

天然抗氧化剂在肉制品加工中的应用研究进展

葛月婷*, 寇博洋, 张春语

(信阳师范大学 大别山实验室/茶学与食品学院/河南省茶树生物学重点实验室/
河南省油茶生物学与高值化利用国际联合实验室, 河南 信阳 464000)

摘要: 肉类是人类食物的重要组成部分,其在加工和贮藏过程中易出现氧化现象,进而导致肉制品货架期缩短、感官品质和营养价值下降,甚至威胁人体健康。添加抗氧化剂是减缓氧化的有效手段,但化学合成的抗氧化剂存在潜在的安全风险。天然抗氧化剂因其安全性高及潜在的健康益处而成为理想选择。综述了肉制品在加工过程中出现的氧化现象、天然抗氧化剂分类与来源及其在肉制品加工中的应用进展,并对其未来研究方向进行了展望,为提升肉制品品质、保障消费者健康和促进肉制品行业可持续发展提供参考。

关键词: 天然抗氧化剂; 肉制品加工; 蛋白质氧化; 脂质氧化; 健康益处

中图分类号: TS202.3; TS251.5

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Advancements in the application of natural antioxidants in meat processing

GE Yueting*, KOU Boyang, ZHANG Chunyu

(Dabie Mountain Laboratory/College of Tea and Food Science/Henan Key Laboratory of Tea Plant Biology/
Henan International Joint Laboratory of Tea-oil Tree Biology and High Value Utilization,
Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Meat is a vital component of the human diet, but it is often subjected to oxidation during processing and storage, leading to a shortened shelf life, degraded sensory quality, reduced nutritional value, and potential health risks for consumers. The addition of antioxidants has been shown to effectively mitigate oxidation; however, chemically synthesized antioxidants are associated with inherent safety risks. Consequently, natural antioxidants have been recognized as ideal alternatives due to their high safety and potential health benefits. The oxidation phenomena in meat products during processing were summarized, along with the classification and sources of natural antioxidants, as well as their application progress in meat processing. Additionally, future research directions were outlined to enhance meat quality, ensure consumer health, and promote the sustainable development of the meat industry.

Key words: natural antioxidants; meat processing; protein oxidation; lipid oxidation; health benefits

0 引言

肉类是人类食物的重要组成部分,因其丰富的蛋白质、脂肪、维生素及矿物质等营养成分,在维持人体健康与营养平衡中扮演着不可或缺的角色。

然而,在加工、贮藏及流通环节,受各种物理和化学因素的影响,肉类制品的氧化现象普遍存在,成为影响产品品质、营养价值乃至机体健康的重要因素。氧化过程涉及多种类型,其中脂质氧化会导致肉制品脂肪酸败、风味恶化及潜在有害

收稿日期:2024-12-22;修回日期:2025-03-19;*. 通信联系人, E-mail: ytge@xynu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(32302077);信阳师范大学“南湖学者奖励计划”青年项目

作者简介:葛月婷(1991—),女,山东菏泽人,讲师,博士,主要从事食品营养与健康研究。

引用格式:葛月婷,寇博洋,张春语.天然抗氧化剂在肉制品加工中的应用研究进展[J].信阳师范大学学报(自然科学版),2025,38(4):497-505.

GE Yueting, KOU Boyang, ZHANG Chunyu. Advancements in the application of natural antioxidants in meat processing[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2025, 38(4):497-505.

物质生成^[1];蛋白质氧化则会引起肌肉蛋白结构变化和功​​能损失,从而​​影响肉制品的质地与加工特性,并对机体健康产生不利影响^[2];色素氧化会使肉制品色泽褪去,降低视觉吸引力;维生素氧化则导致营养素的损失。这些氧化反应不仅缩短了肉制品的货架期,更可能通过不良风味和降低的营养价值,影响消费者的接受度,甚至危害人体健康。

添加抗氧化剂是贮存食品、降低膳食氧化的有效手段。它们能够有效减缓或阻止氧化过程,从而保护肉制品的品质,延长货架期。然而,化学合成的抗氧化剂虽然效果显著,但长期摄入可能对人体健康构成潜在风险^[3]。相比之下,天然抗氧化剂,如植物提取物、维生素和矿物质等,以其天然来源、安全性高以及潜在的健康益处,成为替代化学合成抗氧化剂的理想选择。它们通过清除自由基、抑制氧化酶活性及螯合金属离子等机制,在肉制品加工中展现出抑制多种类型的氧化反应潜力。

1 肉类制品加工中的氧化反应

在加工、贮藏及流通过程中,氧化反应是导致肉类制品品质下降、营养价值损失及潜在健康风险的主要原因之一。探讨脂质氧化、蛋白质氧化及其他氧化现象在肉制品中的发生机制,可以有效地了解肉制品对机体健康的影响。

