

动物性脂肪对肉品风味影响机制研究进展

刁小琴, 王莹, 贾瑞鑫, 孙薇婷, 刘登勇*, 关海宁*

(渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁省食品安全重点实验室,
生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 锦州 121013)

摘要: 风味是消费者判断肉类食品质量和可接受性的最重要的感官属性之一, 其形成是个复杂的化学反应过程。脂肪是肌肉中的重要组织, 是风味物质形成的前体物质, 其通过水解、热分解、氧化及美拉德等反应产生醛类、酮类及醇类等物质, 形成肉品的特征风味。本文以动物性脂肪为关注视角, 概述脂肪酸组成对风味调控的作用, 归纳脂肪参与风味形成的机理, 并从烹饪方法、加工处理方式、成熟环境及脂肪与其他成分之间的相互作用等方面综述脂肪对风味形成的影响因素, 以期为动物性脂肪在肉制品风味品质调控方面的应用提供理论参考。

关键词: 动物性脂肪; 肉品风味; 产生机理; 影响因素; 相互作用

Progress in Understanding the Mechanism of the Influence of Animal Fat on Meat Flavor

DIAO Xiaoqin, WANG Ying, JIA Ruixin, SUN Weiting, LIU Dengyong*, GUAN Haining*

(National and Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Food Safety Key Laboratory of Liaoning Province, College of Food and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

Abstract: Flavor is one of the most important sensory attributes for consumers to judge the quality and acceptability of meat, and its formation is a complex biochemical reaction process. Fat is an important tissue in muscle and a precursor for the formation of flavor substances. Its hydrolysis, thermal decomposition, oxidation and Maillard reactions produce aldehydes, ketones and alcohols contributing to the characteristic flavor of meat. From the perspective of animal fat, this article summarizes the effect of fatty acid composition on flavor regulation, and the mechanism by which fat participates in flavor formation. In addition, the factors influencing the contribution of fat to flavor formation are summarized from the perspectives of cooking methods, processing methods, maturation environment and the interaction between fat and other ingredients. It is expected that this review will provide a theoretical reference for regulating the flavor quality of meat products with animal fat.

Keywords: animal fat; meat flavor; production mechanism; factor; interaction

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20211206-235

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2022) 03-0045-07

引文格式:

刁小琴, 王莹, 贾瑞鑫, 等. 动物性脂肪对肉品风味影响机制研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(3): 45-51. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20211206-235. <http://www.rlyj.net.cn>

DIAO Xiaoqin, WANG Ying, JIA Ruixin, et al. Progress in understanding the mechanism of the influence of animal fat on meat flavor[J]. Meat Research, 2022, 36(3): 45-51. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20211206-235. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2021-12-06

基金项目: 辽宁省教育厅科学技术研究项目 (LJ2020006); 渤海大学博士科研启动基金项目 (05013/0520bs007);
辽宁省自然科学基金面上项目 (2019-MS-006)

第一作者简介: 刁小琴 (1979—) (ORCID: 0000-0002-9863-3943), 女, 副教授, 博士, 研究方向为肉品加工与质量安全控制。

E-mail: diaoxiaoqing172@163.com

*通信作者简介: 刘登勇 (1979—) (ORCID: 0000-0003-4588-9985), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品风味与感知科学。E-mail: jz_dyliu@126.com

关海宁 (1980—) (ORCID: 0000-0002-2232-1564), 男, 副教授, 博士, 研究方向为功能性成分分析及肉制品加工技术。E-mail: hai.ning2001@163.com

风味特征是消费者判断肉制品品质优劣的重要指标。脂类作为主要产生香味的前体物质在很大程度上影响香味的形成,不同肉质香味的差异主要是由脂肪氧化产物不同导致^[1]。脂质氧化与蛋白质氧化产物的相互关联也是肉类及其制品最重要的属性之一,是影响风味形成的有效途径。Han Dong等^[2]通过对熟猪肉的挥发性成分进行测定和分析,共鉴定出61种挥发性化合物,其中25种化合物为水煮猪肉中具有气味活性的化合物,主要通过脂质氧化和降解反应产生。Frank等^[3]研究发现,烤牛肉的味道是通过肌纤维、结缔组织(胶原蛋白)与脂肪基质中递送的芳香挥发物相互作用而产生,同时肌肉内脂肪(intramuscular fat, IMF)在其中起着至关重要的作用。肌肉中IMF含量较高会产生大量重要脂质衍生挥发物,大多数非挥发性组分是水溶性的,随着IMF在肉中所占比例的增加,它们在水相中的相对含量也随之增加,进而有助于人们对肉有更好的风味感知^[4]。Alonso等^[5]研究也发现,IMF的增加决定着肉制品的主体风味。更多的学者也进一步揭示了肌肉与脂肪组织经一系列复杂热诱导反应后,特别是脂肪(作为风味化合物的溶剂)及其与肉中其他成分的交互作用会影响风味化合物的释放^[6]。这些研究对动物性脂肪影响其风味调控、风味形成机理探究及风味改良等方面有重大贡献。

本文以动物性脂肪为关注视角,概述动物性脂肪基本属性来源、与风味物质的构成关联,总结关键性反应途径下脂肪参与风味形成机理,并进一步从代谢途径、贮藏条件及处理干预的角度综述脂肪对风味调控的贡献,为动物性脂肪在风味物质的调节、研究、提取与分析等方面的研究提供参考。

