分析

脂质是肉制品风味形成的重要前体物质，脂质种类是形成风味差异的重要因素。通过棒状薄层色谱测定不同畜禽肉脂类组成如表 5 所示。从不同类型脂质在总脂中的占比可以看出，TAG、磷脂（Phospholipid, PL）是不同畜禽脂质的主要成分，占总脂的 90% 以上，游离脂肪酸、甘油二酯（Diacylglycerols, DAG）、胆固醇、甘油一酯占比较低。5 种样品中甘油三酯和磷脂含量呈显著性差异，其中猪、牛、羊油中 TAG 含量较高，羊油中 TAG 含量最高，为 92.08%，鸡、鸭油中 PL 含量较高，为 33% 以上。研究表明，肉制品挥发性风味物质中直链醛、醇、烃和酮类，主要是由甘油三酯和磷脂水解和氧化反应产生，磷脂氧化降解形成不同种类小分子化合物，如醛、酮、醇、羧酸、脂肪烃及呋喃类物质等会影响食品风味组成^[21]。

2.6 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂质分子种分析

2.6.1 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂质分子种差异分析

含有双键脂肪酸侧链的脂质分子在高温和氧气存在的条件下易发生氧化降解，当含有不饱和脂肪酸（Unsaturated Fatty Acid, UFA）的 TAG 氧化时，会分解成一系列小分子挥发性化合物。磷脂类化合物中，PUFA 是氧化反应的主要氧化位点^[24,25]。不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂质分子种变化如图 4 所示，不同畜禽脂质分子种差异显著，热氧化后脂质种类和含量发生显著变化。

