DOI:10.12441/spyswjs.20240318001 [文章编号] 1673-1689(2025)03-0001-10

低温等离子体技术在食品安全及营养领域的应用

刘 琪[1] 赵雨晴[1] 陈丽萍[2] 孙佳妮[1] 曲道峰[1] 韩菲菲[1*]

(1. 浙江工商大学食品与生物工程学院,浙江 杭州 310018; 2. 湖州市农业科学研究院,浙江 湖州 313000)

摘要:低温等离子体(cold plasma,CP)技术作为一种新兴的非热食品加工技术,以其高效、绿色、无化学残留等优点在食品保鲜和提高食品质量领域得到广泛应用。CP技术能够抑制腐败微生物的生长,降解食物中的过敏原和毒素;同时,该技术对食品营养成分可能产生正面或负面影响。研究CP技术的应用条件以及CP与食品加工条件的协同作用,有助于推进该技术在食品领域的合理应用。基于对CP产生方式的介绍,阐述了CP技术在食品安全领域的应用及其对食品营养成分的影响等,为CP技术在食品行业的精准应用提供参考。

关键词:低温等离子体;等离子体种类;安全性能;营养成分

Application of Cold Plasma Technology in the Filed of Food Safety and Nutrition

LIU Qi[1] *ZHAO Yuqing*[1] *CHEN Liping*[2] *SUN Jiani*[1] *QU Daofeng*[1] *HAN Feifei*[1*]

(1. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. Huzhou Agricultural Science Research Institute, Huzhou 313000, China)

Abstract: As an emerging non-thermal food processing technology, cold plasma (CP) technology has been widely applied in food preservation and improvement of food quality due to its high efficiency, greenness and lack of chemical residues. CP technology can inhibit the growth of spoilage microorganisms, and degrade allergens and toxins in food. At the same time, the technology may also have both positive and negative impacts on the nutritional composition of food. Studying the application conditions of CP technology and the synergistic effect between CP and food processing conditions can help promote the rational application in the food industry. Based on an introduction to the generation methods of CP, the applications of CP technology in the field of food safety and its effects on nutritional components are elaborated, providing a reference for the precise application of CP technology in the food industry.

Keywords: cold plasma; plasma species; safety performance; nutrient content

食源性病原体(如单核增生李斯特菌、金黄色葡萄球菌、致病性大肠杆菌、产气荚膜梭菌、弯曲杆菌和弧菌)引发的食源性疾病暴发数量不断增加,已成为重大的公共卫生挑战,导致许多国家遭受较大的经济损失[1]。传统热处理或加热灭菌是预防食品保存过程中食源性病原体危害的常用方法,但热处理也可能导致食品营养成分的损失。近年来,CP技术作为一种新兴的非热食品加工技术受到了广泛关注。CP技术无须消耗热能便可杀灭食品中的致病微生物,避免了传统热杀菌技术传热相对较慢和对杀菌对象产生热损伤等缺点。同时,CP技术对食品营养品质的影响远小于传统热处理方式,因此在食品领域有着广阔的应用前景。作者对CP的产生方法、CP技术在食品安全领域的应用以及CP技术对食品营养品质的影响进行了介绍,以期为CP技术在食品产业的合理应用提供理论参考。

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY22C200013);浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2023SNJF052)。

通信作者:韩菲菲(1980—),女,博士,副研究员,硕士研究生导师,主要从事食品营养与肠道健康研究。E-mail:hanzju@aliyun.com

收稿日期:2024-03-18 **修回日期:**2024-05-22

1 CP概述

1.1 等离子体的概念及分类

等离子体是由化学家Langmuir在1928年首次提出，并将其描述为“保持离子和电子电荷平衡的区域”。等离子体是一种部分或完全电离的准中性混合电离气体，被认为是除固体、液体、气体外的第4种物质存在状态。等离子体含有紫外线、各类活性颗粒、激发态气体原子和分子，以及光子、离子（H^+、H_3O^+、O^+、H^-、O^-、OH^-、N_2^+）、原子（激发态或基态）、自由基和带有净中性电荷的电子[2]。等离子体中高密度的活性颗粒，即活性氧（reactive oxygen species，ROS）和活性氮（reactive nitrogen species，RNS），能够通过破坏食品中不良微生物的蛋白质和DNA来灭活这些微生物[3]。

等离子体能够以各种状态存在，从极端的不平衡状态到接近完全热平衡状态。根据产生方法、压力和相对温度，等离子体可分为2类：热等离子体和非热等离子体。热等离子体含有气体物质和电子，在高压下温度可达到9 763 ℃，处于热力学平衡态[4]。因此，热等离子体可用于处理危险金属废物。非热等离子体是在30~60 ℃的大气或真空条件下产生的部分电离气体。CP中的气态物质具有高于常温时的能量，而其电子能量能够达到19 727 ℃或更高[5]。高能电子可以激发并电离反应物。此外，CP技术的反应体系能够保持较低温度，从而减少能量消耗。 因此，该技术在食品工业领域具有广泛的应用前景。

1.2 CP的产生方法

在低压、高压或大气压下对气体放电可产生CP。在低压下产生的称为低压低温等离子体（cold low-pressure plasma，CLP）；在高压下产生的称为高压低温等离子体（high voltage cold plasma，HVCP）；在大气压下产生的称为大气压低温等离子体（cold atmospheric plasma，CAP）。为了达到等离子体状态，用于电离产生等离子体的气体常由简单气体（空气、氮气等）、稀有气体（氦气、氖气、氩气等）或简单气体和稀有气体混合组成。对这些气体施加电场或其他外部能量后可产生电离气体。产生CP的放电方式主要包括介质阻挡放电（dielectric barrier discharge，DBD）、等离子体射流（atmospheric pressure plasma jets，APPJ）、微波放电（microwave discharges，MD）、电晕放电（corona discharge，CD）和辉光放电（glow discharge，GD）等[6-7]，见图1。