1 脂肪酸组成对鲜肉风味的调控

鲜肉的风味特征很大程度上依赖于肉中的挥发性化合物,而挥发性化合物又取决于脂肪酸的组成^[7]。李义海等^[8]研究报道,羊肉脂肪中的挥发性脂肪酸构成了羊肉的特征风味。李文博等^[9]分析苏尼特羊肉中主要脂肪酸与特征挥发性风味物质的相关性,结果表明,羊肉中主要挥发性化合物为己醛、壬醛、1-辛烯-3-醇和2,3-辛二酮,这些挥发性风味物质与脂肪酸含量呈正相关性,其中己醛和主要醇类物质1-辛烯-3-醇与花生四烯酸呈显著正相关($P<0.05$),与反式亚油酸呈正相关。罗玉龙等^[10]对苏尼特羊的股二头肌、背最长肌、臀三头肌3个部位肌肉进行挥发性成分和脂肪酸分析,结果发现,背最长肌中的醛类和醇类含量高于臀三头肌和股二头肌,可能是因为背最长肌单不饱和脂肪酸的含量高于股二头肌与臀三头肌。Watkins等^[11]研究发现,沉积在脂肪中的支链脂肪酸是羊肉特异性风味的主要贡献者,且随着动物年龄的增

长而增加。刚虎军等^[12]研究得出,一些支链脂肪酸、月桂酸、酯类、烯醛类等与羊肉的膻味有关。丁艳艳等^[13]也得出,4-甲基辛酸、4-甲基壬酸等支链脂肪酸对羊肉膻味影响显著。此外,孔圆圆等^[14]在羊肉主要风味前体物质与羊肉风味的关系及影响因素研究中发现, C_6 、 C_8 、 C_{10} 等低级挥发性脂肪酸为羊肉致膻的主要成分,其中 C_{10} 起主要作用。黄春红等^[15]研究表明,羊肉膻味还与硬脂酸含量呈正相关。由此可见,脂肪酸组成及含量会影响肉品的风味。另外,O'Quinn等^[16]研究发现,经玉米饲养后的牛肉总体风味比草饲牛肉更好,主要是由于不同饲养方式造成脂质沉积和脂肪酸组成不同,进而引起风味效应差异。

2 脂肪产生风味的机理

肉制品在贮藏和加工过程中,脂质氧化产生的腐臭和异味是其品质下降的主要原因,但低程度的脂质氧化可以增强肉的风味^[17]。大量研究表明,脂肪在肉制品风味形成中有两大重要作用:一是作为风味化合物的溶剂,在风味化合物形成过程中为蓄积风味物质提供场所;二是通过水解、氧化或其他化合物进一步发生酯化、美拉德反应等形成各种风味化合物。脂肪产生风味的机理如图1所示。

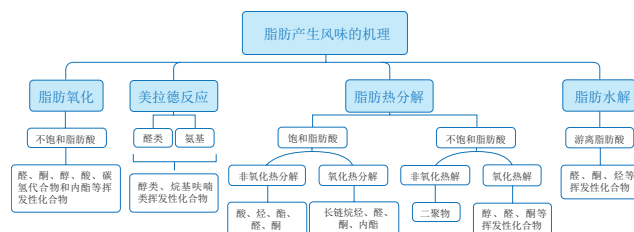


图1 脂肪产生风味的机理

Fig. 1 Mechanism of flavor formation from fat

2.1 脂肪氧化途径

脂质氧化通常被认为是一种由自由基链反应引起的非酶自动催化反应,初期产物为氢过氧化物,最终分解成挥发性化合物,包括醛、酮、醇、酸、碳氢化合物和内酯^[18]。Shi Yanan等^[19]研究大河乌猪干腌火腿风味形成的原因及其关键成分时发现,大河乌猪干腌火腿中最丰富的风味化合物是醛类和醇类,其中己醛、3-甲基丁醛、壬醛和辛醛是火腿的特征化合物,主要来源于脂肪氧化。Zhang Jian等^[20]研究无骨干腌火腿风味物质时发现,由脂质氧化产生的己醛、1-辛烯-3-醇、辛醛和壬醛是其主要的特征挥发物。Bai Shuang等^[21]研究羊肉臊子中挥发性风味物质的形成机理,结果发现,炒制过程中脂肪氧化产生的醛类、醇类和酯类等物质是挥发性物质的主要来源。李翔等^[22]研究香肠熏制过程中挥发性物质时

发现, 羰基化合物、酯类物质和萜烯类物质是香肠挥发性物质的主体成分, 其中的羰基化合物主要由亚油酸和花生四烯酸氧化而来。王丽等^[23]在揭示安福火腿的品质特性及其主体挥发性风味物质成分时发现, 安福火腿皮下脂肪中挥发性风味物质的总含量高于IMF, 皮下脂肪的挥发性风味物质是干腌火腿风味的主体部分, 可能与皮下脂肪中较高的游离脂肪酸含量以及发生的不同程度氧化与水解反应产生醛类、醇类、烃类等化合物有关。