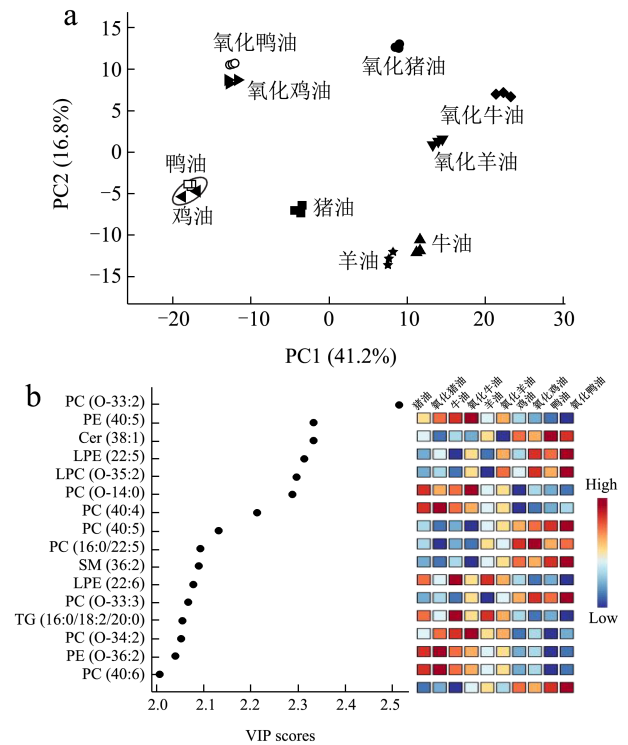


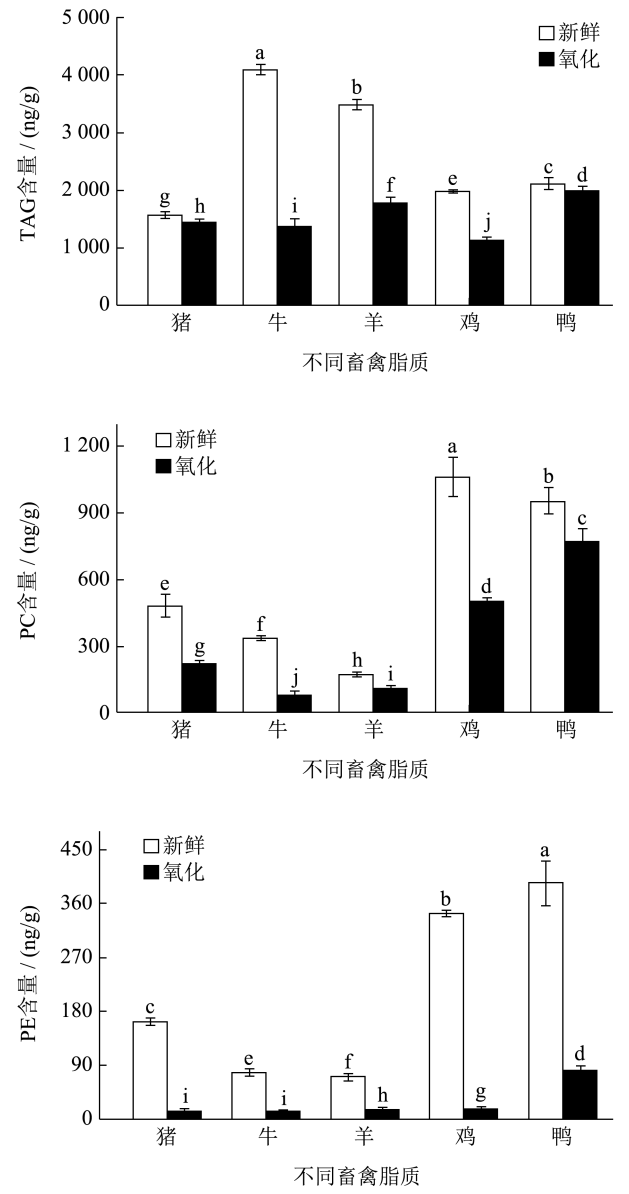
图 4 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂质分子种变化分析
Fig.4 Analysis of changes in lipid species before and after thermal oxidation of lipids in different livestock and poultry muscles

注：(a) PCA 图；(b) PLS-DA 识别的畜禽热氧化前后主要差异脂质分子（VIP>2）。

为了更直观地表示不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂质分子种的变化，对其进行 PCA 分析（图 4）。由图 4a 主成分分析图可知，不同新鲜和氧化的畜禽脂质可以被很好的区分。新鲜鸡油和新鲜鸭油轮廓有部分重叠，表明两种禽类脂质分子种较为相似，与棒状薄层色谱数据一致，新鲜油脂均处于三四象限，氧化脂质均位于一二象

限，畜禽脂质热氧化前后脂质分子种差异显著。图 4b 所示，变量投影重要性（Variable Importance Projection, VIP）可以用来区分畜禽脂质热氧化后的差异脂质，VIP > 2 的脂质有 16 种，包括 8 种 PC，4 种 LPC，2 种 PE，2 种溶血磷脂酰乙醇胺（Lysophosphatidylethanolamine, LPE），1 种 TAG，1 种神经酰胺，1 种鞘磷脂（Sphingomyelin, SM）。五种畜禽氧化后 PE（40:5）含量均降低，LPE（22:5）含量升高，可能是由于热氧化过程中，PE（40:5）发生水解反应，生成 LPE，其中，LPE（22:5）的降解速度小于其生成速度，其含量升高。热氧化后猪、牛油的 PC（40:4）、PC（40:5）、PC（16:0/22:5）含量降低，脂肪酸酯化形式的不同可能造成了风味的差异。

