

## 研究报告

## 低温等离子体在保障食品安全和质量的应用

方海琴

(国家食品安全风险评估中心,北京 100022)

**摘要:**后疫情时代,人们对食品安全中微生物危害和化学污染物危害的控制,食品品质包括食品质量规格及营养特性皆有着更高更迫切的要求,在此背景下,食品行业已经并正在探索一些低温技术,低温等离子体引起当代物理学、食品科学和食品工业研究人员的高度关注。低温等离子体是继固态、液态、气态之后的物质第四态,其产生的活性化学物质可以在环境温度下迅速杀灭微生物,降解真菌毒素,且不会留下化学残留物。在食品加工中,应用低温等离子体技术可以提高产品的安全性并延长保质期,降解真菌毒素并降低其毒性。本文通过介绍低温等离子体在各类食品中的杀菌、保鲜贮藏、降解毒素、改良食物特性等应用,阐述相关作用机制,为更好地应用等离子体技术保障食品安全和提高食品质量提供参考。

**关键词:**低温等离子体技术;食品安全;营养特性;杀菌;真菌毒素降解

**中图分类号:**R155      **文献标识码:**A      **文章编号:**1004-8456(2022)02-0231-09

**DOI:**10.13590/j.cjfh.2022.02.007

**Application of low temperature plasma in ensuring food safety and quality**

FANG Haiqin

(China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China)

**Abstract:** In the Post-COVID-19 era, people have higher and more urgent requirements for food safety, such as control of microbial hazards and chemical contaminant hazards in food, food quality including nutritional properties. In this context, low-temperature technologies has been explored in the food industry and low-temperature plasma has raised high attention in the filed including physics research, food sciences and the food industry. Low-temperature plasma is the fourth state of matter after solid, liquid, and gaseous states. The active chemical substances produced by plasma can quickly kill microorganisms and degrade mycotoxins at ambient temperature without leaving any known chemical residues. In food processing, the application of low-temperature plasma technology can improve product safety and extend shelf life, degrade mycotoxins and reduce their toxicity. This review presents an overview of the action of cold plasma against molds and mycotoxins, improvement of food characteristics, and the underlying mechanisms, so as to provide a reference of plasma technology for ensuring food safety and quality.

**Key words:** Low-temperature plasma technology; food safety; nutritional properties; sterilization; mycotoxin degradation

随着人们生活水平的逐渐提高和先进科技的不断发展,人们对食物的要求已经从能否吃饱转向食品安全和营养的更高需求。新冠肺炎疫情的发生更使得人们对食品安全、粮食安全与食品营养高度关注。消费者不仅期望获得值得信赖的安全食品,对食品新鲜度、风味和质地也提出了更高的要求。近年来,为了最大限度地保持食品营养价值,

食品行业不断寻求新技术的研发和应用,利用一系列非热加工技术与装备,深入研究食品加工从传统“热加工”向“冷加工”的变革与创新,已经并正在探索一些低温技术,以实现品质安全、消费者信任和可持续性获益<sup>[1]</sup>。在此背景下,低温等离子体引起当代物理学研究人员、食品科学和食品工业的高度关注。

低温等离子体已被认为是一种可广泛应用在食品工业的技术,包括用于各类食品中的杀菌、保鲜贮藏、改性等。应用低温等离子体技术表现出诸多优点:如处理温度低、营养成分破坏少、能最大限度地保持原有的感官特性、无毒副产品、成本低等<sup>[2]</sup>。