1.2.1 DBD

介质阻挡放电使用2个覆盖有介电材料的扁平金属电极进行放电，其中一个电极连接到高压电路，另一个电极接地，运行功耗为10~100 W。在封闭靶室中，简单气体、稀有气体或两者混合气体在2个电极之间移动，经过电离后产生等离子体产物，见图1（a）。DBD技术是最常用的等离子体生成技术之一。由于其较低的工业成本和较为灵活的电极形状，DBD技术在食品加工领域得到了广泛应用。

1.2.2 APPJ

APPJ装置由2个同心电极组成。外电极接地，内电极连接至外部能量源（如射频源），产生射频（radio frequency，RF）能量。射频能量与靶室中的工作气体相互作用导致气体电离并通过喷嘴排出，形成“喷射状”外观，见图1（b）。这种非弹性碰撞作用可在几厘米范围内与材料表面相互作用。由于APPJ反应速度快、作用时间短，因此该方式具有极高的处理效率。

1.2.3 MD

MD是一种无电极放电方式。微波发生器产生的微波通过导管传输到处理室内，与载气发生非弹性碰撞和电离反应，从而产生等离子体。该过程产生的等离子体温度较高，见图1（c）。该技术能在高气压下产生等离子体，且无须内部电极，使得等离子体发生器更加清洁、无污染，从而延长使用寿命。MD等离子体还具有安全性高、稳定性好、易于控制等优点。

1.2.4 CD

在CD方式中，等离子体是在大气压下通过不均匀电场强度产生的。CD出现在尖点附近和细电线上，见图1（d）。在高度不均匀的电场中，气体超过其击穿强度并产生具有一定亮度的弱电离等离子体。CD最适合应用于食品灭菌领域。

1.2.5 GD

GD装置主要由反应器和直流电源2部分组成。反应器采用直径为0.5 mm的铂丝作为阳极，直径为1.0 cm的碳棒作为阴极。反应过程中通过水浴控制温度，使用磁力搅拌器进行搅拌，见图1（e）。GD在高压电场的作用下生成高能活性粒子，这些粒子可与食品中毒素的特定基团发生

反应，破坏有机物中相应的化学键，经过一系列化学反应，将毒素最终降解为二氧化碳和水。因此，GD等离子体是一种绿色环保的食品毒素降解技术。

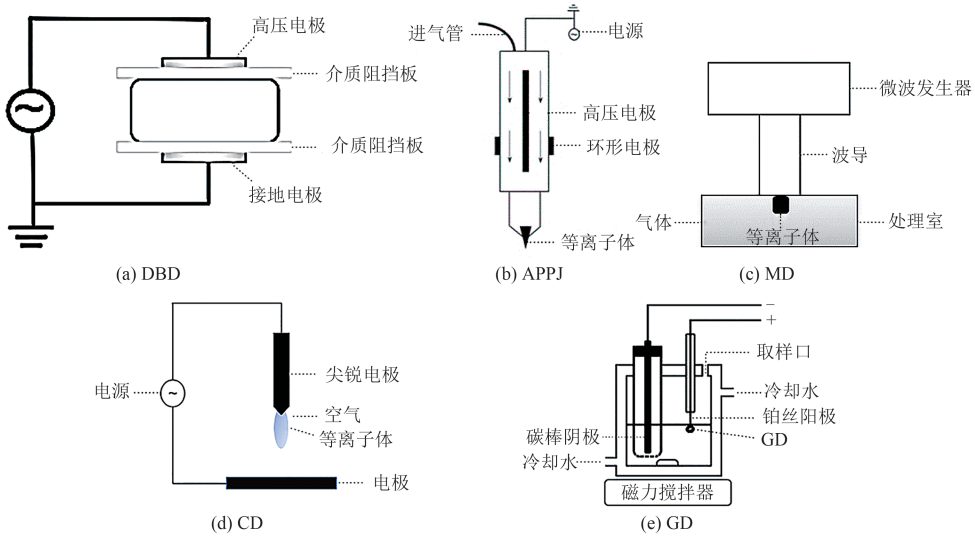


图1　等离子体产生装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the CP generation device

2　CP技术在食品安全领域的应用

为了最大限度地保持食品营养价值，食品行业研究者一直在探究食品加工从传统“热加工”向“冷加工”转变的技术实践。近年来，CP作为一种非热加工技术，因其对营养成分破坏少、食品原有感官特性保持较好、无毒副作用及成本较低等优点，受到广泛关注。CP技术在食品安全领域的应用不断增加，尤其是杀灭微生物、减少过敏原和降解毒素等方面。

2.1　杀灭微生物

CP技术处理食品时，主要通过产生对细胞致命的活性物质，从而有效灭活多种微生物。Gavahian等[8]研究等离子体灭活微生物的机制时发现，等离子体诱导产生的活性物质主要破坏细菌细胞壁。等离子体中的自由基还可吸附在微生物表面并扩散到细胞膜内，导致其蛋白质和核酸损伤。

CP技术可有效抑制食品表面的微生物。Feizollahi等[9]认为，不同类型的等离子体对微生物的抑制作用差异较大，其差异性主要取决于微生物类型及其存在形式。介质阻挡放电大气压低温等离子体（dielectric barrier discharge cold atmospheric plasma，DBD-CAP）对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的作用效果主要受细菌类型的影响。与革兰氏阳性菌相比，革兰氏阴性菌对DBD-CAP的敏感性较高，可能是因为革兰氏阳性菌的外膜较厚，限制了等离子体中活性物质的扩散。细菌孢子对DBD-CAP的处理表现出更强的抗性。这种抵抗力可能与活性物质无法穿透孢子细胞内膜、孢子DNA被小分子可溶性蛋白质屏蔽以及孢子核含水量较低有关。另一方面，与酵母和霉菌相比，嗜温菌不太容易受到DBD-CAP的影响。因此，革兰氏阴性菌、酵母和霉菌比革兰氏阳性菌、嗜温菌和细菌孢子更容易受到DBD-CAP的影响。为实现对特定微生物的杀灭效果，不同食品应根据其类型优化CP技术参数。表1列举了近年来利用DBD-CAP技术在多种类型食品杀菌中的应用参数和杀菌效果。