2.2 美拉德反应与脂质氧化相互作用途径

美拉德反应是肉制品加工中另一个重要的反应, 它与脂质氧化遵循着相似的反应途径、有着共同的中间产物, 因此研究者们开始关注它们之间的相互作用。有研究发现, 脂质氧化产物可以直接促进美拉德反应或与该反应某些中间体相互作用, 从而影响美拉德反应, 生成与无脂质参加时的美拉德反应不同的产物^[24]。另外, 脂质降解产物可以与美拉德反应的生成物发生交互作用, 进而生成更多的风味物质^[25-26]。张永生等^[27]研究发现, 淘汰蛋鸡骨架酶解物的美拉德反应在醇厚感、炖煮鸡汤味、持续性、鲜味及和谐性等方面表现最佳, 其原因可能与淘汰蛋鸡骨架中较高的脂肪含量有关, 而这些脂质在美拉德反应中发挥了重要作用。Aaslyng等^[28]研究发现, 脂肪酸可以与美拉德反应物发生反应, 形成气味阈值较低的风味化合物, 对风味产生更大的影响。黄泰来等^[29]以鸡肉为研究对象, 研究脂质代谢对鸡肉风味的影响时发现, 脂质氧化降解产生的醛类物质或磷脂中极性基团上的氨基可以与美拉德反应物相互作用, 一方面, 通过减少由美拉德反应产生的含硫化合物, 改善肉的风味, 另一方面, 与美拉德反应物共同作用生成挥发性化合物, 如醇类、烷基呋喃类等物质, 从而影响肉的风味。赵晓策^[30]在研究滩羊肉煮制过程中挥发性风味物质形成及变化时发现, 滩羊肉脂肪中有来自亮氨酸Strecker降解后呈黑巧克力味的3-甲基丁醛, 这是因为滩羊机体中的脂肪、蛋白质和碳水化合物等均参与代谢活动, 导致脂肪组织中存在氨基酸, 肌肉组织中存在磷脂。

2.3 脂肪热分解途径

加热能促进不饱和脂肪酸降解并产生许多风味化合物, 尽管大部分风味化合物的气味阈值相对较高, 但因它们含量高仍然可以影响肉的味道。Xie Qiusheng等^[31]研究水煮盐水鸭时发现, 饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸含量均呈下降趋势, 说明热处理促进了鸭腿肌游离脂肪酸的氧化损失, 促进醛和酮等挥发性化合物的生成。Zhang Jianhao等^[32]在研究高温对金华火腿脂肪分解和氧化的影响中发现, 35~37℃能有效促进金华火腿脂解, 也可促进氧化产物进一步反应和降解, 促进金华火腿风味的形成。Yao Wensheng等^[33]用顶空-气相色谱-离子迁移谱法分析德州红烧鸡生产过程中风味的形成, 在德州

红烧鸡样品中共鉴定出37种风味物质, 包括醛类、醇类、酮类、酯类、萜类、呋喃类和吡嗪类等, 其中大部分来源于脂类的热降解和美拉德反应。Liu Huan等^[34]在研究北京烤鸭香气形成过程时发现, 北京烤鸭在烘烤过程中, 包括含硫化合物、醛类和醇类在内的9种关键香气成分含量显著增加, 脂肪热分解导致游离脂肪酸含量升高, 不饱和脂肪酸含量越高, 越容易分解成醛和醇。

2.4 脂肪水解途径

脂肪水解是在脂肪酶作用下将脂质水解成游离脂肪酸, 其中的不饱和脂肪酸进一步氧化产生大量挥发性化合物。Zhao Bing等^[35]研究发现, 中式干香肠中的风味物质主要来源于脂肪的氧化和水解, 中性脂肪、游离脂肪酸和磷脂的变化可以反映脂肪氧化和水解的程度, 对风味有显著影响。另外, 韦友兵等^[36]在萨拉米香肠发酵成熟的过程中发现, 脂质在微生物以及中性脂酶、酸性脂酶、磷脂酶等内源酶的作用下不断水解生成游离脂肪酸, 大量的不饱和脂肪酸再被氧化成其他小分子烃类、醛类、醇类及酮酸类物质, 形成产品的风味和滋味。田星等^[37]的研究发现, 脂肪可以水解产生甘油和脂肪酸, 脂肪酸经过一系列反应产生 α -酮戊二酸, 从而产生谷氨酸, 而谷氨酸含量的增加有助于5'-肌苷酸的生成, 从而提高肉品的鲜味。

3 脂肪产生风味的影响因素

3.1 烹饪工艺的影响

3.1.1 烹调方式

在烹调过程中, 脂肪从肉中融化流出, 释放出一些与脂肪相关的挥发性化合物, 这些挥发性化合物产生了熟肉制品的香味。油炸作为传统烹饪方法之一, 能够形成香气化合物, 然而长时间的油炸处理会改变脂肪酸组成, 导致脂质氧化增加^[38]。Legako等^[39]在研究电烤锅烹调对中性及极性脂质的脂肪酸影响时发现, 烹饪对极性脂质的不饱和脂肪酸有很大影响, 这是因为在烹饪过程中不饱和脂肪酸发生了热氧化反应。Yu Yuanrui等^[40]在研究不同烹调方法对云南瓢鸡中游离脂肪酸、水溶性化合物和风味成分的影响时发现, 烤鸡中饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸含量最高, 炸鸡中多不饱和脂肪酸含量最高, 水煮鸡中单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸含量降低, 每种烹饪方法都能使瓢鸡产生独特的风味, 这可能与鸡肉脂肪水解为脂肪酸并溶解在汤中有关。

3.1.2 盐添加量

盐含量不仅影响化合物的形成, 还影响风味物质的释放。Wang Ying等^[41]在研究不同盐添加量(分别为4%低盐和8%高盐)对干腌鹅中脂肪氧化及挥发性物质产生的影响时发现, 与低盐组相比, 在整个腌制