本文将重点介绍低温等离子体的基本概念和放电形式,阐述低温等离子体技术在食品安全和营

收稿日期:2022-01-28

基金项目:国家食品安全风险评估中心高层次人才队伍建设523项目;中国食品科学技术学会食品科技基金—雅培食品营养与安全专项科研基金2018-07

作者简介:方海琴 女 研究员 研究方向为食品安全标准与营养  
E-mail: fanghaiqin@cfsa.net.cn

养特性改善中的应用及作用机制,为今后的相关研究提供依据,以期推动低温等离子体技术的进一步应用和产业化发展。

## 1 低温等离子体

等离子体是指部分或全部电离的气体,主要由自由电子、离子、紫外线(UV)以及由处于基态或激发态的原子组成的活性物质(分子、激发态原子、亚稳态原子、自由基)组成,具有极高的化学反应活性,易和处理对象发生反应<sup>[3]</sup>。按照表观温度,等离子体分为高温等离子体和低温等离子体2种<sup>[3]</sup>。热平衡状态下,其电子温度(Te)和离子温度(Ti)完全相同,气体温度(Tg)极高,Te和Ti达 $10^6\sim 10^8$  K,称为高温等离子体<sup>[4]</sup>。低温等离子体一般是指非平衡态等离子体,即电子温度低于 $10^4$  K,而重粒子温度接近室温的等离子体。离子体活性化学物种形成的反应机制包括电子冲击过程(振动、激发、解离、附着和电离)、离子-离子中和、离子-分子反应、潘宁电离、淬灭、中性重组,此外还有光发射、光吸收和光离子化<sup>[5]</sup>。作为一种新型分子活化手段,低温等离子体因其独特的非平衡特性可以使热力学平衡条件下难以发生的反应在比较温和的条件下得以实现,如在能源转化领域二氧化碳和甲烷活化利用、航空航天领域流动控制、生物医学领域癌症治疗和病菌灭活、农业领域种子和果蔬处理等方面都表现出了突出的优势,受到了多学科交叉领域受到了广泛关注<sup>[3]</sup>。

在等离子体状态下,自由电荷,即电子和离子,使等离子体具有导电性和内部互动性,并对电磁场有强烈的反应<sup>[6]</sup>。当基质气体的成分含氧气时,活性氧(Reactive oxygen species, ROS),如基态原子氧、羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )、单线态氧分子 $[\text{}^1\text{O}_2]$ 、超氧阴离子( $\text{O}_2^-$ )和臭氧( $\text{O}_3$ )可以有效灭活微生物,发挥生物活性作用。此外,活性氮物种(RNS)和紫外线的重要性也有报道<sup>[7,8]</sup>。通常情况下,使用光学发射光谱(Optical emission spectra, OES)可以快速了解等离子体的化学性质,获得等离子体中活性物种类型的定性信息<sup>[9,10]</sup>。电离气体的温度有时也可以通过研究等离子体发出光的特性来确定<sup>[11]</sup>。此外,光学吸收光谱法(Optical absorption spectra, OAS)也是测量等离子体种类的方法之一<sup>[12]</sup>。

近年来,逐渐发展起来多种等离子体源,本文将主要介绍通常用于食品领域的等离子体源的工作原理。电晕放电是在大气压下或接近大气压时发生的相对低功率的放电。电晕放电的条件是要求发射器和收集器的曲率半径大大不同,例如薄的线板或尖锐的针板电极<sup>[13]</sup>。当施加强电场时,电晕表现为自

持的、不发光的丝状放电,从放电电极开始到地面结束。与电晕不同,介质阻挡放电(Dielectric barrier discharge, DBD)由一个或两个电介质板组成,它们之间相隔一定距离(通常为 $10^{-3}$ 至 $10^{-2}$  m),工作气体占据了电介质间的空间。当对其中一个电极施加高电压(通常为 $10^2$ 至 $10^4$  V;频率:100至 $10^4$  Hz),而另一个电极接地(偶尔留有浮动电位)时,间隙中的气体经历电压的增加,气体电离开始<sup>[14]</sup>。根据所施加的功率,DBD可以进入电弧放电、微丝状放电或辉光放电。包装内低温等离子体技术是基于DBD,在介电空间中引入食品材料密封包装的概念<sup>[15]</sup>。等离子体在密封包装内形成,产生无数的化学活性抗菌物种。当基质气体的成分还有氧气和氮气时,活性抗菌物种包括ROS,如基态原子氧、羟基自由基、单线态氧分子、超氧阴离子和臭氧以及活性氮物种(Reactive nitrogen species, RNS)如硝酸根离子及过氧化亚硝酸离子。

这些物种寿命为几秒到几小时,因此可在几小时内对原始气体组分重新组合,同时对密封食品进行净化<sup>[16]</sup>。密封包装处理另一个突出优点是可以防止任何加工后的污染。高压DBD等离子体技术可以减少食品表面的农药残留<sup>[17]</sup>,而不会造成食品质量的明显变化<sup>[18,19]</sup>。DBD也可以配置为中间有电介质的两个同心金属圆柱体,当气体被通过这个电介质间的空间并确保电离时,就会得到一个“等离子体射流”。从应用的角度来看,DBD和等离子体射流之间的关键区别在于,DBD等离子体是被限制在电极间的间隙或腔体内,而等离子体射流可以将电离的物种被发射到外面。除了电晕和DBD,微波供电的等离子体源也常见于食品灭菌和生物去污应用。