2.2　减少过敏原

食物过敏已成为全球性的健康问题。严重的食物过敏可导致皮肤、呼吸道和消化道受到不同程度损伤，甚至可能引发过敏性休克而危及生命。因此，研制低致敏食品已成为食品工业的热点研究之一。CP技术作为一种新型的食品非热加工技术可以有效修饰过敏原的结构，进而影响其致敏性。研究表明，过敏原的线性表位和构象表位及其反应性的变化是等离子体诱导过敏原失活的主要机制[19]。CP中的活性物质会降解线性表位并引发蛋白质构象表位的结构变化，导致过敏原失活。此外，各种氧、氮和羟基自由基也能通过影响蛋白质空间结构，促使过敏原分子失活[20-21]。

表 1 DBD-CAP 技术在食品杀菌中的应用

Table 1 Application of DBD-CAP technology in food sterilization

食品名称	等离子体源	处理参数	微生物	微生物减少量	参考文献
鸡胸肉	DBD-CAP	100 kV、5min	嗜温菌、耐冷菌、肠杆菌科	1.5、1.4、0.5 lg（CFU/g）	[10]
猪肉	DBD-CAP	10 min	单核细胞增生李斯特氏菌、大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌	2.04、2.54、2.68 lg（CFU/g）	[11]
干枣	DBD-CAP	70 kV、15 min	霉菌	2.67 lg（CFU/g）	[12]
梨	DBD-CAP	15 kV、40 min、极距 1.5 mm	酵母	2.50 lg（CFU/g）	[13]
谷物	DBD-CAP	80 kV、50 Hz、5~30 min	内生孢子（大肠杆菌、芽孢杆菌、乳酸杆菌、萎缩芽孢杆菌）	> 6 lg（CFU/g）	[14]
蓝莓	DBD-CAP	12 kV、5 kHz、1 min	总需氧菌	0.34~1.23 lg（CFU/g）	[15]
白虾	DBD-CAP	40 kV、500 Hz、10 min	葡萄球菌属和沙门氏菌属	1~2 lg（CFU/g）	[16]
鲐鱼	DBD-CAP	60 kV、60 s	总活菌	1.47~2.70 lg（CFU/g）	[17]
新鲜叶类蔬菜	DBD-CAP	26 kV、2 500 Hz	大肠杆菌	5.5×10^3 CFU/mL	[18]

花生过敏是一种严重的食物过敏类型，可能引发致命的过敏反应。Venkataratnam 等[22]研究了 CP 技术对花生主要过敏原（Ara h1 和 Ara h2）的作用。结果显示，CP 处理使 Ara h1 和 Ara h2 的二级结构发生变化，有效降低了花生蛋白的溶解度，减少了 Ara h1 和 Ara h2 的抗原性。酪蛋白和 α-乳清蛋白是主要的牛奶蛋白过敏原。Ng 等[23]通过 ELISA 评估，发现 CP 处理能够诱导酪蛋白和 α-乳清蛋白的氨基酸组成和二级结构改变，特别是改变 β 折叠和 β 转角的含量，有效降低 2 种牛奶蛋白的抗原性。该研究表明，常压 CP 技术可用于降低乳制品加工和配料行业中牛奶过敏原的风险。Tolouie 等[24]研究发现，水在 CP 技术修饰蛋白质过程中发挥重要作用。与干燥状态相比，溶液环境下的处理能够显著提高蛋白质失活效果。在干燥材料中，表层的干燥状态可能成为等离子体诱发转变的屏障；在溶液中，等离子体物质与溶液成分的相互作用可以促进次级反应物质的生成，进一步引发蛋白质失活。此外，Zhang 等[25]的研究也证明了 CP 技术在降低大豆过敏原抗原性方面的潜力。

2.3 降解毒素

霉菌毒素是真菌（主要是曲霉属、青霉属和镰刀菌属）产生的不良次级代谢产物，某些毒素可能诱发癌症或对人体神经系统造成损害。这些毒素通常具有热稳定性和化学稳定性，并且污染范围广，严重影响人畜健康。最近研究表明，CP 技术已被用于抑制食品中真菌增殖及真菌毒素产生，逐渐发展成为一种降解真菌毒素的新型处理手段。

CP 技术作为一种快速有效的新型物理降解方法，具有损耗小、效率高等特点。Wielogorska 等[26]评估了常压 CP 技术对食品和饲料中常见 6 种霉菌毒素的净化效果。结果发现，CP 处理后的玉米中黄曲霉毒素 B_1 和伏马菌素 B_1 含量降低了 66%，且仅检测到黄曲霉毒素 B_1 和玉米赤霉烯酮的降解产物，相关降解产物对人肝癌细胞的细胞毒性未增加。Wang 等[27]利用 CP 技术降解枣汁中的链格孢霉毒素（AOH 和 AME），评估了 CP 处理对果汁品质的影响。结果发现，CP 处理 2 min 后，随着电压从 10 kV 增加到 30 kV，AOH 和 AME 的降解率分别从 1.3% 和 8.1% 增加到 56.0% 和 62.8%，说明通过优化反应参数可有效降低霉菌毒素含量，延长枣汁的保质期。不同的反应参数可能会改变等离子体源体系中的气体电离程度，从而产生的活性自由基数量也会有所差异。