过程中高盐组具有较高的脂质水解和氧化水平,可能是因为较高的盐含量降低了水分活度,有利于激活酸性脂肪酶并灭活中性脂肪酶,另外,一定添加量的氯化钠也可以促进脂解酶的活性,进而提高由脂类衍生物产生的风味化合物含量。周慧敏等^[42]研究不同食盐含量(分别为原料肉质量的2%、3%、4%、5%)对风干猪肉挥发性风味物质的影响,结果发现,随着食盐用量的增加,烃类、醛类、醇类和酯类物质的含量呈先增加后降低的趋势,在食盐用量为4%时含量达到最高,这主要是由于脂肪氧化是腌腊肉制品中醛、醇、烃类物质的主要生成途径,在一定范围内增加食盐含量能够促进肌肉中的脂肪氧化,但是当食盐含量达到临界值后,继续增大盐含量则会抑制脂肪氧化。Zhang Jian等^[20]在研究无骨干腌火腿加工过程中脂肪氧化及挥发性物质的变化时发现,随着氯化钠含量的增加,由脂肪氧化产生的挥发性物质在整个加工过程中不断增多,占总挥发性物质的39.76%~40.75%,挥发性物质的形成有利于香气的形成,说明在一定范围内,氯化钠含量的增加对挥发性风味物质的形成有积极影响。Guo Xin等^[43]在研究新疆干腌羊肉火腿加工过程中风味物质的变化时发现,在盐渍和干燥过程中,由于氧和盐促进了脂质氧化,导致初级氧化产物快速积累,随后次级脂质氧化产物(如醛类和酮类)逐渐形成。田星等^[44]对不同食盐添加量(1%、2%、3%)的中式风干香肠挥发性风味成分进行鉴定和分析,结果发现,随着食盐添加量的增加,各类挥发性风味物质的种类也增多,可能是因为食盐影响了脂肪氧合酶、蛋白水解酶等活性,酶又催化脂肪氧化和蛋白质水解,进一步影响产品风味。

3.2 加工处理方式的影响

3.2.1 酶解修饰

脂质是肉制品中含量仅次于蛋白质的主要化学成分,在加工过程中脂肪水解和脂肪酸氧化等均受到脂肪相关酶类的催化影响,进而形成特征挥发性化合物^[45]。封莉等^[46]研究不同添加量的脂肪酶对中式香肠脂质降解和脂肪氧化的影响,结果发现,添加适量的脂肪酶能有效加速中式香肠中脂肪的降解和氧化,促进香肠中脂质来源的挥发性风味物质生成。郝卓莉等^[47]利用多酚氧化酶、脂肪氧化酶和胶原蛋白酶对鳕鱼进行处理,结果发现,经脂肪氧化酶处理的鳕鱼,醛类物质含量最高,而经多酚氧化酶处理的样品,其醛类物质含量较低。Yang Yang等^[48]在研究非熏制腊肉加工过程中挥发性风味物质的变化时发现,由于中性脂肪酶的作用,从生肉期至干熟期,1 d内游离脂肪酸含量增加,同时,脂肪氧合酶是与游离脂肪酸氧化有关的主要内源性酶,该酶在引起非熏制腊肉的干腌和干熟过程中的脂质氧化起着重要作用。刁玉段等^[49]也报道,脂肪氧合酶催化不饱和脂肪

酸的加氧反应,生成的氢过氧化物裂解生成挥发性的醛类和醇类,从而对食品的风味产生很大影响。

3.2.2 高压处理

高压加工技术具有良好的抑制肉制品色泽、风味和热敏性营养物质劣变的能力,逐渐受到研究者和肉制品生产商的重视^[50]。Huang Yechuan等^[51]在研究高压结合热处理对猪肉脂质水解和氧化的影响时发现,高压(600 MPa)结合热处理(50 ℃)可显著促进IMF的水解和氧化,导致磷脂含量和游离脂肪酸的组成发生显著变化,进而影响肉品风味。Yang Yang等^[52]在研究高压处理对酱油腌制猪肉脂肪氧化分解的影响时发现,经高压处理后,游离脂肪酸的组成发生显著变化($P<0.05$),这归因于甘油三酯和磷脂的脂解,同时总饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸含量均显著减少($P<0.05$),这可能是因为高压加工过程中,中性脂肪酶和酸性脂肪酶的活性显著降低,也可能是由于单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸发生了氧化,同时还产生了大量的挥发性化合物。然而,压力过高会对食品风味造成不利影响。Martínez-Onandi等^[53]在研究高压处理对伊比利亚火腿挥发性成分的影响时发现,当伊比利亚火腿在600 MPa高压下处理后,一些带有难闻气味的脂质氧化产物,如壬醛、甲硫醇和二甲基三硫化物含量升高,一些具有良好风味的挥发性化合物,如丙酸、丁酸、戊醇、醛类、酯类的含量都有不同程度的下降。

3.2.3 超声波处理

超声波技术近年来在肉品行业被广泛应用,除作为清洗和杀菌加工设备外,还可以测量活体动物的脂肪深度,改变肌肉组织的生理特性等^[54]。Peña-González等^[55]对4 ℃保存的牛肉进行高强度超声(high intensity ultrasound, HIU)处理,研究其对脂质氧化的影响,结果发现,HIU处理可以促进脂质氧化和肉中羰基的形成,原因可能是超声波通过空化效应破坏细胞膜和胶原蛋白、使蛋白质变性,并促进自由基的形成,进而加快脂肪氧化。Zou Yunhe等^[56]研究超声辅助烹饪对五香牛肉风味的影响,结果表明,超声处理对五香牛肉的终期氧化产物硫代巴比妥酸反应物有显著影响($P<0.05$),也是因为超声空化效应结合高温使脂质更容易被氧化。