2.6.2 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂质分子种含量变化分析



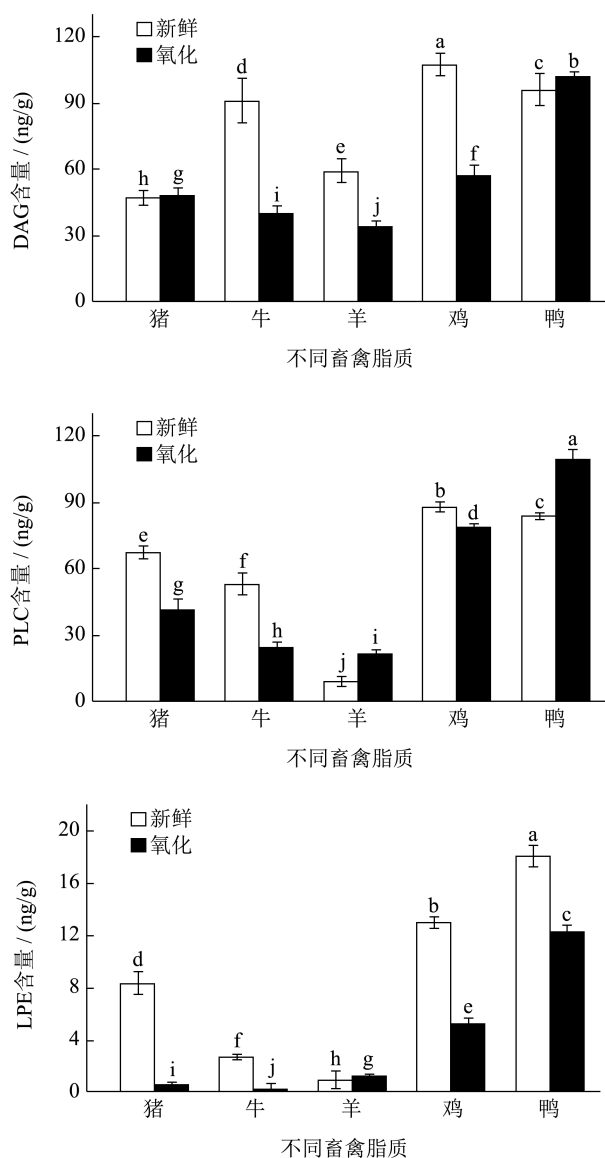


图5 不同畜禽肌肉脂质热氧化前后脂质分子种含量变化图

Fig.5 Changes in lipid species content different livestock and poultry muscles before and after lipid thermal oxidation

注: 图中不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

热氧化前后畜禽脂质组成含量变化如图5所示, TAG和PL是畜禽肌肉脂质中主要脂质种类, 牛、羊油中TAG含量最高(分别为4085.44、3478.00 ng/g), 鸡、鸭油中PL含量最高(为1963.21、3478.00 ng/g)。氧化后, 牛和羊油中TAG、PC、PE、DAG、LPC、LPE含量均显著降低(牛油中TAG降至1363.12 ng/g, 羊油中TAG降至1777.48 ng/g), 猪油热氧化后PC、PE、LPC、LPE含量下降(PC含量由479.73 ng/g下降为221.03 ng/g, PE含量由160.69 ng/g下降为4.38 ng/g), TAG和DAG含量变化无显著性差异, 说明热氧化过程中TAG、DAG中脂肪酸侧链的降解与生成速率达到平衡。氧化后鸡、鸭油中TAG、

PC、PE、LPE含量显著降低, 氧化鸡油中PC含量由1060.53 ng/g降低到503.46 ng/g, PE含量由342.00 ng/g下降为18.22 ng/g, 氧化鸭油中LPC含量升高, 可能是由于热氧化后PC发生了水解或者降解反应^[15], 生成LPC, TAG氧化降解生成DAG, LPC和DAG生成速率大于其氧化降解速率, 其LPC、DAG含量上升。

研究表明, 在动物源食品中, PUFA主要以PL的形式存在^[26]。PL水解后会产生大量的PUFA, 其是肉制品风味形成的关键前体物质, 丰富肉类的口感和香气。与TAG结构相比, 高比例的磷脂含量更易使肉类产生由脂质氧化产生风味物质^[26]。TAG和PL脂肪酸组成及酯化形式是产生不同挥发性风味物质的重要因素。

