DOI:10.12441/spyswjs.20241115001 [文章编号] 1673-1689(2025)06-0010-09

茶多酚在肉制品加工与保鲜中的应用研究进展

高艳婷[1] 李欢欢[2] 许 腾[2] 赵 珂[2] 苏铭伟[3] 吴理文[3] 唐宏刚[2*]

(1. 宁波大学食品科学与工程学院,浙江 宁波 315211; 2. 浙江省农业科学院食品科学研究所,浙江 杭州 310021; 3. 浙江正德和食品有限公司,浙江 丽水 323400)

摘要:茶多酚是茶叶中多酚类物质的总称,主要包括儿茶素类、黄酮类、花青素类物质,具有抗氧化和抑菌特性。作者综述了茶多酚主要组分的结构特征及其抗氧化和抑菌机理,并对茶多酚在肉制品加工与保鲜中的应用进行了概述,为茶多酚在肉制品中的应用提供了理论依据。研究表明茶多酚可通过清除自由基、螯合金属离子及抑制氧化酶活性来发挥抗氧化作用,通过抑制菌体代谢酶活性以及损伤菌体细胞膜系统达到抑制菌体生长和增殖的目的。茶多酚作为天然抗氧化剂可以显著延长肉制品保质期,在生鲜、预制调理、酱卤、腌腊等肉制品中有广泛应用。目前,茶多酚在肉制品中的抑菌和抗氧化机理尚未完全明确,其溶解性差与稳定性低的问题仍需进一步解决。未来研究将聚焦于茶多酚的改性优化、协同保鲜及其在肉制品加工中的应用场景拓展,以进一步提升其保鲜效果。

关键词:儿茶素;抗氧化;抑菌;机理研究

Research Progress in the Application of Tea Polyphenols in Meat Processing and Preservation

GAO Yanting[1] *LI Huanhuan*[2] *XU Teng*[2] *ZHAO Ke*[2] *SU Mingwei*[3]
WU Liwen[3] *TANG Honggang*[2*]

(1. College of Food Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3. Zhejiang Zhengdehe Food Co., Ltd., Lishui 323400, China)

Abstract: Tea polyphenols are the general term for polyphenols in tea, mainly including catechins, flavonoids, and anthocyanins, which have antioxidant and antimicrobial properties. The author reviewed the structural characteristics and the antioxidant and antibacterial mechanisms of tea polyphenols. Additionally, the application of tea polyphenols in the processing and preservation of meat products is summarized, providing a theoretical basis for their use in meat products. Studies have shown that tea polyphenols can achieve anti-oxidation by scavenging free radicals, chelating metal ions, and inhibiting oxidase activity. Moreover, tea polyphenols can inhibit cell growth and proliferation by inhibiting the activities of enzymes involved in cell metabolism and damaging the cell membrane system. As natural antioxidants, tea polyphenols can significantly prolong the shelf life of meat products and are widely used in fresh, pre-made, sauced, pickled, and other meat products. At present, the mechanisms underpinning the antibacterial and antioxidant effects of tea polyphenols in meat products have not been fully clarified, and the poor solubility and low stability of tea polyphenols remain to be solved. Future research should focus on the modification and optimization of tea polyphenols, synergistic preservation, and the application of tea polyphenols in meat processing to further improve the preservation effect.

Keywords: catechin; antioxidant effect; antibacterial effect; mechanism research

---

基金项目:国家蛋鸡产业技术体系项目(CARS-40-K26);浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C02060)。
通信作者:唐宏刚(1980—),男,博士,副研究员,硕士研究生导师,主要从事畜产品加工研究。E-mail: zaastang@163.com
收稿日期:2024-11-15 **修回日期:**2024-12-03

茶多酚是茶叶中多酚类物质的总称，主要由儿茶素类（黄烷醇类）、黄酮类及花青素类物质组成[1]，其中儿茶素类物质质量分数最高，可达茶多酚总质量的60%~80%。茶多酚在常温下呈浅黄色或浅绿色粉末，易溶于温水（40~80 ℃），可溶于乙醇，在常规条件下稳定性较强[2-5]，其在碱性条件下极不稳定[6]，易氧化褐变，遇到三价铁离子时会生成黑绿色化合物。研究表明茶多酚具有抗氧化[7]、抗菌、抗癌、抗衰老[8]、降血压、降血脂、降血糖等作用[9-10]。茶多酚可以抑制多种癌细胞的生长与增殖，诱导癌细胞凋亡；调节人体代谢，促进脂肪代谢与分解，辅助降低血糖和胆固醇水平，在预防心血管疾病和糖尿病等方面具备良好潜力[11-12]；此外，茶多酚还有收缩毛孔、保湿等功效，可应用于防晒、保湿乳液等产品中[13-15]。

茶多酚作为一种天然抗氧化剂在食品行业应用广泛，已被批准用于油脂类、巧克力/糖果、冷冻饮品、粮食制品、烘焙食品、肉及肉制品、水产制品、蛋及蛋制品、调味品、特殊膳食食品、饮料、配制酒等食品中。研究表明，茶多酚能保持食品新鲜度和色泽，显著延长食品的保质期，提升食品安全性[16-17]。近年来，茶多酚在肉制品加工与保鲜中的应用受到较多关注[18-20]，研究表明茶多酚不仅可以有效抑制肉制品脂肪氧化，防止颜色劣变和酸败味产生，还能显著抑制肉制品中的细菌生长，特别是罐头类肉制品中的耐热芽孢菌，有效防止肉制品腐败变质[21]。此外，茶多酚还能消除肉制品中的臭味和腥味，保持其原有的风味和口感[22]，目前已广泛应用于腌腊肉制品、酱卤肉制品、油炸肉类、西式火腿类、发酵肉制品等产品中。作者对茶多酚的组成和作用机制及其在肉制品加工与保鲜中的应用进行了综述，并展望了其应用前景和未来发展方向，旨在为茶多酚在肉制品中的应用提供思路。