1.1 脂质氧化

脂质氧化主要指脂质分子在氧气、光照、温度或金属离子等因素的作用下,发生自由基介导的链式反应,导致脂肪酸的不饱和键断裂,形成一系列氧化产物的过程^[1]。这一过程中,自由基的产生是关键步骤,它们能够攻击脂质分子中的双键,引发链式反应,生成醛类、酮类、醇类、烃类及过氧化物等氧化产物。自由基的产生源于多种因素,包括氧气、光照、温度、压力或金属离子等。在食品和生物体体系中,脂质氧化和蛋白质氧化通常是相伴发生的^[4],它们均遵循自由基链反应机制,包括自由基的引发、传递及终止等三个关键步骤^[5]。研究显示,烹饪过程会加剧肉制品中的脂质氧化,促使烷基、烷氧基及氢过氧自由基等的生成,并间接地加速蛋白质的氧化进程^[6]。此外,高压处理技术同样能诱导肉类系统中的脂质发生氧化^[7]。

脂质氧化会显著影响肉制品的品质。首先,

它会导致肉制品风味变化,产生不良气味和味道,如金属味、油漆味或哈喇味,严重影响肉制品的感官品质。这主要是由脂质氧化过程中产生的醛类和酮类等化合物造成的^[8]。脂质氧化引起的颜色变化(如黄变)也降低了肉制品的视觉吸引力。其次,脂质氧化会降低肉制品的营养价值。氧化过程中,不饱和脂肪酸会被转化为饱和脂肪酸或其他低营养价值的化合物,必需脂肪酸和脂溶性维生素也会遭到破坏。此外,脂质氧化还会加速肉制品的腐败进程,导致其货架期缩短。脂质氧化产物如氢过氧化物等,不仅本身具有不稳定性,还可能与其他食品成分反应,进一步加速肉制品的变质。

脂质氧化产物对机体健康的影响同样不容忽视。脂质氧化的许多初级和次级副产物被认为是潜在的致癌物,如4-羟基壬烯醛和丙二醛^[8]。氢过氧化物等脂质氧化产物几乎可以与人体内所有分子或细胞发生反应,破坏DNA和细胞结构,导致遗传突变和细胞死亡。这些变化不仅可能引发癌症等严重疾病,还可能加速机体的衰老过程。多项研究表明,含有脂质氧化产物的膳食会诱导实验动物结肠癌的发生^[9]。脂质氧化产物的致病分子机制通常涉及丙二醛、过氧化物和烷基自由基等初级和次级脂质氧化产物与具有生物学意义的蛋白质分子的相互作用。这些相互作用包括介导蛋白质的氧化修饰,以及改变酶蛋白的化学结构和功能等。酶是机体内催化化学反应的重要物质,其生物活性的丧失将直接影响机体的正常生理功能。此外,脂质氧化产物的积累还可能通过影响机体的代谢过程,增加慢性炎症、过敏反应及动脉粥样硬化等与年龄相关疾病的发生率。

1.2 蛋白质氧化

蛋白质氧化主要是指在氧化应激条件下,蛋白质分子中的氨基酸侧链基团(如巯基、氨基、羧基等)发生化学修饰,进而导致蛋白质结构变化、功能损失及交联反应^[10]。这些变化包括二硫键的形成、蛋白质聚集、交联及水解等,最终导致蛋白质构象的改变。蛋白质氧化过程可以由活性成分(含自由基及非自由基)直接触发,或者经由与氧化应激产生的次生代谢物(例如糖类和脂质等次级氧化产物)相互作用而间接引发。在肉类体系中,这些活性成分通常作用于蛋白质的多肽链结构或改变氨基酸侧链,进而造成氨基酸侧链的氧

化修饰、肽链断裂以及蛋白质的聚集和交联等。这些变化会损坏蛋白质的结构和功能特性,进而降低肉类食品的感官品质和营养价值,并可能对人体健康构成潜在风险。

蛋白质氧化对肉类制品品质的影响主要体现在质地变化、营养价值降低和加工性能下降等方面。氧化会导致蛋白质交联和聚集,从而使产品质地变硬、韧性增加、口感变差。在相关的化学修饰中,蛋白羰基化与蛋白质交联的形成对肌肉蛋白功能丧失及肉类或加工肉制品的质地、色泽与风味变化具有显著影响^[7]。同时,蛋白质氧化还会导致肌肉蛋白的营养价值下降,包括必需氨基酸的流失和蛋白质消化率的降低等^[11]。在加工性能方面,蛋白质氧化引起的结构变化会改变肌肉蛋白的功能属性,比如凝胶形成、乳化能力、嫩度及保水性等^[12],进而影响产品的最终品质。

除对肉制品品质的影响外,摄入氧化的蛋白质还可能对人体健康产生潜在威胁。膳食中的氧化蛋白在摄入后首先会暴露在胃肠道环境,并在其内部逐渐积累。饮食对调节机体的氧化还原平衡起着关键作用,“膳食引发的氧化应激”能直接触发机体的氧化应激反应^[13]。摄入氧化蛋白会导致肠道组织出现氧化应激,扰乱肠道菌群平衡,并促使肠道局部出现病理变化。这些氧化蛋白及其分解产物(如氨基酸、小肽)在肠道内能通过肠上皮细胞被吸收,并在体内累积,进而可能对内脏器官产生影响,包括可能引发氧化应激等效应^[14-15]。蛋白质在机体内扮演着调节和执行多种生物功能的核心角色。GURER-ORHAN等^[16]研究指出,氧化的氨基酸有可能被错误地整合进蛋白质结构中,从而潜在地促进其功能障碍,甚至触发细胞凋亡或疾病。尽管蛋白质的翻译后氧化修饰是体内蛋白质氧化的一个重要途径,但来自外部饮食的氧化氨基酸也可能通过蛋白质的从头合成过程直接产生有害效应。