2.7 畜禽肌肉脂质挥发性化合物与脂肪酸、脂质分子种相关性分析

为了研究香味化合物的前体物质及其形成规律, 本研究分析了畜禽肌肉脂质在热氧化前后脂质分子种、脂肪酸和挥发性化合物间的相关性。红色表示正相关, 蓝色表示负相关。如图6所示, 十二烷和十六烷与饱和脂肪酸肉豆蔻酸(C14:0)、十五碳酸(C15:0)、十五碳酸(C17:0)、十八碳酸(C18:0)呈负相关, 庚醇、庚醛、2-庚醛、己醛、壬醛、十二醛、十一醛、2-十一烯醛、反式-2-癸烯醛、正辛醛、反式-2-辛癸烯醛、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃与油酸(C18:1)、亚油酸(C18:2)、硬脂酸(C20:4)呈负相关。说明畜禽肉风味物质的生成可能是由PUFA氧化降解产生。从图6b中可以看出, 大部分烷烃类与DAG、LPC、PC、TAG、PE、LPE、PS呈正相关, 己醛、壬醛、癸醛、庚醇、庚醛、1-辛烯-3-醇与PE、PC、TAG呈负相关, 其可能是由PE、PC和TAG氧化降解产生的。十二醛、十一醛、2-十一烯醛、反式-2-癸烯醛、正辛醛、反式-2-辛烯醛与LPE和PE呈负相关, 推测其含量升高与PE和LPE的氧化降解有关, 结合图5可知, 氧化鸡、鸭油中己醛、1-辛烯-3-醇含量升高可能是由PE上C18:1氧化降解产生, 滕飞等^[27]研究卤鸭香气有重要贡献作用的壬醛、己醛和1-辛烯-3-醇主要与PC和PE呈负相关。氧化牛油中庚醇、庚醛、2-庚醛可能是由TAG上C18:1、C18:2产生, 氧化猪、牛油中十二醛、十一醛、2-十一烯醛、反式-2-癸烯醛、正辛醛、反式-2-辛癸烯醛可能是由PE和LPE上C18:1、C18:2产生, 氧化羊油中己醛、庚醛含量升高可能是由PC、PE上C18:2氧化降解产生。