1　茶多酚组成及其分子结构

儿茶素类物质因在茶多酚中质量分数高、生物活性强，成为了近年来的研究热点[23]。儿茶素类可分为酯型儿茶素和非酯型儿茶素，其中表没食子儿茶素没食子酸酯（epigallocatechin gallate，EGCG）是儿茶素中含量最高、活性最强的成分，见图1[24]。EGCG的分子结构中含有2个没食子酰基团，分别连接在B环的3’和5’位置上，这一结构赋予其抗氧化和多种生物活性[25-28]。黄酮类物质属于植物次生代谢产物，占茶多酚总质量的10%~15%，是由2个苯环（A环和B环）通过中心三碳链连接形成的一类以C6—C3—C6为基础框架的化学物质[29]。花青素是一种在自然界中普遍存在于植物体内的水溶性天然色素，它是由花色苷水解得到的颜色丰富的苷元，其基本结构为2-苯基苯并吡喃阳离子苷元[30]，茶多酚中的花青素类物质主要以糖苷的形式存在，占茶多酚总质量的5%~10%。此外，茶多酚中还含有少量的丹宁酸、香豆素、木脂素等酚酸类物质[31]，占茶多酚总质量的5%以下。

茶多酚的含量和分布因茶叶种类、产地、采摘季节及加工工艺的不同而有所差异。一般来说，绿

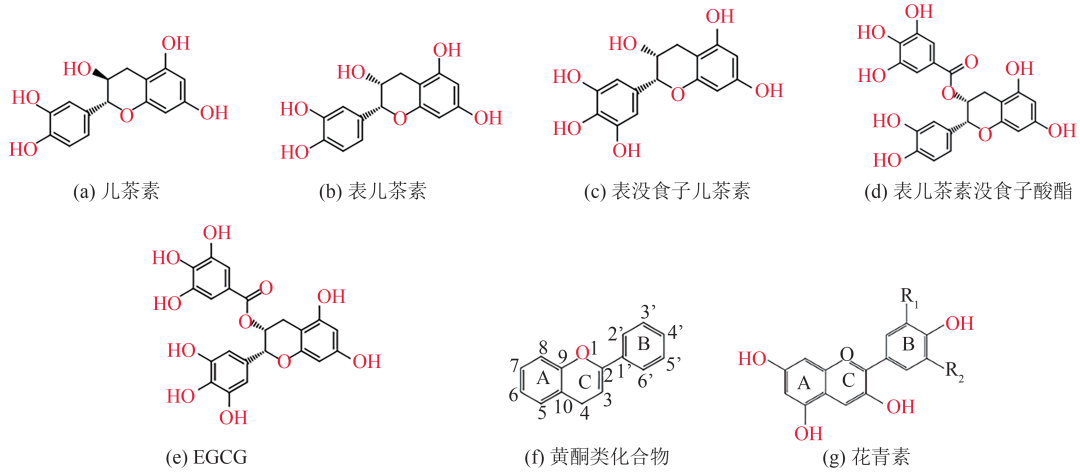


图1　儿茶素类、黄酮类和花青素类物质的化学结构

Fig. 1　Chemical structure of catechins, flavonoids and anthocyanins

茶中茶多酚含量最高，尤其是EGCG等酯型儿茶素类物质，这主要得益于绿茶制作过程中较少的发酵步骤保留了较多的活性成分[32]；红茶经过全发酵处理后，茶多酚（特别是酯型儿茶素类物质）发生氧化聚合反应，转化为茶黄素、茶红素等化合物，导致茶多酚含量有所下降，但仍有较高生物活性；而乌龙茶（青茶）和白茶则介于绿茶和红茶之间，其茶多酚含量和分布因发酵程度的不同而有所变化[33]。

2 茶多酚的抗氧化及抑菌机理

2.1 抗氧化机理

茶多酚可以清除自由基、螯合金属离子以及抑制氧化酶活性，氢原子转移和单电子转移是茶多酚实现抗氧化作用的主要机制。如图2所示[34]，自由基是脂质过氧化反应的主要引发因子，其能够攻击细胞膜上的不饱和脂肪酸，启动脂质过氧化链反应。儿茶素类物质对自由基的清除能力较强，特别是对氧自由基和羟基自由基的清除率达到98%以上。茶多酚不仅可以直接与自由基反应，阻断其进一步引发氧化链反应，还能作为断链型抗氧化剂清除脂质过氧自由基和烷氧自由基等链反应中间产物，进而有效抑制脂质自由基的传播与扩增[35-37]。过渡金属离子（如Fe^{2+}和Cu^{2+}）作为关键催化剂，可通过催化自由基生成来加速脂质过氧化反应[38]。茶多酚中的邻苯二酚结构具有很强的金属离子螯合能力，能与Fe^{2+}、Cu^{2+}等金属离子结合，形成无活性的金属复合物，从而降低这些金属离子对氧化反应的催化作用，有效抑制脂质过氧化反应的发生[39]。氧化酶是生物体内催化氧化反应的酶类，其活性过高会加速自由基的生成，进而促进脂质过氧化反应。茶多酚能够抑制多种氧化酶的活性，如降低过氧化氢酶、谷胱甘肽过氧化物酶等酶的活性，从而减少自由基的生成。此外，茶多酚还能增强抗氧化酶活性，例如提升谷胱甘肽转移酶的催化效能，这些酶能够清除已生成的自由基，进一步降低脂质过氧化反应的程度[23]。此外，茶多酚还能通过激活细胞内抗氧化防御系统和增强其他抗氧化剂活性的方式，协同抑制脂质过氧化反应。例如与维生素E、维生素C等抗氧化剂协同作用，共同发挥抗氧化效果[40-41]。