1.3 其他氧化反应

1.3.1 色素氧化

色素氧化是指色素分子在加工、贮藏及光照等条件下发生氧化降解,导致肉制品颜色变化的过程。肌红蛋白与血红蛋白(两者均富含铁元素)在肌肉食品中主要作为色素存在,使肉品呈现鲜明的红色。然而,它们的氧化过程会导致肉品红色褪去。此外,氧化后的肌红蛋白与血红蛋白还

被证明其能够参与或促进蛋白质氧化过程^[17]。研究表明,温度超过60℃的热处理会促使血红素卟啉环发生氧化分解,释放出血红素铁,随后其可能通过芬顿或类芬顿反应、金属催化氧化等机制引发肉类蛋白质氧化^[18]。此外,高压处理同样能促进肉类中铁的释放^[7]。色素的氧化不仅损害了产品的外观吸引力,还可能降低其营养价值,并对人体健康构成潜在危险。有研究表明,高血红素铁饮食会增加实验大鼠患结肠癌的风险^[9]。某些临床证据表明,血浆蛋白羰基化水平是评估结直肠癌风险的一个重要指标^[19],其中,血红素铁可能参与了红肉消费与结直肠癌之间的流行病学关联^[20]。动物实验研究还发现红肉和膳食中的血红蛋白可能具有致癌效应^[21]。

1.3.2 维生素氧化

维生素是肉类中的重要营养成分,但其在加工与贮藏过程中容易发生氧化而损失。机体的抗氧化防御系统可分为酶类和非酶类等两大类。其中,非酶类抗氧化防御系统主要包括维生素E、维生素C等脂溶和水溶性小分子抗氧化物质和蛋白质类抗氧化剂。维生素E与维生素C等抗氧化物质在保护肉类中的其他成分免受氧化损伤的同时,自身也容易遭受氧化分解。维生素的氧化不仅降低了肉制品的营养价值,还可能引发不良风味和颜色变化。

在肉类制品加工过程中,氧化反应对产品的品质、营养价值及消费者身体健康具有重要影响。因此,探寻有效的抗氧化策略,特别是应用天然抗氧化剂来控制这些氧化反应,对于提高肉制品的品质和安全具有重要意义。

2 天然抗氧化剂概述

2.1 定义和分类

天然抗氧化剂是指从天然来源的材料中(如植物、动物或微生物)提取的具有抗氧化能力的物质,它们能有效清除或平衡自由基,从而抑制或减缓氧化过程的发展^[22]。如香辛料中的酚类及其衍生物,甘草、丹参等中草药提取物,茶叶中的茶多酚,植物油中的生育酚等。相较于人工合成的抗氧化剂,天然抗氧化剂在防止食物氧化方面更具有安全性和可实施性。

根据结构特征,天然抗氧化剂可被划分为几个主要类别。第一类是酚类化合物,其涵盖了黄

酮类、酚酸、二苯乙烯等,它们在植物界中广泛存在且抗氧化作用显著,主要通过清除自由基和螯合金属离子来减缓氧化过程。第二类是维生素类抗氧化剂,如维生素E、维生素A、维生素C等,通过捐赠或接受电子、稳定自由基及保护细胞膜脂质层来发挥作用。第三类是含氮化合物,包括多肽、生物碱、有机胺类、美拉德反应产物等,凭借杂环结构中的裸露氮原子与活性氧发生反应。第四类囊括了其他一些同样具有抗氧化能力的物质,如类胡萝卜素、植酸和叶绿素等,它们通过淬灭单线态氧、提供氢原子或螯合金属离子等方式展现抗氧化效果。根据《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》(GB 2760—2024),植酸和生育酚(维生素E)作为天然抗氧化剂已被明确允许应用于肉制品加工过程。

2.2 天然抗氧化剂的来源

天然抗氧化剂广泛存在于自然界中,依据来源可将其划分为植物源、动物源和微生物源等3大类。

2.2.1 植物源抗氧化剂

植物是天然抗氧化剂的一大重要来源,如香辛料、中草药、茶叶、水果等,都是天然抗氧化剂的开发资源。植物源抗氧化剂主要包括黄酮类(如大豆异黄酮、茶多酚)、酚酸类(如咖啡酸、阿魏酸)和维生素类(如维生素C、维生素E)等化合物,其提取方法主要采用超临界流体萃取技术、有机溶剂提取法、微波辅助提取法以及水蒸气蒸馏等现代分离技术。

香辛料是肉类食品加工过程中常用的一种辅料,其在提升食品风味、抑菌防腐以及延长货架期等方面得到了广泛的认可。香辛料中含丰富的植物化学物质,在食品加工和贮藏过程中,这些物质与肉制品中的营养成分及风味成分相互作用,从而改善食品的营养品质和风味特性。同时,香辛料中还含有多种抗氧化和抗炎的植物成分,例如多酚和某些生物碱^[23],这些成分对降低加工过程中肉制品的氧化反应具有积极作用,并可能对健康产生有益影响。丁香酚作为丁香油的主要活性成分,可通过超临界流体萃取技术从丁香的花蕾中提取而出。其具有较强的抗氧化能力,可清除自由基,抑制食品中微生物的生长,从而延长食品的保质期^[24]。迷迭香提取物中主要包括鼠尾草酚、鼠尾草酸和迷迭香酚等酚类二萜成分,其可通