等离子体诱导毒素降解是一个由相互关联的多种反应共同驱动的复杂过程，其降解机制与反应物空间结构和分子相互作用力息息相关。基于天然毒素结构的多样性，探讨 CP 活性物质与毒素及复杂食品基质间的相互作用，将是未来研究 CP 技术降解毒素机制的关键方向。在食品生产过程中，利用 CP 技术有效降解潜在毒素仍具挑战性，尚需从作用机制及适宜处理的食品类型等方面开展深入研究。

3 CP 技术对食品营养成分的影响

CP 技术处理温度低，能较好保持食品原有感官特性，具有无毒副产品、成本低等优点，因此推动了其在杀菌、保鲜贮藏等食品安全领域的应用。

但作为一种通过复杂反应生成多种活性物质的技术，CP可能通过氧化降解和表面蚀刻等作用，影响食品中的营养成分，如蛋白质、碳水化合物、脂类、酚类化合物以及维生素等[28]。

3.1　蛋白质

研究发现，具有化学活性的等离子体物质会导致半胱氨酸、苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸等氨基酸芳香环中特定化学键断裂，诱导侧链发生化学修饰，破坏蛋白质的二级结构，进而影响蛋白质的功能[19]。具有芳香族残基的氨基酸和含硫氨基酸（如半胱氨酸和蛋氨酸）对CP的攻击特别敏感。Setsuhara等[29]报道了*L*-丙氨酸中的—COOH和—CNH_2基团由于直接暴露于氩等离子体中而发生降解。此外，CP技术可使参与不良反应的酶灭活，例如：多酚氧化酶（PPO）、过氧化物酶（POD）、碱性磷酸酶和脂肪酶[30]。同时，CP加工也可提高特定食品加工过程中的酶活性。Martínez等[31]研究发现，细胞与CP活性物质的相互作用，会激活一组与蛋白质折叠相关的氧化应激反应基因。这些基因能够缓解活性物质积累的负面影响，并提高某些酶的生产能力。经CP处理（60 W、20 min）的绿豆样品中，淀粉酶、蛋白酶和植酸酶的活性均有所提高。这种活性提高可能是由于CP处理提高了食物样品的吸水率[32]；也可能与这些酶特定代谢相关的可溶性糖含量增加有关。Akharume等[33]研究证实，CP技术结合不同的电压和处理时间，可对多种植物蛋白（如玉米醇溶蛋白、花生蛋白和豌豆粉蛋白）进行受控修饰，进而增强其功能性。CP技术对食品中蛋白质的影响具有双向性，具体效果主要取决于食品种类和CP反应参数。表2中总结了CP处理对多种食品蛋白质的影响。

3.2　碳水化合物

碳水化合物是构成细胞结构的必需物质，可为生命活动提供能量。CP处理可影响食品中碳水化合物的物理和化学性质。在葫芦巴中提取半乳甘露聚糖的研究发现，与直接CP处理和无CP处理相比，间接CP处理大幅降低了寡糖的提取率[42]。这可能是由于寡糖与CP产生的活性氧相互作用，导致糖苷键断裂。然而，Wongsagonsup等[43]研究发现，在基于氩气的DBD-CP中处理木薯5 min后，糖苷键数量增加，表明未发生CP诱导的氧化反应。

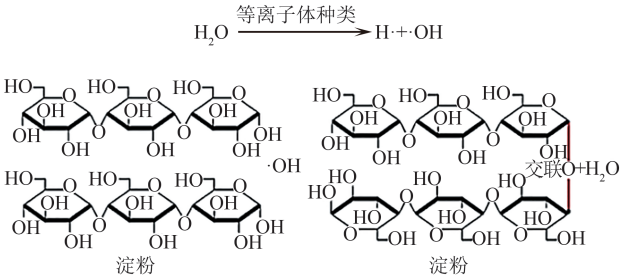
表2　CP技术对不同食品中蛋白质的影响

Table 2　Effects of CP technology on protein in different foods

研究对象	等离子体源	研究结果	参考文献
大豆分离蛋白	CAP	蛋白质β转角和β折叠发生变化；表现出聚集、蚀刻和表面积增加；蛋白质功能增强	[34]
燕麦	CAP	蛋白质二级结构（α螺旋增加、β折叠和转角减少）和三级结构改变；蛋白质解折叠和聚集，游离巯基和二硫键含量增加；蛋白质的发泡特性得到改善	[35]
亚麻籽	APPJ-CP	蛋白质亚基重塑，蛋白质羰基数量初始减少但随后增加	[36]
蓝蟹肉块	HVCP	蛋白质氧化增加	[37]
牛肉	DBD-CP	牛肉肌原纤维蛋白羰基含量随处理时间的延长而逐渐增加	[38]
糙米	DBD-CP	POD完全失活	[39]
菠萝汁	DBD-CP	45 kV处理10 min后，PPO和POD的残留活性分别下降76.1%和69.1%	[40]
小麦胚芽	CAP	氮气等离子体处理30 min后，脂肪酶和脂氧合酶的残留活性分别下降22.50%和7.48%	[41]

变性淀粉作为一种重要的食品添加剂，在食品行业中得到广泛应用。CP技术的应用主要集中在淀粉的改性研究。如图2所示，CP可通过链交联、解聚和等离子蚀刻3种机制对淀粉进行改性[44]。Shen等[45]采用DBD-CP技术辅助制备马铃薯淀粉纳米晶（starch nanocrystal，SNC），研究了其多尺度结构、理化性质和流变特性。结果表明，DBD-CP处理未改变SNC的形态和结晶模式，但降低了其结晶度。DBD-CP处理通过支链解聚和SNC分子降解，导致SNC的直链淀粉含量、溶胀力、糊化温度和表观黏度降低。DBD-CP处理显著改变了SNC的结构和功能，表明该技术在SNC改性方面具有巨大的潜力。此外，Guo等[46]的研究结果揭示DBD-CP引起的蚀刻导致马铃薯淀粉颗粒中出现小裂缝和孔隙；随处理时间的延长，淀粉水解、浊度、脱水收缩和糊化温度先升高后降低，而溶解度、