3.2.4 干燥处理

Shi Shuo等^[57]对内蒙古不同地区采用传统天然干燥与现代热风干燥得到的牛肉干品质进行研究,结果发现,经传统天然干燥后的呼和浩特牛肉干和巴彦淖尔牛肉干中醛、酮、酯、1-戊醇、1-己醇、1-庚醇、1-辛醇等风味化合物的含量均高于现代热风干燥处理后的牛肉干,其中1-戊醇、1-己醇、1-庚醇和1-辛醇都是脂肪酸氧化的产物,说明传统天然干燥比热风干燥更有利于脂质的适当氧化,使其更具有肉味。张佳敏等^[58]研究烘烤与风干干燥

对四川腊肉脂质氧化的影响发现,自然风干有利于减缓脂质氧化和促进风味脂肪酸的形成。赵娟红等^[59]研究冷冻干燥和恒温干燥对牦牛肉风味物质的影响时发现,常压煮熟、恒温干燥的牦牛肉,赋予牛肉愉快甜香味和水果味的醛类物质含量较冷冻干燥的高,而这些醛类物质主要来源于脂肪氧化。因此,干燥方式也会影响脂肪变化,进而影响肉品的风味。

3.3 成熟方式的影响

成熟是指在一定条件下改善肉类风味、品质的贮藏过程,肉类中常见的2种成熟方法是湿法成熟和干法成熟。干法成熟通常是指将胴体或分割肉不加任何包装和保护措施,置于低温(-1~4℃)环境中自然成熟数天,湿法成熟则是在相同条件下将肉品进行真空包装成熟^[60]。与传统的湿法成熟相比,干法成熟后的肉制品可以产生更好的风味特征^[61]。Khan等^[62]在研究经干法成熟的牛肉时发现,在成熟过程中脂肪酸氧化产生的挥发性化合物数量增加,并影响牛肉风味强度。Vossen等^[63]在研究干法成熟对比比利时蓝牛肉感官品质的影响时发现,干法成熟9周后比利时蓝牛肉风味达到可接受限度,可能是因为比利时蓝牛肉中多不饱和脂肪酸含量较高,进而推测干法成熟过程可能会加快脂质氧化的进程。Watanabe等^[64]在研究成熟对牛肉挥发性物质的影响中发现,非芳香族化合物,如正庚醛和辛烷的含量在不同成熟阶段存在显著差异($P<0.05$),成熟30 d的含量高于2 d,可能是成熟期间脂质氧化引起的。Zhang Renyu等^[65]研究成熟方法对牛肉中脂肪氧化的影响发现,长期冷冻贮藏的袋装成熟牛肉能延缓脂质的过度氧化,进而改善风味,因为包装袋具有一定的阻隔功能,能降低脂质的过度氧化,脂质的过度氧化可能会导致肉制品产生异味以及不饱和脂肪酸的损失。

4 脂肪与其他成分相互作用对其风味的调节

脂肪与食品中其他组分,如蛋白质、碳水化合物、矿物质等相互作用也会对风味产生一定的影响。Li Binbin等^[66]研究4种不同温度下(-20、40、55、80℃)发生脂质氧化后的猪肉对川式香肠成熟过程中肌肉蛋白质氧化的影响发现,蛋白质氧化和脂质氧化之间存在正相关性,氧化程度越高的脂质对蛋白质的氧化反应越强,最终影响肉制品的品质。Zhang Jian等^[67]在研究蛋白质与风味间的关系时发现,不饱和脂肪酸氧化产生的一些风味,如醛、酮和醇可以与蛋白质中特定的氨基酸残基非共价或共价结合,进而改变食物的风味特征。王兆明等^[68]研究脂质和蛋白质在肉品中的氧化及交互氧化机制发现,脂质和蛋白质氧化均为自由基链式反应,氧化反应可以在脂质和蛋白质间相互转移,并且氧化过程中产生的自由基等活性氧物质是脂质和蛋白质交互

导氧化的重要途径,肌红蛋白氧化生成的活性氧物质和高铁肌红蛋白等物质可以促进脂质的氧化,进而影响肉品的风味。Wang Wenli等^[69]研究发现,在贮藏过程中,肌红蛋白被金属催化和脂肪氧化以及其他因素导致蛋白质羰基化,进而影响肉品风味。

林耀盛等^[70]在研究蔗糖添加量对风干腊肠风味物质的影响中发现,蔗糖通过水解产生一定量的葡萄糖和果糖,而葡萄糖作为还原性单糖,参与蛋白质降解产生的美拉德反应,促进脂质降解和氧化,进而提高腊肠风味。周宇^[71]研究钾钙复配盐对低钠盐培根风味的影响发现,添加0.5%钾钙复配盐能显著促进关键挥发性酚类物质的释放和关键挥发性醛类物质的生成,钾钙复配盐的添加能提升多不饱和脂肪酸的氧化程度,促进直链醛的形成,从而改善风味^[72]。