过有机溶剂提取法从迷迭香的花和叶中获得。这些成分凭借自由基清除能力和单线态氧淬灭效应,可降低肉制品的氧化速率,保持食品色泽和风味^[25]。国标中允许迷迭香提取物用于多种肉制品加工过程,如西式火腿、肉灌肠类。此外,研究表明,包括丁香和迷迭香在内的多种香辛料,还能有效抑制贮藏期间肉制品中蛋白质的氧化过程^[26]。

从竹叶中提取的关键活性物质包括竹叶黄酮、竹叶多酚和竹叶挥发油等,其可通过清除自由基来减缓脂质氧化的速度^[27]。根据我国国家标准,竹叶抗氧化物已被批准作为天然抗氧化剂应用于腌腊肉制品、酱卤肉制品等类别。犬蔷薇提取物是从犬蔷薇的果实中提取出的,主要包括犬蔷薇果多糖、犬蔷薇果多酚和犬蔷薇果维生素C等活性成分。除了具有较强的抗氧化活性外,犬蔷薇提取物还可以增强机体的免疫力、抵抗外界的感染和刺激、促进伤口愈合、预防坏血病等功效^[28]。从苹果的果皮和果肉中提取出来的多酚主要包括原花青素、绿原酸和儿茶素等活性成分,其同样具有较强的抗氧化能力,能够有效清除自由基,抑制低密度脂蛋白的氧化过程^[29]。

2.2.2 动物源抗氧化剂

动物来源的天然抗氧化剂种类也众多,其中包括虾青素、辅酶Q10、肌肽及褪黑素等。虾青素作为一种高效的天然抗氧化物质,其主要源自甲壳类(如虾、蟹)及某些鱼类,可有效清除自由基,保护细胞免受氧化损伤^[30],并以其独特的颜色效应改善肉制品的色泽。辅酶Q10则广泛分布于动物体内,特别是心脏、肝脏与肾脏中,其作为脂溶性抗氧化剂参与细胞能量代谢,同时能够抵御自由基侵害,维护细胞膜完整性^[31]。在肉制品加工中,辅酶Q10的添加能够增强产品的稳定性,并延长其货架期。肌肽是一种天然二肽,主要分布于动物肌肉和脑组织中,具有显著的抗氧化活性。在肉制品加工体系中,肌肽可通过清除自由基和螯合金属离子来减缓肉类制品的脂肪氧化,保护肉色^[32],目前该物质已被欧盟及美国FDA批准作为食品添加剂,广泛应用于肉制品、乳制品等食品体系的抗氧化保护。褪黑素是一种由哺乳动物的松果体分泌的胺类激素,具有抗氧化、抗炎及免疫调节等生物活性。褪黑素可作为一种天然的抗氧化剂或防腐剂添加到肉制品中,具有延长保质期

并改善肉制品品质的作用^[33]。

2.2.3 微生物源抗氧化剂

微生物源抗氧化剂是指在微生物(如细菌、真菌、酵母)发酵或转化过程中产生的具有抗氧化能力的物质,涵盖多糖、多肽、类胡萝卜素及维生素等代谢产物。这类抗氧化剂的优势在于来源广泛、成本低、品质可控且易于提取分离等^[34]。微生物源多肽是微生物发酵过程中产生的具有抗氧化活性的低分子蛋白质,如谷胱甘肽、乳清肽、酵母肽等。其可通过清除自由基、抑制脂质过氧化及提高谷胱甘肽水平等机制,保护细胞和DNA免受氧化损伤^[35]。微生物合成的类胡萝卜素,如番茄红素、虾青素、 β -胡萝卜素等,属于天然色素,能够清除自由基并减缓脂质氧化^[36]。此外,微生物还能够生产水溶性及脂溶性维生素,如维生素E、维生素C和维生素B₁₂^[37],其具有参与体内代谢、调节神经系统、增强免疫力等作用,并能通过提供氢原子或电子、螯合金属离子、清除自由基等机制降低食品的氧化速率。

乳酸菌发酵时产生的代谢产物,如乳酸、乙酸、细菌素和某些肽类等,具有显著的抗氧化功效。其能够有效抑制脂质过氧化,减少氧化产物的形成,进而延长肉制品的保存期限^[38]。此外,这些发酵产物还能提高肉制品的口感与风味,增强其营养价值。纳豆激酶是纳豆发酵过程中由纳豆枯草杆菌产生的丝氨酸蛋白酶,具有溶栓及抗氧化等多种生物活性^[39]。在加工过程中,纳豆激酶的添加有望降低肉制品的氧化程度,同时其还具有调节血压、降低胆固醇等作用。

3 天然抗氧化剂在肉类加工制品中的添加策略及具体应用

3.1 天然抗氧化剂的添加方式及目的

在肉制品加工中,添加天然抗氧化剂的主要目的是缓解因各类氧化引起的品质下降、色泽劣变和营养损失等,同时减少化学合成抗氧化剂的使用,以满足消费者对健康食品的需求。这些抗氧化剂的添加方式灵活多样,主要包括以下三类:第一类是在动物饲养阶段将天然抗氧化剂添加到饲料中,以提升宰后肉品的抗氧化性能、抗菌力以及整体的感官品质;第二类是在原料肉阶段直接添加天然抗氧化剂,通过浸泡、喷雾、注射或涂抹等手段,有效降低肉制品氧化速率,延长货架期;第三类是在肉制品加工成型阶段添加天然抗氧化