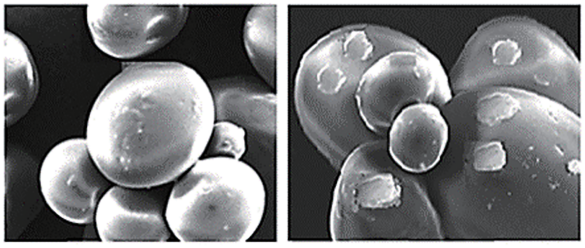
溶胀力和吸水率显著升高。可见，CP处理可以影响淀粉的结构、功能和流变特性。利用该技术对淀粉进行改性如何获得适用于特殊食品的变性淀粉或具有特殊质构的食品，值得进一步深入研究。



(a) 链交联



(b) 支链淀粉的解聚



(c) 活性物质对淀粉颗粒的蚀刻

图 2　CP 对淀粉的作用机制

Fig. 2　Mechanism of CP action on starch

3.3　脂类

CP技术产生的活性物质具有多样的化学性质，可能与食品中脂类发生氧化反应。脂质氧化不仅会对食品的营养价值和感官品质产生负面影响，其产物还可能干扰人体的正常代谢，增加心血管疾病、癌症等慢性疾病的发病风险，对人体健康构成潜在威胁。

过氧化值（peroxide value，PV）和硫代巴比妥酸反应物（thiobarbituric acid reactive substance，TBARS）是评估肉制品中脂质氧化程度的常用指标。Wang等[47]在不同电压和频率下对牛肉饼进行DBD-CP处理的研究中发现，TBARS值显著增加，表明该处理显著加速了牛肉饼的脂质氧化。Pérez-Andrés等[48]研究了包装内CP技术对4种不同肉类（牛肉、猪肉、羊肉和鸡胸肉）总脂质稳定性的影响，发现样品的PV和TBARS值明显高于对照组，揭示了CP技术可加速初级和次级脂质氧化，但不影响脂质含量的绝对值。该研究还表明，CP处理未对肉的颜色产生影响，证明了该技术在肉制品中的适用性[48]。Wu等[49]研究发现，CP处理后产生的适度氧化不会对鱼类及其制品的整体感官品质产生不利影响，反而可能增强其风味。因此，通过调整CP参数，可以控制氧化程度，从而改善鱼类及其制品的品质。但Moutiq等[10]的研究发现，CP处理对鸡胸肉的脂质氧化没有显著影响。此外，Thirumdas[50]的研究表明，利用CP技术进行油脂氢化不会导致反式脂肪酸的形成，但其具体机制仍需进一步研究。目前，CP技术对脂质的影响已在多种食品类型中得到研究，见表3。不同的CP产生方法、处理参数及食品基质会对脂质产生不同的影响，具体机制及CP技术在脂质用途方面的研究仍需进一步实践验证。

表 3　CP 对脂质的影响

Table 3　Effects of CP on lipids

研究对象	等离子体源	研究结果	参考文献
鲭鱼	CAP	脂肪酸组成没有明显变化	[51]
开心果仁	DBD-CAP	总脂肪酸组成没有显著变化	[52]
传统墨西哥奶酪	CP	脂质氧化增加	[53]
猪肉	DBD-CP	脂质氧化增加	[54]
牛奶和奶制品	CP	脂质氧化增加	[55]
罗非鱼片	CP	脂质氧化增加	[56]

3.4　酚类化合物

酚类化合物通常被视为水果和蔬菜等食物抗氧化潜力的关键成分，主要包括黄酮醇、黄酮、异黄酮、黄烷-3-醇、木脂素和花青素等。它们能够保护食物免受自由基引起的损伤，并在体内发挥抗氧化、抗炎和抗菌等协同效应[57]。

CP处理对食品中酚类化合物的影响已成为近年来的研究热点。在番茄汁[58]和针叶樱桃汁[59]的研究中，应用CP技术后，酚类化合物的含量有所降低。随CP处理的暴露时间、功率强度和气体流量的增加，食品中的总酚含量呈下降趋势。等离子体放电过程中产生的高能电子通过直接撞击分解氧分子，解离后的氧原子与氧分子结合生成臭氧。酚类化合物的减少主要归因于臭氧及其他活性物质与酚类芳香环的作用，这种作用可能导致某些脂肪族化合物（如羟基化合物和醌化合物）发生断裂并

进一步降解[60]。Almeida等[61]研究发现，含益生元的橙汁经60 s间接暴露于CAP后，酚类化合物得到较好的保留。酚类化合物对臭氧的敏感性较高，但仅在暴露于CAP的60 s内发生显著变化。也有研究发现，采用DBD-CP处理腰果苹果汁可激活维生素C代谢途径，减少葡萄糖、果糖和苯丙氨酸的含量，同时增加总酚类化合物的含量[62]。这些研究结果的差异可能与不同酚类化合物在CP处理中的效应及作用机制有关，急需进一步研究予以阐明。现有研究表明，食品类型、CP技术的等离子体源、暴露方式和处理参数对酚类化合物的变化具有重要影响，见表4。

表4　CP对酚类化合物的影响

Table 4　Effects of CP on phenolic compounds

研究对象	等离子体源	研究结果	参考文献
各种果汁	DBD-CP	酚类化合物显著增加	[63]
橄榄油	APPJ-CP	酚类化合物无不良变化	[64]
豆腐	CAP	保留80%的总酚含量	[65]
绿椰子水	DBD-CP	酚类化合物略有变化	[66]
鲜切苹果	DBD-CP	10 min处理后酚类化合物增加	[67]
西里圭拉果汁	GD-CP	总酚含量增加	[68]
巧克力牛奶	CP	总酚含量减少	[69]