5 结语

脂肪氧化、美拉德反应、脂肪热分解和脂肪水解都有利于风味的形成,烹调方式、盐添加量、加工处理方式、成熟方式以及食品中的蛋白质、碳水化合物、矿物质等与脂肪的相互作用都会影响动物性脂肪产生风味,这有助于调控肉类原料,生产出风味优异的肉制品,满足人们对肉类风味的需求。然而,不同肉制品通过脂质氧化、热分解、水解及美拉德反应等形成的特征风味不同,因此不同种类前体风味物质与脂质所发生的系列反应的相关性需要进一步研究。同时,脂质的适度水解和氧化有利于产品风味的形成,但是如何及时、精确地检测和控制其变化程度还有很大的研究空间。另外,肉类食品的加工工艺、成熟与贮藏方式等均影响肉制品特征风味的产生,为更好地保障肉制品品质及风味,对贮藏加工方式与脂质发生的系列反应之间的关联性还需深入研究,最终实现肉类食品的品质和风味具有良好的持久性和稳定性,推动肉类食品行业的发展。

参考文献:

- [1] 罗玉龙,靳志敏,刘夏炜,等.肉制品中香味物质形成原因研究进展[J].食品与发酵工业,2015,41(2):254-258. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201502045.
- [2] HAN Dong, ZHANG Chunhui, FAUCONNIER M L, et al. Characterization and differentiation of boiled pork from Tibetan, Sanmenxia and Duroc×(Landrac×Yorkshire) pigs by volatiles profiling and chemometrics analysis[J]. Food Research International, 2020, 130: 108910. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108910.
- [3] FRANK D, KACZMARSKA K, PATERSON J, et al. Effect of marbling on volatile generation, oral breakdown and in mouth flavor release of grilled beef[J]. Meat Science, 2017, 133: 61-68. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.06.006.
- [4] FRANK D, BALL A, HUGHES J, et al. Sensory and flavor chemistry characteristics of Australian beef: the influence of intramuscular fat, feed and breed[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(21): 4299-4311. DOI:10.1021/acs.jafc.6b00160.

- [5] ALONSO V, NAJES L M, PROVINCIAL L, et al. Influence of dietary fat on pork eating quality[J]. *Meat Science*, 2012, 92(4): 366-373. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.01.004.
- [6] WATKINS P J, DAMIAN F, SINGH T K, et al. Sheep meat flavor and the effect of different feeding systems: a review[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(15): 3561-3579. DOI:10.1021/jf303768e.
- [7] MAUGHAN C, TANSAWAT R, CORNFORTH D, et al. Development of a beef flavor lexicon and its application to compare the flavor profile and consumer acceptance of rib steaks from grass- or grain-fed cattle[J]. *Meat Science*, 2012, 90(1): 116-121. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.06.006.
- [8] 李义海, 张禹, 张效生, 等. 日粮对羊肉风味和品质的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2018(23): 39-42. DOI:10.13881/j.cnki.hljxmsy.2018.03.0287.
- [9] 李文博, 罗玉龙, 刘畅, 等. 饲养方式对苏尼特羊肉挥发性风味成分和脂肪酸组成的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(24): 207-213. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190107-095.
- [10] 罗玉龙, 赵丽华, 王柏辉, 等. 苏尼特羊不同部位肌肉挥发性风味成分和脂肪酸分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(4): 165-169. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201704026.
- [11] WATKINS P J, JABOREK J R, FEI Teng, et al. Branched chain fatty acids in the flavour of sheep and goat milk and meat: a review[J]. *Small Ruminant Research*, 2021, 200(8): 106398. DOI:10.1016/j.smallrumres.2021.106398.
- [12] 刚虎军, 古扎力孜·肉孜, 苑贝贝, 等. 新疆多浪羊不同部位脂肪组织中挥发性风味成分分析[J]. *肉类研究*, 2017, 31(8): 28-33. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201708006.
- [13] 丁艳艳, 王亮亮, 韩伟杰, 等. 不同绵羊品种膻味物质分离、鉴定和比较分析[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(11): 17-21. DOI:10.3969/j.issn.1004-1389.2011.11.004.
- [14] 孔园园, 张雪莹, 李发弟, 等. 羊肉主要风味前体物质与羊肉风味的关系及影响因素的研究进展[J]. *农业生物技术学报*, 2021, 29(8): 1612-1621. DOI:10.3969/j.issn.1674-7968.2021.08.018.
- [15] 黄春红, 冷瑞丹. 肉类食品中典型异味物质研究进展[J]. *肉类研究*, 2020, 34(3): 88-93. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191114-276.
- [16] O'QUINN T G, WOERNER D R, ENGLE T E, et al. Identifying consumer preferences for specific beef flavor characteristics in relation to cattle production and postmortem processing parameters[J]. *Meat Science*, 2016, 112: 90-102. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.11.001.
- [17] KANOKRUANGRONG S, BIRCH J, BEKHIT E. Processing effects on meat flavor[M]//VARELIS P, MELTON L, SHAHIDI F. *Encyclopedia of food chemistry*. Elsevier, 2019: 302-308. DOI:10.1016/B978-0-08-100596-5.21861-1.
- [18] XU Lirong, YU Xiuzhu, LI Mengjun. 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*, 2018, 20: 1-13. DOI:10.1080/10942912.2017.1382510.
- [19] SHI Yanan, LI Xiang, HUANG Aixiang. A metabolomics-based approach investigates volatile flavor formation and characteristic compounds of the Dahe black pig dry-cured ham[J]. *Meat Science*, 2019, 158: 107904. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.107904.