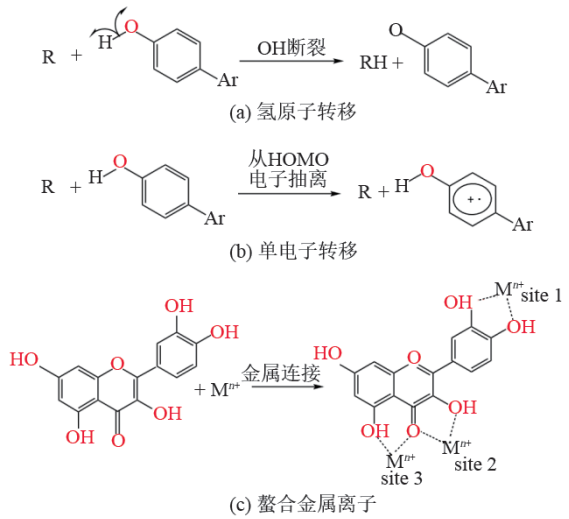


图2 茶多酚抗氧化的作用机制

Fig. 2 Antioxidant mechanisms of tea polyphenols

2.2 抑菌机理

如图3所示[42]，茶多酚可通过影响细菌生存环境、抑制菌体代谢酶活性以及损伤菌体细胞膜系统达到抑制菌体生长和增殖的目的[43]。研究表明，茶多酚能够抑制ATP的合成及相关酶类的活性，当茶多酚进入细胞内可以作用于酶系统，从而干扰其正常代谢。Cao等[44]探究了EGCG对大肠杆菌细胞膜的影响，结果显示，EGCG能够提升大肠杆菌外膜与内膜的通透性，有效抑制大肠杆菌的生长。Bhattacharya等[45]研究表明，康普茶多酚物质中的儿茶素可以通过产生氧化应激渗透进细菌细胞膜内。Yi等[46-47]分析了茶多酚对铜绿假单胞菌和黏质沙雷氏菌的抑制作用，证明其可通过增强腐败菌细胞膜通透性而发挥抑菌作用。此外，茶多酚还可以影响细胞正常的基因表达。Ulanowska等[48]研究表明茶多酚通过多靶点作用于微生物的DNA和RNA，从遗传信息的复制、转录到翻译全链条干扰其生物学过程，最终抑制微生物增殖。

3 茶多酚在肉制品加工与保鲜中的应用研究

3.1 肉制品加工中的应用

肉制品中脂肪是风味的重要来源，适度氧化可以产生特征风味，过度氧化会导致口感、品质和安全性降低。茶多酚可以显著减轻肉制品脂质过氧化。在冷鲜肉制品中，茶多酚与其他抗氧化剂如葡萄籽提取物、*D*-抗坏血酸钠等联合使用，能显著降低样品在贮存过程中的菌落总数、挥发性盐基总氮含量，改善肉色并延长保质期。

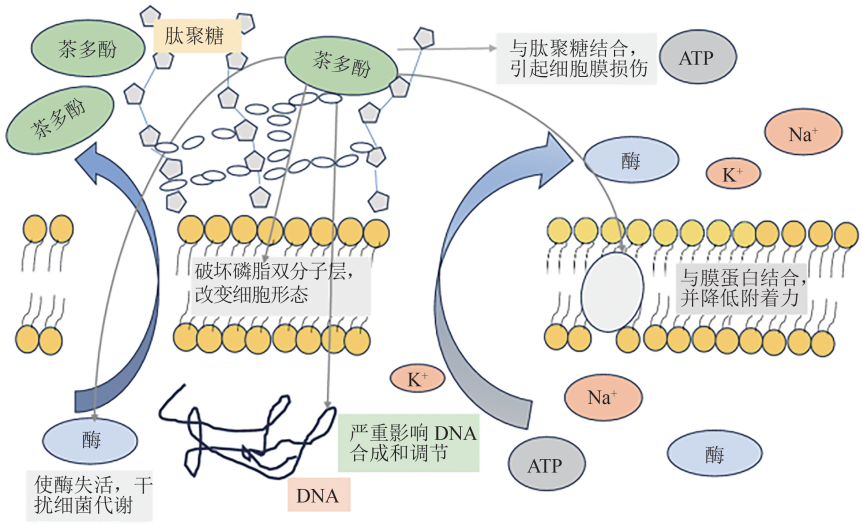


图 3　茶多酚抑菌的作用机制

Fig. 3　Antibacterial mechanisms of tea polyphenols

茶多酚与非热加工技术联合使用可减弱非热加工造成的损伤。Rababah 等[49]研究辐照对绿茶和葡萄籽提取物浸泡过的生/熟鸡胸肉中脂肪氧化和挥发性化合物的影响时发现，辐照虽然提高了脂肪氧化水平，但与植物提取物联用可以显著减轻辐照引起的脂肪氧化。在预制调理肉制品中，茶多酚能显著抑制肉制品质构和感官品质劣变。Jo 等[50]研究了经辐照及冷冻干燥的绿茶提取物对生/熟猪肉饼品质和感官特性的影响，发现猪肉饼的脂质氧化程度较低，自由基清除效果较好，因此经过辐照及冷冻干燥后的绿茶提取物可用于生产功能性改良的肉制品。在干腌制品中，茶多酚能显著增强抗氧化和抗菌作用，维持产品 pH 稳定并改善整体品质。丛懿洁等[51]在猪肉脯中添加茶多酚，研究其在贮藏过程中对猪肉脯脂质氧化和色泽变化的影响，结果显示茶多酚对猪肉脯色泽有显著影响。此外，茶多酚在熏肠等制品中也表现出良好的抗氧化能力，能有效抑制有害物质如硫代巴比妥酸反应物、亚硝酸盐和 *N*-亚硝胺的生成，进一步提升产品的安全性和品质（见表 1）。