3.5　维生素

维生素是人体必需营养素，其含量直接影响食品营养品质。不同维生素的天然稳定性差异较大，如生物素、核黄素和吡哆醇等较为稳定，而硫胺素、叶酸、维生素A、维生素C、维生素E的稳定性较低[70]。在CP处理过程中，维生素稳定性的变化逐渐引起关注。

研究发现，等离子体的气体流量和处理时间对食品中维生素A的含量具有显著影响。随着氮气等离子体强度的增加，针叶樱桃汁中的维生素A成分得到改善[59]。Paixão等[68]研究了GD等离子体对西里圭拉果汁品质的影响，发现氮气体流量超过10 mL/min和处理时间超过10 min显著加速了维生素A原的降解。维生素C作为重要的抗氧化剂，能够中和自由基、抑制脂质过氧化，并降低与冠心病相关的某些风险。针叶樱桃是维生素C的重要来源，因此维生素C的变化对果汁的营养价值至关重要。在CP处理针叶樱桃汁后，维生素C含量未出现显著变化；随着CP气体流量和处理时间的增加，清除自由基能力较高的类胡萝卜素逐渐减少，有效防止了维生素C的降解[59]。Hou等[71]研究发现利用氩气和氧气产生的CP处理蓝莓汁时，随着处理时间和氧气体积分数的增加，维生素C发生降解，这种降解与活性氧的产生有关。因此，通过调控CP技术的工作参数可降低其对维生素的负面影响。目前，关于CP技术对其他类型维生素影响的研究较少。未来应用CP技术加工富含维生素的食品时，应充分考虑其对维生素稳定性的潜在影响。

4　展望

在食品加工中应用CP技术时，食物种类和加工参数的差异可能对食品的营养成分产生不利影响。例如，CP处理可能加速脂质氧化，导致酚类化合物、维生素、碳水化合物及某些功能性蛋白质的损失。因此，未来需要针对不同类型的食品开展更为全面的研究，通过优化CP技术参数，最大限度降低其对食品安全和营养成分等的不利影响，并确保处理过程中不会产生对人体健康构成严重威胁的物质。此外，将CP技术与其他先进加工技术相结合的研究也尤为重要。通过多种技术的协同效应，弥补CP技术的不足，从而实现最优的加工效果。

目前，CP技术已逐步应用于各类食品的净化过程，在保障食品安全方面发挥了积极作用。在实际应用场景中，CP技术已经突破了技术准备水平，达到了克级或千克级的操作规模。未来，设计满足工业生产需求的可扩展系统，将是拓宽CP技术应用领域的关键。在食品产业领域开发适用于工业规模的CP技术将成为一种发展趋势。在将CP技术及其处理的食品推向市场之前，开展适销性和消费者可接受性的研究同样值得关注。

参考文献

[1] YU H H，CHIN Y W，PAIK H D. Application of natural preservatives for meat and meat products against food-borne pathogens and spoilage bacteria：a review[J]. Foods，2021，10(10)：2418.

[2] WAGHMARE R. Cold plasma technology for fruit based beverages：a review[J]. Trends in Food Science & Technology，2021，114：60-69.

[3] 刘书成，徐杰，徐雯晴，等. 低温等离子体对水产品常见微生物灭活效果影响的研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(2)：1-9.
LIU S C，XU J，XU W Q，et al. Research progress on inactivation of common microorganisms in aquatic products by cold plasma[J]. Journal of Food Science and

Biotechnology，2023，42(2)：1-9.(in Chinese)
[4] PANKAJ S K，WAN Z F，KEENER K M. Effects of cold plasma on food quality：a review[J]. Foods，2018，7(1)：4.
[5] MISRA N N，TIWARI B K，RAGHAVARAO K S M S，et al. Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens [J]. Food Engineering Reviews，2011，3(3)：159-170.
[6] 王艺月. 低温等离子体对生鲜草鱼肉冷杀菌保鲜效能和肌原纤维蛋白理化特性的影响[D]. 南京：南京农业大学，2021.
[7] 马亚云，龙海涛，杜明远，等. 辉光放电等离子体对葡萄汁中棒曲霉素的降解作用[J]. 生物技术进展，2019，9(2)：191-199.
MA Y Y，LONG H T，DU M Y，et al. Degradation of patulin in grape juice by glow discharge plasma [J]. Current Biotechnology，2019，9(2)：191-199.(in Chinese)
[8] GAVAHIAN M，CHU Y H，JO C. Prospective applications of cold plasma for processing poultry products：benefits，effects on quality attributes，and limitations [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2019，18(4)：1292-1309.
[9] FEIZOLLAHI E，MISRA N N，ROOPESH M S. Factors influencing the antimicrobial efficacy of dielectric barrier discharge (DBD) atmospheric cold plasma (ACP) in food processing applications [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2021，61(4)：666-689.
[10] MOUTIQ R，MISRA N N，MENDONÇA A，et al. In-package decontamination of chicken breast using cold plasma technology：microbial，quality and storage studies [J]. Meat Science，2020，159：107942.
[11] JAYASENA D D，KIM H J，YONG H I，et al. Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin：effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes [J]. Food Microbiology，2015，46：51-57.
[12] WEI Q Y，YUAN Y，ZHANG J H，et al. Fungicidal efficiency of DBD cold plasma against *Aspergillus niger* on dried jujube[J]. Food Microbiology，2024，121：104523.
[13] BERARDINELLI A，VANNINI L，RAGNI L，et al. Impact of atmospheric plasma generated by a DBD device on quality-related attributes of "abate fetel" pear fruit[M]. Dordrecht：Springer Netherlands，2011：457-467.
[14] LOS A，ZIUZINA D，BOEHM D，et al. The potential of atmospheric air cold plasma for control of bacterial contaminants relevant to cereal grain production [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2017，44：36-45.
[15] JI Y R，HU W Z，LIAO J，et al. Effect of atmospheric cold plasma treatment on antioxidant activities and reactive oxygen species production in postharvest blueberries during storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2020，100(15)：5586-5595.
[16] SOUZA-SILVA A，SILVA-CAMPELO M C，OLIVEIRA-SOARES-REBOUÇAS L，et al. Use of cold atmospheric plasma to preserve the quality of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. Journal of Food Protection，2019，82(7)：1217-1223.
[17] CHEN J，WANG S Z，CHEN J Y，et al. Effect of cold plasma on maintaining the quality of chub mackerel (*Scomber japonicus*)：biochemical and sensory attributes [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2019，99(1)：39-46.
[18] SHAH U，RANIERI P，ZHOU Y Y，et al. Effects of cold plasma treatments on spot-inoculated *Escherichia coli* O157：H7 and quality of baby kale (*Brassica oleracea*) leaves [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2019，57：102104.
[19] SUROWSKY B，FISCHER A，SCHLUETER O，et al. Cold plasma effects on enzyme activity in a model food system [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2013，19：146-152.
[20] GAVAHIAN M，KHANEGHAH A M. Cold plasma as a tool for the elimination of food contaminants：recent advances and future trends[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2020，60(9)：1581-1592.
[21] MEINLSCHMIDT P，UEBERHAM E，LEHMANN J，et al. The effects of pulsed ultraviolet light，cold atmospheric pressure plasma，and gamma-irradiation on the immunoreactivity of soy protein isolate [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2016，38：374-383.
[22] VENKATARATNAM H，CAHILL O，SARANGAPANI C，et al. Impact of cold plasma processing on major peanut allergens[J]. Scientific Reports，2020，10(1)：17038.
[23] NG S W，LU P，RULIKOWSKA A，et al. The effect of atmospheric cold plasma treatment on the antigenic properties of bovine milk casein and whey proteins[J]. Food Chemistry，2021，342：128283.
[24] TOLOUIE H，MOHAMMADIFAR M A，GHOMI H，et al. The impact of atmospheric cold plasma treatment on inactivation of lipase and lipoxygenase of wheat germs [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2018，47：346-352.
[25] ZHANG Q Z，CHENG Z Z，ZHANG J H，et al. Atmospheric cold plasma treatment of soybean protein isolate：insights into the structural，physicochemical，and allergenic characteristics[J]. Journal of Food Science，2021，86(1)：68-77.
[26] WIELOGORSKA E，AHMED Y，MENEELY J，et al. A