- [20] ZHANG Jian, PAN Daodong, ZHOU Guanghong, et al. The changes of the volatile compounds derived from lipid oxidation of boneless dry-cured hams during processing[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2019, 121(10): 1900135. DOI:10.1002/ejlt.201900135.
- [21] BAI Shuang, WANG Yongrui, LUO Ruiming, et al. Formation of flavor volatile compounds at different processing stages of household stir-frying mutton Sao Zi in the northwest of China[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 139(5): 110735. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110735.
- [22] 李翔, 聂青玉, 赵福奎, 等. 低温长时间熏制过程中香肠挥发性物质及脂肪氧化变化[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(8): 57-64. DOI:10.13718/j.cnki.xdsk.2021.08.008.
- [23] 王丽, 刘光宪, 张德权, 等. 安福火腿游离脂肪酸、风味物质及氨基酸分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(16): 236-242. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020090113.
- [24] 杨壹芳, 余沁芯, 肖子涵, 等. 脂质氧化对肉制品中4类有害物质形成影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(21): 355-364. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200929-367.
- [25] BENET I, GUÀRDIA M D, IBAÑEZ C, et al. Analysis of SPME or SBSE extracted volatile compounds from cooked cured pork ham differing in intramuscular fat profiles[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 393-399. DOI:10.1016/j.lwt.2014.08.016.
- [26] 冯宇隆, 谢明, 黄苇, 等. 鸭肉的风味及其形成的研究[J]. *动物营养学报*, 2013, 25(7): 1406-1411. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2013.07.002.
- [27] 张永生, 江方, 靳慧慧, 等. 鸡肉品种和部位对美拉德反应产物呈味的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(10): 297-302. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.10.036.
- [28] AASLYNG M D, MEINERT L. Meat flavour in pork and beef: from animal to meal[J]. *Meat Science*, 2017, 132: 112-117. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.04.012.
- [29] 黄泰来, 金睿, 温建崇, 等. 脂质代谢对鸡肉风味的影响及相关调控因子[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(7): 3676-3685. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2021.07.009.
- [30] 赵晓策. 滩羊肉煮制过程中挥发性风味物质形成及变化研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019: 4-7. DOI:10.27257/d.cnki.gnxhc.2019.000628.
- [31] XIE Qiusheng, XU Baocai, XU Ying, et al. Effects of different thermal treatment temperatures on volatile flavour compounds of water-boiled salted duck after packaging[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112625. DOI:10.1016/J.LWT.2021.112625.
- [32] ZHANG Jianhao, JIN Guofeng, WANG Jiamei, et al. Effect of intensifying high-temperature ripening on lipolysis and lipid oxidation of Jinhua ham[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(2): 473-479. DOI:10.1016/j.lwt.2010.07.007.
- [33] YAO Wensheng, CAI Yingxuan, LIU Dengyong, et al. Analysis of flavor formation during production of Dezhou braised chicken using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS)[J]. *Food Chemistry*, 2022, 370: 130989. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130989.
- [34] LIU Huan, WANG Zhenyu, ZHANG Dequan, 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. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109328.
- [35] ZHAO Bing, ZHOU Huimin, ZHANG Shunliang, et al. Changes of protein oxidation, lipid oxidation and lipolysis in Chinese dry sausage with different sodium chloride curing salt content[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2020, 9: 328-337. DOI:10.1016/j.fshw.2020.04.013.
- [36] 韦友兵, 吴香, 周辉, 等. 萨拉米香肠发酵成熟过程中蛋白质水解及脂质氧化规律[J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 67-73. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181101-008.
- [37] 田星, 张越, 汤兴宇, 等. 基于电子舌和气相色谱-离子迁移谱分析脂肪添加量对中式香肠风味的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(5): 33-40. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200220-039.
- [38] KHAN M I, JO C, TARIQ M R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors: a systematic review[J]. *Meat Science*, 2015, 110: 278-284. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.08.002.
- [39] LEGAKO J F, DINH T T N, MILLER J C, et al. Effects of USDA beef quality grade and cooking on fatty acid composition of neutral and polar lipid fractions[J]. *Meat Science*, 2015, 100: 246-255. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.10.013.