3.2　肉制品保鲜中的应用

茶多酚在肉制品保鲜中的应用较多（见表 2）。现有研究发现茶多酚与其他保鲜剂（如乳酸菌、乳酸链球菌素、辣椒素、维生素 C、维生素 E、壳聚糖等）联用具有显著的协同保鲜效果。Sun 等[18]研究发现，乳酸链球菌素、茶多酚、迷迭香提取物和壳聚糖协同使用可有效抑制巴氏杀菌鸡肉肠中微生物的生长，提高鸡肉肠的安全性和保质期。He 等[63]评价了乳酸球蛋白、茶多酚和壳聚糖及其协同处理对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的抑菌活性，发现处理后的羊肉在 4 ℃保鲜膜包装中的保质期由 6 d 延长至 18 d，乳酸球蛋白、茶多酚和壳聚糖协同使用可以有效抑制肉类中腐败微生物的生长，延长保质期。

近年来，将茶多酚应用于可食性包装材料是研究热点之一。如表 2 所示，Wang 等[19]以质量分数 1% 的茶多酚、壳聚糖和山梨酸钾为涂膜材料处理冷鲜羊肉，贮藏到第 12 天时，茶多酚处理的羊肉保鲜效果显著优于壳聚糖和山梨酸钾。Qin 等[64]探讨了壳聚糖膜与茶多酚协同处理对 4 ℃条件下保存 12 d 的猪肉饼品质的影响，发现壳聚糖-茶多酚复合膜可有效延缓猪肉饼硫代巴比妥酸值并增加高铁肌红蛋白的含量，在整个贮藏过程中保持良好的肉饼感官品质。Chen 等[70]利用芒果皮废弃物制备抗菌包装材料，加入茶多酚后，芒果皮的水蒸气透过率降低了 32.5%，氧气透过率降低了 84.3%，二氧化碳透过率降低了 80.0%；将该材料用于鸡胸肉保鲜，4 ℃条件下贮藏 12 d 后，鸡胸肉硫代巴比妥酸值降低了 19.0%，挥发性盐基总氮降低了 60.6%。

表 1 茶多酚在肉制品加工中的应用

Table 1 Application of tea polyphenols in meat processing

肉制品种类	研究方法	应用效果	文献
猪肉脯	在贮藏过程中添加茶多酚和特丁基对苯二酚	L^*、a^*、b^*值均呈显著下降趋势	[51]
生鲜猪肉	电子束辐照与抗氧化剂(茶多酚、葡萄籽提取物和*D*-抗坏血酸钠)联合处理对真空包装鲜猪肉冷藏 12 d 的影响	显著降低了样品贮存过程中的菌落总数、挥发性盐基总氮水平,抑制 pH 的增加	[52]
鸡肉	饲粮中添加儿茶素	随着儿茶素的增加,样本中的硫代巴比妥酸值降低,200、300 mg/kg 饲料组的儿茶素显著延缓了各组织的脂质氧化	[53]
鸭肉	添加儿茶素	添加小叶种儿茶素和 EGCG 可以显著改善鸭胸肉色和延长货架期	[54-55]
牛肉馅	添加茶多酚、葡萄籽提取物和海藻糖	肉馅的保水性增强,质构变化程度减小,提高了水饺品质	[56]
猪肉饼	添加儿茶素	显著改善肉糜的脂质稳定性和颜色稳定性	[57]
牛肉饼	添加 0.1 g/kg 葡萄籽提取物或 0.1 g/kg 茶多酚	抑制高氧气调包装牛肉饼加热过程中的提前褐变现象,提高冷藏过程中生肉饼的肉色稳定性	[58]
牛肉饼	添加儿茶素	可以有效减少煮熟或生牛肉饼中的脂质氧化	[59]
猪肉干	添加儿茶素脂质体	儿茶素脂质体显著增强了对猪肉干的抗氧化和抗菌作用,室温贮藏 25 d 后,能更好地维持猪肉干的 pH 稳定性	[60]
腊肉	分别添加儿茶素、迷迭香酸、茶多酚 3 种天然抗氧化剂	儿茶素组的抗氧化性能最佳,水分含量、L^*值和a^*值最大;茶多酚组的抑菌效果最佳	[61]
熏肠	添加迷迭香提取物、葡萄籽提取物和绿茶多酚,研究其对熏肠品质的影响	绿茶多酚对熏肠硫代巴比妥酸值、亚硝酸盐和*N*-亚硝胺的抑制效果最好,具有良好的抗氧化能力	[62]

表 2 茶多酚在肉制品保鲜中的应用

Table 2 Application of tea polyphenol in meat preservation

肉制品种类	研究方法	应用效果	文献
鸡肉肠	乳酸链球菌素、茶多酚、迷迭香提取物和壳聚糖协同使用	具有显著的抗菌和抗氧化效果,在 4 ℃下可将鸡肉肠货架期延长至 30 d	[18]
冷鲜羊肉	茶多酚、壳聚糖和山梨酸钾涂膜冷鲜羊肉	在贮藏结束后第 12 天,茶多酚涂膜羊肉的效果显著优于壳聚糖和山梨酸钾	[19]
香肠	添加茶多酚	20 ℃下贮藏 42 d,样品品质和感官特性显著优于未处理组,茶多酚显著延长了香肠的保质期	[20]
冷藏羊肉	乳酸球蛋白、茶多酚、壳聚糖复合保鲜膜	保质期由 6 d 延长至 18 d	[63]
猪肉肉饼	壳聚糖-茶多酚复合涂膜	减缓硫代巴比妥酸值和高铁肌红蛋白含量的增加速度,经复合膜处理的猪肉饼在贮藏期间感官品质良好,保质期延长了 6 d	[64]
冷鲜猪肉	壳聚糖-茶多酚-乳酸球蛋白协同处理	冷鲜猪肉品质良好,保质期延长至 11 d	[65]
牛肉	竹醋液与茶多酚复配液用于牛肉保鲜	将牛肉货架期由原来 6~8 d 延长到 12~14 d	[66]
卤牛肉	炖汤中添加质量分数为 0.02% 的 ε-聚赖氨酸和 0.02% 的茶多酚	室温贮存 12 d,其细菌生长情况、pH、挥发性盐基总氮水平、硫代巴比妥酸值和感官品质均无变化	[67]
香肠	茶多酚与海藻酸钠复合涂膜	40 d 贮藏期间,pH 无显著变化,过氧化物酶活性显著低于其他组,硫代巴比妥酸值也低于 0.7 mg/mL	[68]
腊肉	添加茶多酚微胶囊	腊肉的过氧化值和硫代巴比妥酸值显著降低,色泽稳定,亚硝酸盐残留量显著降低	[69]