holistic study to understand the detoxification of mycotoxins in maize and impact on its molecular integrity using cold atmospheric plasma treatment[J]. Food Chemistry,2019,301:125281.

[27] WANG X Y, HAN Y K, NIU H, et al. *Alternaria* mycotoxin degradation and quality evaluation of jujube juice by cold plasma treatment[J]. Food Control,2022,137:108926.

[28] ZHANG B,TAN C M,ZOU F L,et al. Impacts of cold plasma technology on sensory, nutritional and safety quality of food:a review[J]. Foods,2022,11(18):2818.

[29] SETSUHARA Y,CHO K,SHIRATANI M,et al. Plasma interactions with aminoacid (*L*-alanine) as a basis of fundamental processes in plasma medicine[J]. Current Applied Physics,2013,13:S59-S63.

[30] HAN Y X, CHENG J H, SUN D W. Activities and conformation changes of food enzymes induced by cold plasma: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,2019,59(5):794-811.

[31] MARTÍNEZ J L, MEZA E, PETRANOVIC D, et al. The impact of respiration and oxidative stress response on recombinant α-amylase production by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Metabolic Engineering Communications, 2016,3:205-210.

[32] SADHU S, THIRUMDAS R, DESHMUKH R R, et al. Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiate*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017,78:97-104.

[33] AKHARUME F U, ALUKO R E, ADEDEJI A A. Modification of plant proteins for improved functionality: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,2021,20(1):198-224.

[34] DABADE A,KAHAR S,ACHARJEE A,et al. Effect of atmospheric pressure non-thermal pin to plate cold plasma on structural and functional properties of soy protein isolate[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023,12:100538.

[35] EAZHUMALAI G, KALAIVENDAN R G T, ANNAPURE U S. Effect of atmospheric pin-to-plate cold plasma on oat protein: structural, chemical, and foaming characteristics[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2023,242:125103.

[36] NIE C Z, QIN X P, DUAN Z Q, et al. Comparative structural and techno-functional elucidation of full-fat and defatted flaxseed extracts: implication of atmospheric pressure plasma jet[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2022,102(2):823-835.

[37] OLATUNDE O O, CHANTAKUN K, BENJAKUL S. Microbial, chemical qualities and shelf-life of blue swimming crab (*Portunus armatus*) lump meat as influenced by in-package high voltage cold plasma treatment[J]. Food Bioscience,2021,43:101274.

[38] SHARIFIAN A, SOLTANIZADEH N, ABBASZADEH R. Effects of dielectric barrier discharge plasma on the physicochemical and functional properties of myofibrillar proteins[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies,2019,54:1-8.

[39] ZENG Z C, WANG Y H, XU G R, et al. Peroxidase inactivation by cold plasma and its effects on the storage, physicochemical and bioactive properties of brown rice[J]. Food Bioscience,2023,52:102383.

[40] PIPLIYA S, KUMAR S, SRIVASTAV P P. Inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in pineapple juice by dielectric barrier discharge plasma technology[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies,2022,80:103081.

[41] TOLOUIE H, MOHAMMADIFAR M A, GHOMI H, et al. Argon and nitrogen cold plasma effects on wheat germ lipolytic enzymes: comparison to thermal treatment[J]. Food Chemistry,2021,346:128974.

[42] RASHID F, BAO Y W, AHMED Z, et al. Effect of high voltage atmospheric cold plasma on extraction of fenugreek galactomannan and its physicochemical properties[J]. Food Research International,2020,138(Pt A):109776.