- [40] YU Yuanrui, WANG Guiying, YIN Xiaoyan, 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. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110696.
- [41] WANG Ying, TING Jiangya, XUAN Caojin, et al. Study on lipolysis-oxidation and volatile flavour compounds of dry-cured goose with different curing salt content during production[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 33-40. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.05.048.
- [42] 周慧敏, 张顺亮, 成晓瑜, 等. 食盐用量对风干猪肉挥发性风味物质的影响[J]. 肉类研究, 2017, 31(4): 23-28. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201704005.
- [43] GUO Xin, LU Shiling, WANG Yongqin, et al. Correlations among flavor compounds, lipid oxidation indices, and endogenous enzyme activity during the processing of Xinjiang dry-cured mutton ham[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(11): 1-15. DOI:10.1111/jfpp.14199.
- [44] 田星, 任佳鑫, 穆馨怡, 等. 不同食盐添加量的中式风干香肠挥发性风味成分的鉴定和分析[J]. 肉类工业, 2019(4): 17-21. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2019.04.007.
- [45] 曹锦轩, 吕彤, 王颖, 等. 脂肪相关酶类在干腌肉制品风味形成过程中的作用[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 254-258; 225. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.1.043.
- [46] 封莉, 邓绍林, 黄明, 等. 脂肪酶对中式香肠脂肪降解、氧化和风味的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(1): 51-58. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201501010.
- [47] 郝卓莉, 杨萌, 刘亚敏, 等. 不同酶处理对鳕鱼挥发性风味物质影响的主成分分析[J]. 中国调味品, 2021, 46(8): 57-59. DOI:10.3969/j.issn.100-9973.2021.08.013.
- [48] YANG Yang, ZHANG Xin, WANG Ying, et al. Study on the volatile compounds generated from lipid oxidation of Chinese bacon (unsmoked) during processing: aroma generated from lipid oxidation in bacon (unsmoked)[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(10): 1-10. DOI:10.1002/ejlt.201600512.
- [49] 刁玉段, 张晶晶, 史珊珊, 等. 致死方式对草鱼肉挥发性成分和脂肪氧合酶活性的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 64-70. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201618011.
- [50] ZENG Weicai, WEN Wenting, DENG Yue, et al. Chinese ethnic meat products: continuity and development[J]. Meat Science, 2016, 120: 37-46. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.04.007.
- [51] HUANG Yechuan, GAN Yi, LI Feng, et al. Effects of high pressure in combination with thermal treatment on lipid hydrolysis and oxidation in pork[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 136-143. DOI:10.1016/j.lwt.2015.03.103.
- [52] YANG Yang, SUN Yangying, PAN Daodong, et al. Effects of high pressure treatment on lipolysis-oxidation and volatiles of marinated pork meat in soy sauce[J]. Meat Science, 2018, 145: 186-194. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.06.036.
- [53] MARTÍNEZ-ONANDI N, RIVAS-CAÑEDO A, ÁVILA M, et al. Influence of physicochemical characteristics and high pressure processing on the volatile fraction of Iberian dry-cured ham[J]. Meat Science, 2017, 131: 40-47. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.04.233.
- [54] TEREFE N S, SIKES A L, JULIANO P. Ultrasound for structural modification of food products[M]//KNOERZER K, JULIANO P, SMITHERS G. Innovative food processing technologies. Elsevier, 2016: 209-230. DOI:10.1016/B978-0-08-100294-0.00008-0.
- [55] PEÑA-GONZÁLEZ E M, ALARCÓN-ROJO A D, RENTERÍA A, et al. Quality and sensory profile of ultrasound-treated beef[J]. Italian Journal of Food Science, 2017, 29(3): 463-475.
- [56] ZOU Yunhe, KANG Dacheng, RUI Liu, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 46: 36-45. DOI:10.1016/j.ultsonch.2018.04.005.
- [57] SHI Shuo, KONG Baohua, WANG Yan, et al. Comparison of the quality of beef jerky processed by traditional and modern drying methods from different districts in Inner Mongolia[J]. Meat Science, 2020, 163: 108080. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108080.
- [58] 张佳敏, 王卫, 白婷, 等. 烘烤与风干干燥对四川腊肉脂质氧化影响的比较研究[J]. 食品科技, 2016, 41(5): 115-121. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2016.05.022.
- [59] 赵娟红, 罗章, 马美湖, 等. 冷冻干燥与恒温干燥牦牛肉风味物质对比研究[J]. 肉类研究, 2018, 32(3): 40-45. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201803008.
- [60] 王旭, 张德权, 赵莹鑫, 等. 干法成熟过程羊腿肉持水能力与水分迁移规律[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 179-189. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2021.01.013.
- [61] LEE H J, CHOE J, KIM M, et al. Role of moisture evaporation in the taste attributes of dry- and wet-aged beef determined by chemical and electronic tongue analyses[J]. Meat Science, 2019, 151: 82-88. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.02.001.
- [62] KHAN I, JUNG S, NAM K C, et al. Postmortem aging of beef with a special reference to the dry aging[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2016, 36(2): 159-169. DOI:10.5851/kosfa.2016.36.2.159.
- [63] VOSSEN E, DEWULF L, ROYEN G V, et al. Influence of aging time, temperature and relative humidity on the sensory quality of dry-aged Belgian Blue beef[J]. Meat Science, 2022, 183: 108659. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108659.
- [64] WATANABE A, KAMADA G, IMANARI M, et al. Effect of aging on volatile compounds in cooked beef[J]. Meat Science, 2015, 107: 12-19. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.04.004.
- [65] ZHANG Renyu, YOO M J Y, FAROUK M M. Oxidative stability, proteolysis, and *in vitro* digestibility of fresh and long-term frozen stored in-bag dry-aged lean beef[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128601. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128601.
- [66] LI Binbin, XU Ye, LI Jing, et al. Effect of oxidized lipids stored under different temperatures on muscle protein oxidation in Sichuan-style sausages during ripening[J]. Meat Science, 2019, 147: 144-154. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.09.008.
- [67] ZHANG Jian, KANG Dacheng, ZHANG Wangang, et al. Recent advantage of interactions of protein-flavor in foods: perspective of theoretical models, protein properties and extrinsic factors[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 111: 405-425. DOI:10.1016/j.tifs.2021.02.060.
- [68] 王兆明, 贺雅非, 李洪军. 脂质和蛋白质氧化对肉品品质影响及交互氧化机制研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 295-301. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201811045.
- [69] WANG Wenli, LI Ying, ZHOU Xirui, et al. Changes in the extent and products of *in vitro* protein digestion during the ripening periods of Chinese dry-cured hams[J]. Meat Science, 2021, 171: 108290. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108290.
- [70] 林耀盛, 曲直, 唐道邦, 等. 蔗糖添加量对风干腊肠风味物质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 200-207. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.1.035.
- [71] 周宇. 钾钙复配盐与超声波对低钠盐培根风味的影响研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020: 12-15. DOI:10.27101/d.cnki.gfhgu.2020.000245.
- [72] 仪淑敏, 倪雪, 李强, 等. 洋葱、生姜和大蒜对鲢鱼鱼丸挥发性风味成分的影响[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 193-201. DOI:10.13831/j.cnki.issn.1673-0569.2020.03.001.