将茶多酚与其他保鲜技术(如低温贮存、真空包装、气调包装等)协同使用,形成的复合保鲜技术可以综合发挥各种保鲜技术的优势,提高肉制品的保鲜效果。例如,将茶多酚添加到真空包装中,可以进一步增强包装的阻隔性能,减少氧气和微生物的侵入。Wang 等[71]将羊肉用茶多酚溶液浸泡后,置于托盘内密封,用冷等离子系统处理 150 s,结果表明茶多酚与冷等离子体协同处理可以有效抑制微生物生长,减缓脂肪和蛋白质氧化,延缓色泽劣变程度,有助于保持羊肉品质和延长货架期。

研究发现,茶多酚在高浓度下能有效抑制肉制品中微生物的生长和脂肪氧化,但会导致色泽劣变,降低消费者接受度。近年来在茶多酚的提取、改性及使用方法上有较多研究。比如通过优化提取工艺,进一步提高茶多酚的纯度与活性[72-73];对茶多酚进行包埋[74]和改性,增强其稳定

性与生物利用率的同时减少对肉制品感官品质的负面影响[75-77]。此外，研究者们还探索了茶多酚与其他保鲜剂的协同效应，为实际应用提供理论支撑[67]。在实际生产中，根据肉制品的种类、加工方式和保存条件优化茶多酚的用量，并采用喷洒、浸泡、包埋等多种方式，兼顾保鲜效果与感官品质，为肉制品保鲜开辟新的解决方法。随着提取、改性技术的进步以及生产成本的逐步降低，茶多酚的应用正朝着产业化和规模化方向发展，有望为肉制品工业提供更加安全、高效的保鲜方案。

4 展望

茶多酚具有较强的抗氧化性和抑菌特性，可有效减缓肉制品加工和储运过程中的脂肪/蛋白质氧化程度，降低微生物污染水平，同时还可以改善肉制品的质构，使其更加鲜嫩。但高浓度的茶多酚会导致肉制品色泽劣变，降低消费者接受度。目前茶多酚在肉制品中的保鲜作用机理尚未完全明确，使用过程中其溶解性与稳定性问题仍需进一步解决。未来研究将聚焦于茶多酚的改性优化、协同保鲜方案及其在肉制品加工中的应用场景拓展，以进一步提升保鲜效果，明确其作用机理，并探索改善其溶解性与稳定性的方法，为茶多酚在肉制品中的深入应用提供理论支撑。

参考文献

[1] 张凌云. 福云6号制作不同茶类的抗氧化能力比较研究[J]. 现代农业科技，2013(16)：283.
ZHANG L Y. Comparative study on antioxidant capacity of different teas made by Fuyun 6[J]. Modern Agricultural Science and Technology，2013(16)：283.(in Chinese)

[2] 王美. 荷载β-胡萝卜素多重复合核壳结构纳米粒子的制备及体系特性研究[D]. 杭州：浙江工商大学，2018.

[3] PERERA G A A R，AMARAKOON A M T，ILLEPERUMA D C K，et al. Effects of raw material on the chemical composition，organoleptic properties，antioxidant activity，physical properties and the yield of instant black tea[J]. LWT-Food Science and Technology，2015，63(1)：745-750.

[4] XU Y Q，JI W B，YU P G，et al. Effect of extraction methods on the chemical components and taste quality of green tea extract[J]. Food Chemistry，2018，248：146-154.

[5] XUE H，ZHANG G W，HAN T F，et al. Improvement of gel properties and digestibility of the water-soluble polymer of tea polyphenol-egg white under thermal treatment[J]. Food Chemistry，2022，372：131319.

[6] FRIEDMAN M，LEVIN C E，LEE S U，et al. Stability of green tea catechins in commercial tea leaves during storage for 6 months[J]. Journal of Food Science，2009，74(2)：H47-H51.

[7] 肖浩，郑小江，朱玉婷. 藤茶多酚体外抗氧化作用[J]. 食品与生物技术学报，2011，30(5)：679-682.
XIAO H，ZHENG X J，ZHU Y T. Antioxidant effects of polyphenol from *Ampelopsis grossedentata*[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2011，30(5)：679-682.(in Chinese)

[8] 李柯欣. 茶多酚的提取、抑菌作用与抑菌机理研究[D]. 成都：西华大学，2017.

[9] YAN Z M，ZHONG Y Z，DUAN Y H，et al. Antioxidant mechanism of tea polyphenols and its impact on health benefits[J]. Animal Nutrition，2020，6(2)：115-123.

[10] 黄秋颜，李斌，林晓蓉，等. 基于高分辨质谱和网络药理学的可可茶多酚降血糖活性研究[J]. 食品与机械，2023，39(9)：4-11.
HUANG Q Y，LI B，LIN X R，et al. Studying on the hypoglycemic activity of green tea polyphenols from *Camellia ptilophylla* Chang using high-resolution mass spectrometry and network pharmacology[J]. Food & Machinery，2023，39(9)：4-11.(in Chinese)

[11] LUO Y，ZHANG J N，HO C T，et al. Management of Maillard reaction-derived reactive carbonyl species and advanced glycation end products by tea and tea polyphenols[J]. Food Science and Human Wellness，2022，11(3)：557-567.