剂,不仅可以增强产品的风味特性、改善色泽及提升营养价值,还能有效延缓脂质和蛋白质氧化过程,此阶段的添加方法包括混合、灌装及包裹等。

在肉类加工过程中,添加天然抗氧化剂可有效抑制包括脂质和蛋白质在内的多种氧化过程。脂质氧化是一种自由基介导的链式反应,会造成肉制品产生异味、营养损失等一系列变质现象,进而导致产品货架期缩短。天然抗氧化剂可通过清除自由基、螯合金属离子以及分解过氧化物等机制来阻断或延缓脂质氧化的进程。同样,蛋白质氧化也会降低肉制品的营养品质,包括降低蛋白质消化率和生物利用率等,天然抗氧化剂则可通过与活性氧或其他氧化产物反应来减弱或消除蛋白质氧化。此外,肌红蛋白的含量及其氧化还原状态影响消费者对肉类新鲜度的判断,但在高氧环境下,其易被氧化为褐变色素,导致肉类颜色变暗、失去光泽。天然抗氧化剂可通过淬灭单线态氧或清除自由基来保持或稳定肌红蛋白的还原状态,进而保持肉类良好的颜色。

3.2 天然抗氧化剂在典型肉类加工制品中的应用

常见的加工肉制品涵盖了丰富多样的类型,如香肠系列、火腿类、培根类、酱卤肉类、烧烤风味肉品以及便捷的即食肉类产品。香肠是由畜禽肉精制加工成的圆筒形肉制品,其风味多样,包括熏肉、鲜肉等不同类型。火腿是中国传统特色肉制品,主要以猪后腿为原料,经过多道制作工艺,营养美味。培根源自猪五花肉,经过特定的加工处理,无论是熏制还是水煮,都能带来独特的风味享受。酱卤肉类是以畜禽肉为基础,通过酱制或卤制的方式,让肉质更加入味,如酱牛肉、猪头肉等是这一品类的代表。烧烤类肉制品是畜禽肉利用火烤的方式熟制,如烤羊腿、油爆鸡等。即食肉类产品则是现代快节奏生活的产物,其主要以畜禽肉为原料,经过特定加工处理,便于直接食用,如猪肉干、猪肉脯、火腿肠等,深受消费者的喜爱。然而,在加工与贮藏的各个环节中,上述肉制品极易受到氧化作用的侵袭,从而引发脂肪和蛋白质等氧化降解、色泽暗淡、风味劣化以及货架期显著缩短等问题,严重影响了产品的品质与安全性。因此,开发并应用天然抗氧化剂以有效抵御氧化过程,是提升肉制品品质、确保食品安全的重要策略。

研究人员深入探究了多种天然抗氧化剂在肉类加工中的潜在应用价值。香辛料内含多种抗氧化及抗炎成分,如丁香酚和迷迭香提取物,对降低加工过程中肉制品氧化、改善机体健康具有积极作用。ZHANG等^[40]研究发现,丁香酚可有效抑制广式香肠中的脂质过氧化并清除自由基,进而减少脂质氧化产物及蛋白质羰基的生成。ESTÉVEZ等^[41]指出,添加150 mg/kg的迷迭香精油于香肠加工中,能有效阻止蛋白质的氧化。此外,含有400 mg/kg或500 mg/kg总酚的迷迭香提取物,不仅抑制了博洛尼亚型香肠中的脂质氧化产物形成,还减少了蛋白质羰基的生成。贾娜等^[42]发现,迷迭香、肉桂和丁香提取物作为护色剂应用于酱牛肉加工时,均可减缓酱牛肉表面的红曲红色素发生氧化褪色,3种香辛料提取物复配后护色效果更佳。ARMENTEROS等^[43]的研究则表明,在冷藏期间,大蒜、肉桂、丁香及迷迭香提取物均能抑制熟火腿的蛋白质羰基化过程。

茶多酚、原花青素和芦丁作为多酚类化合物,在抗氧化方面也展现出显著效果。茶多酚是茶叶中酚类物质的总称,能有效清除自由基和活性氧,并螯合金属离子。根据国家标准,茶多酚作为天然抗氧化剂已获准应用于腌腊肉制品(如中式火腿、广式腊肠)、酱卤肉制品(如酱牛肉)、熏烧烤肉制品(如烤鸭)等传统肉制品加工。廖婵等^[44]采用茶多酚、迷迭香、维生素E及其复合剂作为抗氧化剂,应用于干腌火腿表面,发现这些抗氧化剂单独或复合使用均能减缓火腿的脂质氧化,且复合使用的效果更佳,同时茶多酚与迷迭香还有助于保持火腿色泽。原花青素广泛分布于植物中,同样具备强大的抗氧化能力。LORENZO等^[45]研究发现,花生红衣中的原花青素可有效延缓肉制品中色素、脂质和蛋白质的氧化过程。此外,芦丁作为一种天然黄酮苷,主要存在于芦笋和柑橘类水果中,具有抗炎、抗氧化等功效。贾娜等^[46]研究了不同浓度芦丁对冷藏猪肉糜的抗氧化效应及品质特性的影响,发现适宜浓度的芦丁可有效抑制冷藏猪肉糜的脂肪和蛋白质氧化,同时可提升其品质特性,如改善色泽,减少蒸煮损失并增强熟肉糜的硬度和弹性。