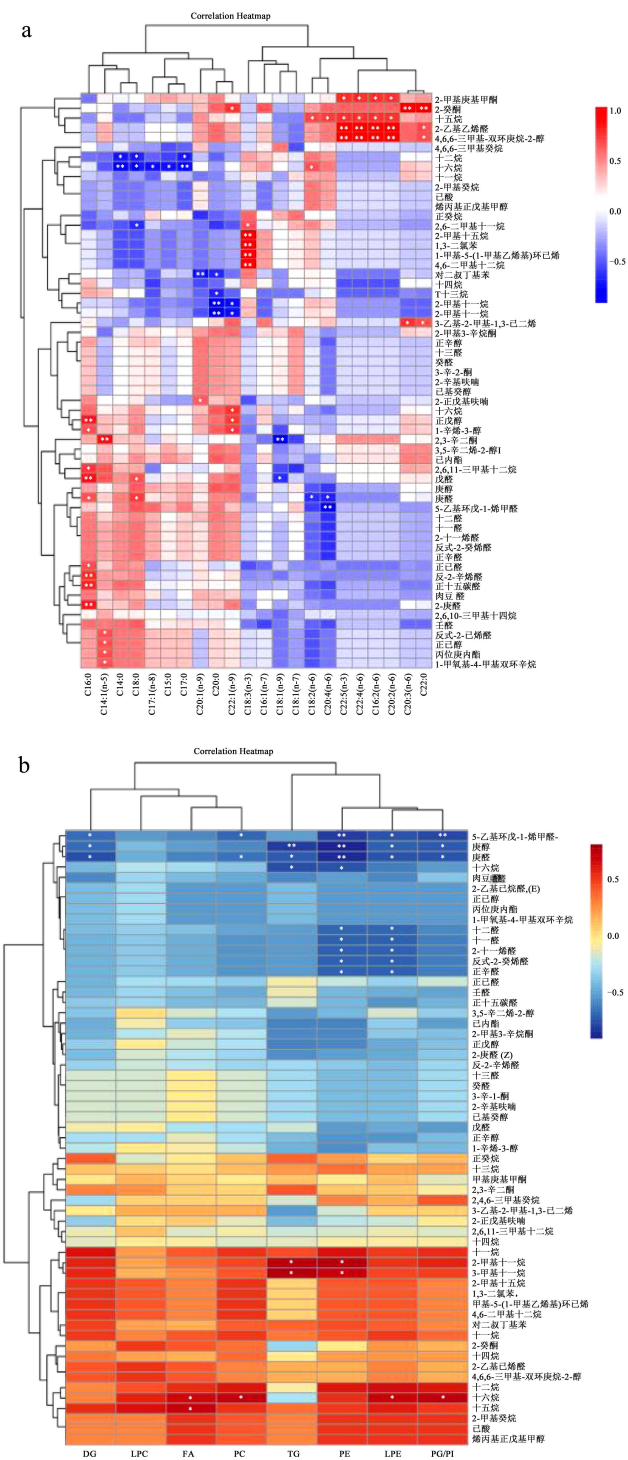


图 6 相关性分析图

Fig.6 Correlation analysis plots

注：(a) 畜禽肌肉脂肪酸组成与挥发性化合物相关性图；(b) 畜禽肌肉脂质分子种与挥发性化合物相关性图。

3 结论

不同畜禽肌肉脂质热氧化后感官差异显著，氧化后五种畜禽脂质脂肪味突出，牛油和羊油具有显著的奶香气味，鸭油、鸡油以及猪油具有突出的

肉香味和肉腥味。醛类是畜禽脂质热加工过程的关键挥发性物质，辛醛、己醛、2-庚醛、反 2-辛烯醛、是猪、牛油主要的醛类。己醛、壬醛是羊、鸭的主要挥发性醛类，己醛、2-庚醛、壬醛是鸡油的主要挥发性醛类，此外，氧化后不同畜禽油脂中 1-辛烯-3-醇和 2-戊基呋喃含量差异显著，可能是造成肉风味差异的关键物质。氧化后畜禽油中油酸（C18:1 为 34.36% 以上），亚油酸（C18:2）含量最高，含量差异显著，热氧化鸡、鸭油中亚油酸含量最高为（为 15.15%、19.90%）。TAG、PC 和 PE 是畜禽肌肉脂质中主要脂质种类，猪油热氧化后 PC、PE、LPC、LPE 含量下降（PC 含量由 479.73 ng/g 下降为 221.03 ng/g，PE 含量由 160.69 ng/g 下降为 4.38 ng/g），TAG 和 DAG 含量变化无差异，牛和羊油中 TAG、PC、PE、DAG、LPC、LPE 含量均显著降低（牛油中 TAG 由 4 085.44 ng/g 降至 1 363.12 ng/g，羊油中 TAG 由 3 478.00 ng/g 降至 1 777.48 ng/g），氧化后鸡、鸭油中 TAG、PC、PE、LPE 含量显著降低（鸡油中 PE 含量由 342.00 ng/g 下降为 18.22 ng/g）。

氧化牛油中庚醇、庚醛、2-庚醛可能是由 TAG 侧链 C18:1、C18:2 氧化产生，氧化猪、牛油中十二醛、十一醛、2-十一烯醛、反式-2-癸烯醛、正辛醛、反式-2-辛烯醛可能是由 PE 和 LPE 上 C18:1、C18:2 产生，氧化羊油中己醛、庚醛可能是由 PC、PE 上 C18:2 氧化降解产生，氧化鸡、鸭油中 1-辛烯-3-醇可能是由 PE 上 C18:1 氧化降解产生。不同畜禽肌肉脂质热氧化后风味物质的不同，与其脂肪酸组成及其酯化形式相关，该研究为脂质氧化品质控制和风味调控提供理论依据和技术支撑。

参考文献

[1] 中国畜牧业经济形势分析及对策研究[J].中国畜牧杂志,2021,57(2):224-230.

[2] FU Y H, CAO S Y, YANG L, et al. Flavor formation based on lipid in meat and meat products: a review [J]. Journal Food Biochemistry, 2022, 46(12): e14439.

[3] BI J C, LI Y, YANG Z, et al. Effect of different cooking times on the fat flavor compounds of pork belly [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(8): e14184.