[12] XING L J，ZHANG H，QI R L，et al. Recent advances in the understanding of the health benefits and molecular mechanisms associated with green tea polyphenols[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2019，67(4)：1029-1043.

[13] 车景俊，李明，金哲雄. 植物多酚作为护肤因子在化妆品领域的研究进展[J]. 黑龙江医药，2006，19(2)：97-99.
CHE J J，LI M，JIN Z X. Current research and development of plant polyphenols as skin care factor in cosmetics[J]. Heilongjiang Medicine Journal，2006，19(2)：97-99.(in Chinese)

[14] ALLEMANN I B，BAUMANN L. Botanicals in skin care products[J]. International Journal of Dermatology，2009，48(9)：923-934.

[15] 张参战，李志洲. 植物多酚在化妆品中的应用机理及开发[J]. 安康师专学报，2004，16(1)：87-89.
ZHANG C Z，LI Z Z. Exploiting and application of plant polyphenol in cosmetics[J]. Journal of Ankang Teachers College，2004，16(1)：87-89.(in Chinese)

[16] GAO H X，CHEN N，HE Q，et al. Effects of structural characteristics of phenolic compounds on oxidation of glycerol trioleate：action rule and mechanism[J]. Food

Chemistry，2024，433：137361.

[17] DAI Z H，HAN L N，LI Z，et al. Combination of chitosan，tea polyphenols，and nisin on the bacterial inhibition and quality maintenance of plant-based meat [J]. Foods，2022，11(10)：1524.

[18] SUN K K，WANG S L，GE Q F，et al. Antimicrobial and preservative effects of the combinations of nisin，tea polyphenols，rosemary extract，and chitosan on pasteurized chicken sausage [J]. Journal of Food Protection，2021，84(2)：233-239.

[19] WANG W D，SUN Y. Preservation effect of meat product by natural antioxidant tea polyphenol [J]. Cellular and Molecular Biology，2016，62(13)：44-48.

[20] FAN W J，CHEN Y C，SUN J X，et al. Effects of tea polyphenol on quality and shelf life of pork sausages[J]. Journal of Food Science and Technology，2014，51(1)：191-195.

[21] 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.

[22] 骆扬，鲁才秀. 香蕉皮多糖与茶多酚复配对卤牛肉的保鲜研究[J]. 肉类工业，2015(8)：41-45.
LUO Y，LU C X. Study on preservation effect of banana peel polysaccharides compounded with tea polyphenols on stewed beef[J]. Meat Industry，2015(8)：41-45.(in Chinese)

[23] BABU P V A，LIU D M. Green tea catechins and cardiovascular health：an update[J]. Current Medicinal Chemistry，2008，15(18)：1840-1850.

[24] 许婧，李洪涛，李春雷. 茶多酚的生物学作用及其在猪和家禽生产中的应用[J]. 饲料研究，2024，47(14)：166-171.
XU J，LI H T，LI C L. Biological functions of tea polyphenols and their application in pig and poultry production[J]. Feed Research，2024，47(14)：166-171.(in Chinese)

[25] RICE-EVANS C A，MILLER N J，PAGANGA G. Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids [J]. Free Radical Biology and Medicine，1996，20(7)：933-956.

[26] FARKAS O，JAKUS J，HÉBERGER K. Quantitative structure-antioxidant activity relationships of flavonoid compounds[J]. Molecules，2004，9(12)：1079-1088.

[27] HARBORNE J B，WILLIAMS C A. Advances in flavonoid research since 1992[J]. Phytochemistry，2000，55(6)：481-504.

[28] HEIM K E，TAGLIAFERRO A R，BOBILYA D J. Flavonoid antioxidants：chemistry，metabolism and structure-activity relationships [J]. The Journal of Nutritional Biochemistry，2002，13(10)：572-584.

[29] 齐婧敏. 几种天然黄酮类化合物清除自由基活性的密度泛函理论研究[D]. 新乡：河南师范大学，2014.

[30] 高晨曦，黄艳，孙威江. 茶叶中原花青素研究进展[J]. 茶叶科学，2020，40(4)：441-453.
GAO C X，HUANG Y，SUN W J. Research progress of proanthocyanidins in tea[J]. Journal of Tea Science，2020，40(4)：441-453.(in Chinese)

[31] 贝力克孜·麦麦提，买尼沙木·亚生，韩松林. 绿茶中茶多酚的生物活性及其在食品中的应用[J]. 食品安全导刊，2024(26)：159-161.
BERIKIZ M，MAHNISAMU Y，HAN S L. Bioactivity of tea polyphenols in green tea and their application in food[J]. China Food Safety Magazine，2024(26)：159-161.(in Chinese)

[32] TRUONG V L，JEONG W S. Cellular defensive mechanisms of tea polyphenols：structure-activity relationship [J]. International Journal of Molecular Sciences，2021，22(17)：9109.

[33] WANG H F，PROVAN G J，HELLIWELL K. Tea flavonoids：their functions，utilisation and analysis[J]. Trends in Food Science & Technology，2000，11(4/5)：152-160.

[34] LEOPOLDINI M，RUSSO N，TOSCANO M. The molecular basis of working mechanism of natural polyphenolic antioxidants[J]. Food Chemistry，2011，125(2)：288-306.

[35] JAYAWARDANA B C，WARNASOORIYA V B，THOTAWATTAGE G H，et al. Black and green tea (*Camellia sinensis* L.) extracts as natural antioxidants in uncured pork sausages[J]. Journal of Food Processing and Preservation，2019，43(2)：e13870.