[43] WONGSAGONSUP R, DEEYAI P, CHAIWAT W, et al. Modification of tapioca starch by non-chemical route using jet atmospheric Argon plasma[J]. Carbohydrate Polymers,2014,102:790-798.

[44] THIRUMDAS R, KADAM D, ANNAPURE U S. Cold plasma: an alternative technology for the starch modification[J]. Food Biophysics,2017,12(1):129-139.

[45] SHEN H S, GE X Z, ZHANG B, et al. Preparing potato starch nanocrystals assisted by dielectric barrier discharge plasma and its multiscale structure, physicochemical and rheological properties[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131240.

[46] GUO Z L, GOU Q M, YANG L H, et al. Dielectric barrier discharge plasma: a green method to change structure of potato starch and improve physicochemical properties of potato starch films[J]. Food Chemistry, 2022,370:130992.

[47] WANG X T, WANG Z B, ZHUANG H, et al. Changes in color, myoglobin, and lipid oxidation in beef patties treated by dielectric barrier discharge cold plasma during storage[J]. Meat Science,2021,176:108456.

[48] PÉREZ-ANDRÉS J M, CROPOTOVA J, HARRISON S M, et al. Effect of cold plasma on meat cholesterol and lipid oxidation[J]. Foods,2020,9(12):1786.

[49] WU J, CUI C, LI L H. Effect of cold plasma on lipid oxidation of fish and fish-based products: a review[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(3): 1958-1967.
[50] THIRUMDAS R. Partial hydrogenation of oils using cold plasma technology and its effect on lipid oxidation[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(6): 1674-1680.
[51] PÉREZ-ANDRÉS J M, DE ALBA M, HARRISON S M, et al. Effects of cold atmospheric plasma on mackerel lipid and protein oxidation during storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108697.
[52] FOLIGNI R, MANNOZZI C, ISMAIEL L, et al. Impact of cold atmospheric plasma (CAP) treatments on the oxidation of pistachio kernel lipids[J]. Foods, 2022, 11(3): 419.
[53] AGUILAR U B R, CALDERÓN S M, RAGAZZO S J A, et al. Effect of the application of cold plasma energy on the inactivation of microorganisms, proteins, and lipids deterioration in adobera cheese[J]. Journal of Food Quality, 2022, 2022(1): 8230955.
[54] WANG X T, WANG J, WANG Z B, et al. Impact of dielectric barrier discharge cold plasma on the lipid oxidation, color stability, and protein structures of myoglobin-added washed pork muscle[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1137457.
[55] NIKMARAM N, KEENER K M. The effects of cold plasma technology on physical, nutritional, and sensory properties of milk and milk products[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112729.
[56] LIU C C, WAN J M, WANG Y Y, et al. Effects of cold plasma treatment conditions on the lipid oxidation kinetics of *Tilapia* fillets[J]. Foods, 2023, 12(15): 2845.
[57] SRUTHI N U, JOSNA K, PANDISELVAM R, et al. Impacts of cold plasma treatment on physicochemical, functional, bioactive, textural, and sensory attributes of food: a comprehensive review[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130809.
[58] ALI M, CHENG J H, SUN D W. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatments on degradation of anilazine fungicide and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) juice[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(1): 69-75.
[59] FERNANDES F A N, SANTOS V O, RODRIGUES S. Effects of glow plasma technology on some bioactive compounds of acerola juice[J]. Food Research International, 2019, 115: 16-22.
[60] MISRA N N, KEENER K M, BOURKE P, et al. In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, 118(2): 177-182.
[61] ALMEIDA F D L, CAVALCANTE R S, CULLEN P J, et al. Effects of atmospheric cold plasma and ozone on prebiotic orange juice[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 32: 127-135.
[62] LEITE A K F, FONTELES T V, B A R MIGUEL T, et al. Atmospheric cold plasma frequency imparts changes on cashew apple juice composition and improves vitamin C bioaccessibility[J]. Food Research International, 2021, 147: 110479.
[63] DE CASTRO D R G, MAR J M, DA SILVA L S, et al. Dielectric barrier atmospheric cold plasma applied on camu-camu juice processing: effect of the excitation frequency[J]. Food Research International, 2020, 131: 109044.
[64] AMANPOUR A, VANDAMME J, POLAT S, et al. Non-thermal plasma effects on the lipoxygenase enzyme activity, aroma and phenolic profiles of olive oil[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 54: 123-131.
[65] FRÍAS E, IGLESIAS Y, ALVAREZ-ORDÓÑEZ A, et al. Evaluation of cold atmospheric pressure plasma (CAPP) and plasma-activated water (PAW) as alternative non-thermal decontamination technologies for tofu: impact on microbiological, sensorial and functional quality attributes[J]. Food Research International, 2020, 129: 108859.
[66] PORTO E, ALVES FILHO E G, SILVA L M A, et al. Ozone and plasma processing effect on green coconut water[J]. Food Research International, 2020, 131: 109000.
[67] TAPPI S, RAMAZZINA I, RIZZI F, et al. Effect of plasma exposure time on the polyphenolic profile and antioxidant activity of fresh-cut apples[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1939.
[68] PAIXÃO L M N, FONTELES T V, OLIVEIRA V S, et al. Cold plasma effects on functional compounds of siriguela juice[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(1): 110-121.
[69] COUTINHO N M, SILVEIRA M R, FERNANDES L M, et al. Processing chocolate milk drink by low-pressure cold plasma technology[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 276-283.
[70] ALTEMIMI A, LAKHSSASSI N, BAHARLOUEI A, et al. Phytochemicals: extraction, isolation, and identification of bioactive compounds from plant extracts[J]. Plants, 2017, 6(4): 42.
[71] HOU Y N, WANG R X, GAN Z L, et al. Effect of cold plasma on blueberry juice quality[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 79-86.

（责任编辑：张馨文）