[4] BRUNTON N P, CRONIN D A, MONAHAN F J. The effect of oxygen exclusion during cooling of cooked turkey breast on the development of lipid oxidation in the stored product [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, 82(9): 1044-1049.

[5] LIU X, PIAO C X, JU M, et al. Effects of low salt on

- lipid oxidation and hydrolysis, fatty acids composition and volatiles flavor compounds of dry-cured ham during ripening [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 187: 115347.
- [6] CHEN J N, ZHANG Y Y, HUANG X H, et al. Integrated volatolomics and metabolomics analysis reveals the characteristic flavor formation in Chouguiyu, a traditional fermented mandarin fish of China [J]. *Food Chemistry*, 2023, 418: 135874.
- [7] RASINSKA E, RUTKOWSKA J, CZARNIECKA-SKUBINA E, et al. Effects of cooking methods on changes in fatty acids contents, lipid oxidation and volatile compounds of rabbit meat [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 110: 64-70.
- [8] SHAHIDI F, HOSSAIN A. Role of lipids in food flavor generation [J]. *Molecules*, 2022, 27(15): 5014.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 何小燕,田洪磊,詹萍,等.羊脂控制氧化工艺的研究[J].*食品科技*,2015,40(4):186-189.
- [12] 王淑慧.鸭骨架酶解及其产物制备鸭肉香精的研究[D].宁波:宁波大学,2013.
- [13] 王文勇,魏丽容.热反应畜肉香精的制备研究进展[J].*肉类工业*,2016,36(9):45-49.
- [14] ZHOU Z, CUI S, CHE J, et al. Unraveling the formation mechanism of egg's unique flavor via flavoromics and lipidomics [J]. *Foods*, 2024, 13(2): 226.
- [15] 张玉莹.鲍鱼热加工过程中醛类香味物质的生成途径及其调控机制研究[D].大连:大连工业大学,2020.
- [16] 李晓东,周春红,马芮萍.7种甘肃产植物油中脂肪酸成分的GC-MS检测分析[J].*现代食品*,2023,29(20):189-191.
- [17] ZHOU Z, ZHANG Y Y, XIN R, et al. Metal ion-mediated pro-oxidative reactions of different lipid molecules: Revealed by nontargeted lipidomic approaches [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(33): 10284-10295.
- [18] 张玉玉,陈怡颖,孙颖,等.热反应鸡肉香精与水煮鸡肉挥发性风味成分的对比分析[J].*中国食品学报*,2016,16(8): 241-247.
- [19] 崔晓红,马力,刘平.热反应猪肉香精的制备及其挥发性风味物质的分析[J].*中国调味品*,2017,42(1):47-51,56.
- [20] XU L R, YU X Z, LI M J, et al. Monitoring oxidative stability and changes in key volatile compounds in edible oils during ambient storage through HS-SPME/GC-MS [J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(3): 2926-2938.
- [21] 雷梦琳,白卫东,刘静宜,等.磷脂降解对食品风味影响的研究进展[J].*食品科技*,2021,46(1):62-68.
- [22] 徐斯婕,钟比真,胡明明,等.9种国产虾酱脂肪酸组成及挥发性风味成分分析[J].*食品与发酵工业*,2023, 53:1-12.
- [23] 李敬.羊肉肌肉脂肪对挥发性风味物质形成作用的研究[D].北京:中国农业科学院,2022.
- [24] WANG Y J, JIANG L, AN D P, et al. Analysis of volatile flavor changes of sea urchin gonads and phospholipids after heating based on GC-IMS [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(11): e17107.
- [25] CHEN D W, BALAGIANNIS D P, PARKER J K. Use of egg yolk phospholipids to generate chicken meat odorants [J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 71-77.
- [26] 姜家帅,孙进华,蒋守群,等.鸡肉挥发性风味物质成分、形成机制及脂质调控研究进展[J].*动物营养学报*, 2023,35(9):5465-5474.
- [27] 滕飞,刘小琳,钟强,等.基于风味组学和脂质组学分析不同品种原料鸭对卤鸭挥发性风味的影响[J].*食品科学*, 2023,52:1-16.