[36] NAMAL SENANAYAKE S P J. Green tea extract：chemistry，antioxidant properties and food applications-a review[J]. Journal of Functional Foods，2013，5(4)：1529-1541.

[37] MILIĆ B L，DJILAS S M，ČANADANOVIĆ-BRUNET J M. Antioxidative activity of phenolic compounds on the metal-ion breakdown of lipid peroxidation system[J]. Food Chemistry，1998，61(4)：443-447.

[38] 李旭. 茶多酚的抗自由基作用[J]. 科技视界，2014(25)：352-353.
LI X. Anti-free radical effect of tea polyphenols[J]. Science & Technology Vision，2014(25)：352-353.(in Chinese)

[39] MICHALAK A. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress [J]. Polish Journal of Environmental Studies，2006，15：523-530.

[40] 王岳飞，徐平，李磊，等. 茶多酚与几种天然抗氧化物质的协同作用研究[J]. 茶叶科学，2010，30(2)：109-114.
WANG Y F，XU P，LI L，et al. Research on total antioxidant activity of tea polyphenols and other natural antioxidants[J]. Journal of Tea Science，2010，30(2)：

109-114.(in Chinese)

[41] 唐煜括，左聪聪，李佳笑，等. 汉中仙毫茶多酚与维生素C抗氧化及抑菌活性的协同作用[J]. 食品科学技术学报，2017，35(3)：55-60.
TANG Y K，ZUO C C，LI J X，et al. Synergism of antioxidant and antibacterial activities between Hanzhongxianhao tea polyphenols and vitamin C[J]. Journal of Food Science and Technology，2017，35(3)：55-60.(in Chinese)

[42] 姚凯勇，陈斌丹，蔡杰，等. 天然抑菌剂对禽肉制品的作用机制及应用研究进展[J]. 浙江农业科学，2023，64(8)：1999-2005.
YAO K Y，CHEN B D，CAI J，et al. Research progress and mechanism of natural antimicrobial agents on poultry meat products[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences，2023，64(8)：1999-2005.(in Chinese)

[43] PERNIN A，GUILLIER L，DUBOIS-BRISSONNET F. Inhibitory activity of phenolic acids against *Listeria monocytogenes*：deciphering the mechanisms of action using three different models[J]. Food Microbiology，2019，80：18-24.

[44] CAO Y D，QIAN H L，FENG C M，et al. Study on the mechanism of epigallocatechin gallate (EGCG) to the cell membrane of *Escherichia coli*[J]. Science of Advanced Materials，2019，11(2)：262-268.

[45] BHATTACHARYA D，GHOSH D，BHATTACHARYA S，et al. Antibacterial activity of polyphenolic fraction of Kombucha against *Vibrio cholerae*：targeting cell membrane[J]. Letters in Applied Microbiology，2018，66(2)：145-152.

[46] YI S M，ZHU J L，FU L L，et al. Tea polyphenols inhibit *Pseudomonas aeruginosa* through damage to the cell membrane[J]. International Journal of Food Microbiology，2010，144(1)：111-117.

[47] YI S M，WANG W，BAI F L，et al. Antimicrobial effect and membrane-active mechanism of tea polyphenols against *Serratia marcescens*[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology，2014，30(2)：451-460.

[48] ULANOWSKA K，TKACZYK A，KONOPA G，et al. Differential antibacterial activity of genistein arising from global inhibition of DNA，RNA and protein synthesis in some bacterial strains[J]. Archives of Microbiology，2006，184(5)：271-278.

[49] RABABAH T，HETTIARACHCHY N S，HORAX R，et al. Thiobarbituric acid reactive substances and volatile compounds in chicken breast meat infused with plant extracts and subjected to electron beam irradiation[J]. Poultry Science，2006，85(6)：1107-1113.

[50] JO C，HO S，BAE S，et al. Functional properties of raw and cooked pork patties with added irradiated，freeze-dried green tea leaf extract powder during storage at 4 ℃[J]. Meat Science，2003，64(1)：13-17.

[51] 丛懿洁，孙为正，杨园媛，等. 茶多酚和TBHQ对猪肉脯贮藏过程中色泽的影响[J]. 食品工业科技，2012，33(21)：322-325.
CONG Y J，SUN W Z，YANG Y Y，et al. Effects of TP and TBHQ on pork jerky's color during storage[J]. Science and Technology of Food Industry，2012，33(21)：322-325.(in Chinese)

[52] CHEN W J，YANG J J，HUANG N L，et al. Effect of combined treatments of electron beam irradiation with antioxidants on the microbial quality，physicochemical characteristics and volatiles of vacuum-packed fresh pork during refrigerated storage[J]. Food Control，2023，145：109480.

[53] TANG S Z，KERRY J P，SHEEHAN D，et al. Dietary tea catechins and iron-induced lipid oxidation in chicken meat，liver and heart[J]. Meat Science，2000，56(3)：285-290.

[54] 曾亮，黄建安，田丽丽，等. 儿茶素对保持鸭肉色泽及抗氧化作用的研究[J]. 茶叶科学，2007，27(3)：215-220.
ZENG L，HUANG J A，TIAN L L，et al. Study on color and shelf-life of duck thigh meat by adding catechins[J]. Journal of Tea Science，2007，27(3)：215-220.(in Chinese)

[55] 曾亮，黄建安，唐书泽，等. 儿茶素对鸭肉色泽和鲜度的影响[J]. 食品与机械，2008，24(1)：55-59.
ZENG L，HUANG J A，TANG S Z，et al. Study on color and shelf-life of duck meat by adding catechins[J]. Food & Machinery，2008，24(1)：55-59.(in Chinese)

[56] 曲宝宝. 应用茶多酚和葡萄籽提取物提高速冻水饺牛肉馅品质的技术研究[D]. 泰安：山东农业大学，2020.