除传统香辛料及多酚类抗氧化剂外,植物提取物的靶向应用进一步拓展了天然抗氧化剂在肉制品氧化控制中的技术路径。梁仁龙等^[47]研究表

明,添加竹叶抗氧化物可显著抑制酱鸭贮藏期间的脂质过氧化进程(过氧化值和酸价显著降低),其酱汁中的添加浓度在0.2%为最佳。NUÑEZ DE GONZALEZ等^[48]研究发现,李子浓缩汁可显著抑制预制烤牛肉的脂质过氧化(TBARS降幅>58%)及蛋白质氧化损伤(羰基含量减少>40%),其效果呈剂量依赖性,且复配使用可协同提升产品色泽稳定性与质构特性。CHENG等^[49]评估了罗汉果提取物对真空包装的猪肉干在室温下储存期间脂质和蛋白质氧化损伤的保护作用,发现罗汉果提取物可通过甜苷-多酚协同作用,显著减少己醛、羰基化合物的生成,有效延缓脂质和蛋白质的氧化,同时改善了色泽稳定性。

4 结论与展望

天然抗氧化剂可有效抑制肉制品加工过程中的脂质、蛋白质等氧化反应,显著提升产品的色泽稳定性、风味保持能力和货架寿命。其广泛分布于植物、动物和微生物资源中,且具有多酚、维生素、酶类等多种生物活性成分,这些成分通过不同的作用机制有效抑制了肉制品在加工和贮藏过程中的氧化变质。此外,天然抗氧化剂丰富了肉制品的营养价值,增强了其健康属性,满足了消费者对高品质、安全健康食品的需求。同时,天然抗氧化剂的可再生性和环境友好性,促进了肉制品加工行业的可持续发展。

目前,天然抗氧化剂在肉类加工中的应用虽然取得了一定的进展,但仍存在一些问题和挑战。部分天然抗氧化剂的热稳定性较差,易在加工过程中失活;天然抗氧化剂在水溶性、油溶性等方面的性质差异也限制了其在不同类型肉制品中的应用;天然抗氧化剂的成本较高,且提取和纯化工艺相对复杂,这也限制了其在肉制品加工中的大规模应用。为了应对这些难题,未来研究需集中关注以下几个方面:(1)从自然界中寻找新的资源,如海洋生物、微生物、昆虫等,开发新型天然抗氧化剂;(2)开发新型、高效的天然抗氧化剂提取和纯化技术,提高抗氧化剂的纯度和稳定性;(3)探索天然抗氧化剂与其他食品添加剂的协同作用,以优化其在肉制品中的应用效果;(4)研究天然抗氧化剂在肉制品加工过程中的作用机制,明确其抗氧化、抗菌等生物活性的具体途径。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] LUND M N, HEINONEN M, BARON C P, et al. Protein oxidation in muscle foods: A review [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2011, 55(1): 83-95.
- [3] ARUOMA O I. Assessment of potential prooxidant and antioxidant actions[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1996, 73(12): 1617-1625.
- [4] SRINIVASAN S, XIONG Y L, DECKER E A. Inhibition of protein and lipid oxidation in beef heart surimi-like material by antioxidants and combinations of pH, NaCl, and buffer type in the washing media [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(1): 119-125.
- [5] SCHAICH K M. Free radical initiation in proteins and amino acids by ionizing and ultraviolet radiations and lipid oxidation-part III: Free radical transfer from oxidizing lipids[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1980, 13(3): 189-244.
- [6] XIONG Youling, DECKER E A, FAUSTMAN C, et al. Protein oxidation and implications for muscle food quality [J]. *Antioxidants in Muscle Foods Nutritional Strategies to Improve Quality*, 2000: 85-111.
- [7] SOLADOYE O P, JUÁREZ M L, AALHUS J L, et al. Protein oxidation in processed meat: Mechanisms and potential implications on human health[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(2): 106-122.
- [8] HUANG Xi, AHN D U. Lipid oxidation and its implications to meat quality and human health[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28(5): 1275-1285.
- [9] GUÉRAUD F, TACHÉ S, STEGHENS J P, et al. Dietary polyunsaturated fatty acids and heme Iron induce oxidative stress biomarkers and a cancer promoting environment in the colon of rats [J]. *Free Radical Biology & Medicine*, 2015, 83: 192-200.
- [10] ESTÉVEZ M, LUNA C. Dietary protein oxidation: A silent threat to human health?[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(17): 3781-3793.
- [11] GE Yueting, LIN Shiman, LI Bowen, et al. Oxidized pork induces oxidative stress and inflammation by altering gut microbiota in mice[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2020, 64(2): e1901012.
- [12] LUND M N, LAMETSCH R, HVIID M S, et al. High-oxygen packaging atmosphere influences protein oxidation and tenderness of porcine *longissimus dorsi* during chill storage[J]. *Meat Science*, 2007, 77(3): 295-303.
- [13] ESTÉVEZ M, XIONG Youling. Intake of oxidized proteins and amino acids and causative oxidative stress and disease: Recent scientific evidences and hypotheses[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(3): 387-396.
- [14] GE Yueting, YANG Yuhui, JIANG Yuge, et al. Oxidized pork induces hepatic steatosis by impairing thyroid hormone function in mice[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2022, 66(1): e2100602.
- [15] GE Yueting, LI Bowen, YANG Yuhui, et al. Oxidized pork induces disorders of glucose metabolism in mice [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2021, 65(6): e2000859.
- [16] GURER-ORHAN H, ERCAL N, MARE S, et al. Misincorporation of free m-tyrosine into cellular proteins: A potential cytotoxic mechanism for oxidized amino acids[J]. *Biochemical Journal*, 2006, 395(2): 277-284.
- [17] 葛月婷. 猪肉蛋白氧化产物双酪氨酸损害甲状腺激素功能影响机体代谢的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
GE Yueting. Oxidized pork protein product dityrosine affects body metabolism by impairing thyroid hormone function [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [18] MILLER D K, GOMEZ-BASAURI J V, SMITH V L, et al. Dietary iron in swine rations affects nonheme iron and TBARS in pork skeletal muscles[J]. *Journal of Food Science*, 1994, 59(4): 747-750.
- [19] YE H C C, LAI C Y, HSIEH L L, et al. Protein carbonyl levels, glutathione S-transferase polymorphisms and risk of colorectal cancer[J]. *Carcinogenesis*, 2010, 31(2): 228-233.
- [20] PIERRE F, PEIRO G, TACHÉ S, et al. New marker of colon cancer risk associated with heme intake: 1, 4-dihydroxynonane mercapturic acid[J]. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 2006, 15(11): 2274-2279.
- [21] PIERRE F, FREEMAN A, TACHÉ S, et al. Beef meat and blood sausage promote the formation of azoxymethane-induced mucin-depleted foci and aberrant crypt foci in rat colons[J]. *The Journal of Nutrition*, 2004, 134(10): 2711-2716.
- [22] 卢莉璟. HDPE/LDPE基抗氧化复合膜的制备与性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.