[57] TANG S Z，OU S Y，HUANG X S，et al. Effects of added tea catechins on colour stability and lipid oxidation in minced beef patties held under aerobic and modified atmospheric packaging conditions[J]. Journal of Food Engineering，2006，77(2)：248-253.

[58] 许宝琛，张一敏，罗欣，等. 葡萄籽提取物和茶多酚抑制高氧气调包装牛肉饼的提前褐变现象[J]. 现代食品科技，2022，38(1)：181-187，344.
XU B C，ZHANG Y M，LUO X，et al. Inhibition of grape seed extract and tea polyphenols on the premature browning of beef patties under high oxygen modified packaging[J]. Modern Food Science and Technology，2022，38(1)：181-187，344.(in Chinese)

[59] MITSUMOTO M，O'GRADY M N，KERRY J P，et al. Addition of tea catechins and vitamin C on sensory evaluation，colour and lipid stability during chilled storage in cooked or raw beef and chicken patties[J]. Meat Science，2005，69(4)：773-779.

[60] WU J Y，GUAN R F，CAO G Z，et al. Antioxidant and antimicrobial effects of catechin liposomes on Chinese

dried pork[J]. Journal of Food Protection,2018,81(5):827-834.

[61] 刘光宪,王丽,李雪,等. 3种天然抗氧化剂对腊肉理化性质的影响[J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(15):6177-6184.
LIU G X,WANG L,LI X,et al. Effects of 3 kinds of natural antioxidants on physicochemical properties of Chinese cured meat[J]. Journal of Food Safety & Quality,2021,12(15):6177-6184.(in Chinese)

[62] ZHOU Y J,WANG Q Y,WANG S J. Effects of rosemary extract,grape seed extract and green tea polyphenol on the formation of *N*-nitrosamines and quality of western-style smoked sausage[J]. Journal of Food Processing and Preservation,2020,44(6):e14459.

[63] HE L,ZOU L K,YANG Q R,et al. Antimicrobial activities of nisin,tea polyphenols,and chitosan and their combinations in chilled mutton[J]. Journal of Food Science,2016,81(6):M1466-M1471.

[64] QIN Y Y,YANG J Y,LU H B,et al. Effect of chitosan film incorporated with tea polyphenol on quality and shelf life of pork meat patties[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2013,61:312-316.

[65] ZHAO S M,LI N N,LI Z,et al. Shelf life of fresh chilled pork as affected by antimicrobial intervention with nisin,tea polyphenols,chitosan,and their combination[J]. International Journal of Food Properties,2019,22(1):1047-1063.

[66] 孙涛,刘华巍,谢晶,等. 竹醋液与茶多酚对牛肉的复合保鲜效果[J]. 食品与生物技术学报,2013,32(4):405-409.
SUN T,LIU H W,XIE J,et al. Preservation of beef by using mixture of bamboo vinegar and tea polyphenols[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2013,32(4):405-409.(in Chinese)

[67] LI F H,WU S J,XU B. Preservation of stewed beef chunks by using *ε*-polylysine and tea polyphenols[J]. LWT-Food Science and Technology,2021,147:111595.

[68] 李媛. 茶多酚与海藻酸钠涂膜对香肠储藏期品质的影响[J]. 食品工业,2018,39(5):153-155.
LI Y. The influence of tea polyphenols and sodium alginate coating on the quality of sausage during storage period[J]. The Food Industry,2018,39(5):153-155.(in Chinese)

[69] 刘芝君,黄业传,卿兰,等. 茶多酚微胶囊对腊肉理化性质及挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技,2020,41(11):51-59.
LIU Z J,HUANG Y C,QING L,et al. Effect of tea polyphenol microcapsules on physicochemical properties and volatile flavor substances of bacon[J]. Science and Technology of Food Industry,2020,41(11):51-59.(in Chinese)

[70] CHEN Z P,LIU R,WEI Y T,et al. A novel strategy to transform mango peel waste into useful product-preparing antibacterial film containing tea polyphenols for chicken breast preservation [J]. LWT-Food Science and Technology,2024,197:115933.

[71] WANG Y Y,LIU Y F,WANG J M,et al. Cold plasma and tea polyphenols: synergistic impact on microbial quantity and quality of mutton[J]. LWT-Food Science and Technology,2024,207:116635.

[72] HUANG D T,CHEN L R,CHEN X F,et al. Supramolecular deep eutectic solvents as green media for efficient extraction of tea polyphenols and its application in bio-active film[J]. Food Chemistry,2025,465:141904.

[73] BORAH A,GOGOI M,GOSWAMI R,et al. Ultrasound assisted hydrotropic extraction of polyphenols from green tea leaves in aqueous media[J]. Industrial Crops and Products,2024,209:117986.

[74] LI Y,YANG Y H,ZHU S,et al. Tea polyphenols-OSA starch interaction and its impact on interface properties and oxidative stability of O/W emulsion[J]. Food Hydrocolloids,2023,135:108187.

[75] ZHOU Q,MO M,WANG A L,et al. Changes in *N*-nitrosamines,residual nitrites,lipid oxidation,biogenic amines,and microbiota in Chinese sausages following treatment with tea polyphenols and their palmitic acid-modified derivatives[J]. Journal of Food Protection,2023,86(5):100072.

[76] ZHANG A,FAN X K,ZENG X Q,et al. Enhancing physicochemical,antimicrobial,and release properties of fish skin gelatin films using dual-layer nanoparticles loaded with tea polyphenols/kojic acid for air-dried chicken preservation[J]. Food Hydrocolloids,2024,149:109580.

[77] LI N,WANG C J,FENG B J,et al. Application of nanoencapsulation technology to improve the stability and bioactivity of tea polyphenols[J]. Food Bioscience,2023,55:103076.

（责任编辑:史润东东）