- LU Lijing. Preparation and properties research of HDPE/LDPE based antioxidant composite film[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [23] 李云龙, 赵月亮, 范大明, 等. 香辛料中植物化学物对肉制品品质及健康功效影响研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 262-270.
- LI Yunlong, ZHAO Yueliang, FAN Daming, et al. Effects of phytochemicals from spices on quality attributes and health benefits of meat products: A review[J]. Food Science, 2021, 42(5): 262-270.
- [24] 李述日, 吴克刚, 柴向华, 等. 食用香料对油脂抗氧化作用的研究[C]//“科技创新与食品产业可持续发展”学术研讨会暨 2008 年广东省食品学会年会论文集, 广州, 2008: 75-79.
- LI Shuri, WU Kegang, CHAI Xianghua, et al. Studies on antioxidant effect of edible spices on oils[C]//Academic Seminar on “Technological Innovation and Sustainable Development of Food Industry” and Proceedings of the 2008 Guangdong Food Society Annual Meeting, Guangzhou, 2008: 75-79.
- [25] 朱建宇, 赵城彬, 江连洲, 等. 迷迭香提取物对大豆油抗氧化性的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(11): 208-214.
- ZHU Jianyu, ZHAO Chengbin, JIANG Lianzhou, et al. Effect of rosemary extracts on antioxidant capability of soybean oil[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(11): 208-214.
- [26] ARMENTEROS M, MORCUENDE D, VENTANAS J, et al. The application of natural antioxidants via brine injection protects Iberian cooked hams against lipid and protein oxidation[J]. Meat Science, 2016, 116: 253-259.
- [27] 王慧, 岳永德, 郭雪峰, 等. 不同竹种竹叶提取物制备及其抗氧化活性比较研究[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(4): 540-544.
- WANG Hui, YUE Yongde, GUO Xuefeng, et al. Preparation and comparative analysis of antioxidant activity of bamboo leaf extracts from different varieties[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2012, 39(4): 540-544.
- [28] 王莹, 邓慧, 曾祥辉, 等. 天然抗氧化剂抑制肉制品氧化研究进展[J]. 中国调味品, 2022, 47(2): 216-220.
- WANG Ying, DENG Hui, ZENG Xianghui, et al. Research progress on inhibiting oxidation of meat products by natural anti oxidants[J]. China Condiment, 2022, 47(2): 216-220.
- [29] 张泽生, 史坤, 张颖, 等. 苹果多酚的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(5): 174-178.
- ZHANG Zesheng, SHI Kun, ZHANG Ying, et al. Advances on the research of the apple polyphenols[J]. Food Research and Development, 2011, 32(5): 174-178.
- [30] MEDORO A, DAVINELLI S, MILELLA L, et al. Dietary astaxanthin: A promising antioxidant and anti-inflammatory agent for brain aging and adult neurogenesis[J]. Marine Drugs, 2023, 21(12): 643.
- [31] PRAVST I, ZMITEK K, ZMITEK J. Coenzyme Q10 contents in foods and fortification strategies [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2010, 50(4): 269-280.
- [32] 胡新旭, 赵丽红, 张勇, 等. 肌肽的研究进展[J]. 饲料工业, 2013, 34(7): 59-62.
- HU Xinxu, ZHAO Lihong, ZHANG Yong, et al. Research progress on apple polyphenols[J]. Feed Industry, 2013, 34(7): 59-62.
- [33] TAN Dunxian, ZANGHI B M, MANCHESTER L C, et al. Melatonin identified in meats and other food stuffs: Potentially nutritional impact[J]. Journal of Pineal Research, 2014, 57(2): 213-218.
- [34] 蔡旋, 陈小连, 杨帆, 等. 微生物源性抗氧化剂体外抗氧化能力的初步研究[J]. 生物技术, 2011, 21(6): 84-87.
- CAI Xuan, CHEN Xiaolian, YANG Fan, et al. A preliminary research of antioxidant capacity by micro-derived antioxidants *in vitro*[J]. Biotechnology, 2011, 21(6): 84-87.
- [35] 马艳芳. 螺旋藻肽的制备及其抗氧化性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- MA Yanfang. Preparation and functional properties of *Spirulina* antioxidative peptides [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016.
- [36] 邓永平, 段睿, 王晓杰, 等. 微生物源类胡萝卜素的研究进展[J]. 饲料工业, 2020, 41(1): 12-17.
- DENG Yongping, DUAN Rui, WANG Xiaojie, et al. Research developments of carotenoids from microorganism[J]. Feed Industry, 2020, 41(1): 12-17.
- [37] 刘锋. 微生物发酵工程对食品营养及保健功能的影响[J]. 食品安全导刊, 2024(14): 179-182.
- LIU Feng. Effects of microbial fermentation engineering on nutrition and health function of food[J]. China Food Safety Magazine, 2024(14): 179-182.
- [38] 李默, 朱畅, 赵冬兵, 等. 发酵肉制品中高抗氧化肉品发酵剂的筛选鉴定[J]. 食品科学, 2017, 38(12): 83-88.
- LI Mo, ZHU Chang, ZHAO Dongbing, et al. Screening and identification of meat starters with high antioxidant activity from fermented meat products[J]. Food Science, 2017, 38(12): 83-88.
- [39] 邹颖. 纳豆菌液态发酵荞麦产纳豆激酶及其发酵产物中抗氧化活性物质的鉴定[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

- ZOU Ying. *Bacillus natto* liquid fermentation with buckwheat to produce nattokinase and identification of antioxidants in fermentation products[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [40] ZHANG Huiyun, PENG Xinyan, LI Xinling, et al. The application of clove extract protects chinese-style sausages against oxidation and quality deterioration[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2017, 37(1): 114-122.
- [41] ESTÉVEZ M, CAVA R. Effectiveness of rosemary essential oil as an inhibitor of lipid and protein oxidation: Contradictory effects in different types of frankfurters[J]. Meat Science, 2006, 72(2): 348-355.
- [42] 贾娜, 孙钦秀, 李博文, 等. 香辛料提取物对酱牛肉的护色效果[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(6): 193-198.
JIA Na, SUN Qinxiu, LI Bowen, et al. Color protection effect of spices extracts on marinated beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(6): 193-198.
- [43] ARMENTEROS M, MORCUENDE D, VENTANAS J, et al. The application of natural antioxidants via brine injection protects Iberian cooked hams against lipid and protein oxidation[J]. Meat Science, 2016, 116: 253-259.
- [44] 廖婵, 靳国锋, 章建浩, 等. 迷迭香、茶多酚、VE对干腌火腿贮藏过程中抗脂质氧化及护色效果的研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(8): 82-86.
LIAO Chan, JIN Guofeng, ZHANG Jianhao, et al. Effect of rosemary extract, tea polyphenols, vitamin E on lipid oxidation and color stability during storage of dry-cured hams[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(8): 82-86.
- [45] LORENZO J M, MUNEKATA P E S, SANT'ANA A S, et al. Main characteristics of peanut skin and its role for the preservation of meat products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 77: 1-10.
- [46] 贾娜, 王乐田, 邵俊花, 等. 芦丁对冷藏猪肉糜脂肪和蛋白氧化及品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(10): 105-111.
JIA Na, WANG Letian, SHAO Junhua, et al. Effect of rutin on lipid/protein oxidation and quality of minced pork during chilled storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(10): 105-111.
- [47] 梁仁龙, 章敏. 竹叶抗氧化物对酱鸭保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 231-234, 252.
LIANG Renlong, ZHANG Min. Effect of antioxidant of bamboo leaves on fresh-keeping of sauce duck[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22): 231-234, 252.
- [48] NUÑEZ DE GONZALEZ M T, HAFLEY B S, BOLEMAN R M, et al. Antioxidant properties of plum concentrates and powder in precooked roast beef to reduce lipid oxidation[J]. Meat Science, 2008, 80(4): 997-1004.
- [49] CHENG Jingrong, LIU Xueming, ZHANG Yousheng, et al. Protective effects of *Momordica grosvenori* extract against lipid and protein oxidation-induced damage in dried minced pork slices[J]. Meat Science, 2017, 133: 26-35.

责任编辑:任长江