## 2 等离子体在食品安全中的应用

### 2.1 在食品中的消毒杀菌作用

传统的高温加热杀菌方法会对食品原有的营养价值进行破坏,而冻存和使用化学试剂储存等传统方法,会导致感官特性的变化或形成影响食品的颜色、风味、质地和营养价值的副产品。等离子体杀菌是一种近年来兴起新的杀菌方法,具有高效、快速、安全、低温及能杀死各类微生物等特点,对多种微生物(细菌、真菌、芽孢和病毒等)都有明显的杀菌效果。

#### 2.1.1 等离子体灭菌机理

低温等离子体是气体介质的不完全电离,其灭菌机理主要是在放电过程中产生的带电粒子和高能电子的物理破坏作用、ROS和RNS的氧化作用<sup>[20]</sup>、紫外光的辐射作用及电磁场和冲击波效应等。

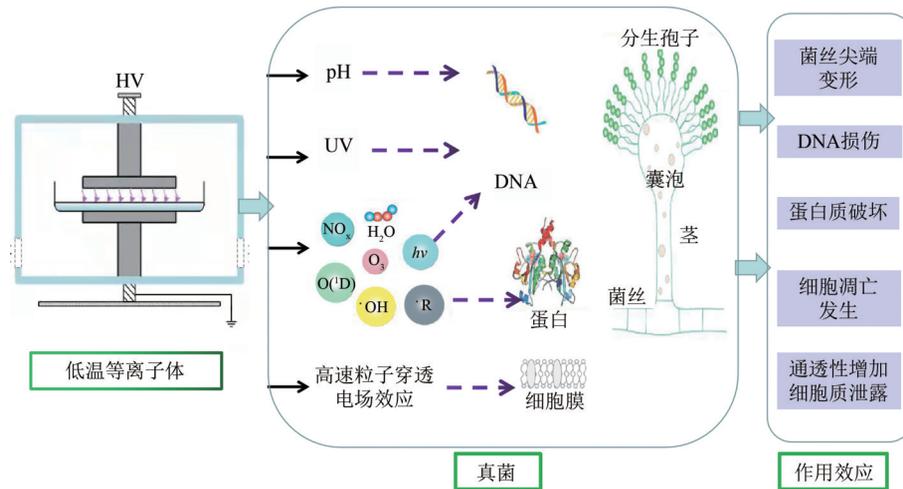


图1 低温等离子体灭菌机理示意图

Figure 1 Schematic diagram of the sterilization mechanism by low temperature plasma

当平均电场强度超过一定范围时,细菌细胞膜会被击穿。等离子体装置持续不断的产生高浓度的正负离子,这些离子在微生物表面产生的剪切力大于其细胞膜表面张力,在能量释放的过程中,细菌的细胞壁因此而受到严重破坏,离子穿透多孔的细胞壁,渗透至细胞内部,进而直接破坏细胞内的生物大分子(蛋白质、核酸),细胞壁和细胞膜结构被破坏,导致细胞质的泄漏和细胞活力的丧失,最终导致微生物死亡<sup>[21-26]</sup>。

等离子体中的带电粒子和氧自由基(ROS)是导致细菌灭活的主要因素。细胞膜为磷脂双分子层,其重要组分之一是不饱和脂肪酸,易受羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )的攻击。另外,嵌入磷脂双分子层的蛋白质基础结构氨基酸在富含自由基的等离子体环境中同样易于氧化变性。因此,等离子体产生的活性物质会极大地损害微生物细胞的完整性,与细菌体内蛋白质和核酸发生反应,致细菌死亡<sup>[20]</sup>。

### 2.1.1.2 食品产品灭菌

在食品工业中,应用低温等离子体作用对各类食品的杀菌保鲜在近年来得到深入研究和广泛应用。应用低温等离子体抗菌的食品行业包括生鲜食品、粮食、坚果、香料、草药、干肉和鱼类行业,本文将在此基础上进行阐述。

#### 2.1.1.2.1 水果和蔬菜

新鲜农产品行业经常面临食源性病原体爆发的挑战,目前工业上鲜切果蔬多采用氯消毒替代防腐剂,但其潜在危害还未有明确报道<sup>[21]</sup>,而且香蕉<sup>[27]</sup>、柑橘<sup>[28]</sup>、草莓、蓝莓等水果因其质软而难以长时间贮藏。等离子体在满足灭活新鲜农产品上微生物条件的同时,对产品质量的影响较小,且安全可控,不对营养和其他关键特征产生不利影响<sup>[19-30]</sup>。MISRA 等<sup>[19]</sup>也报告了在大气压包装内间接低温等

离子体的灭菌效果。他们观察到,在 60 KV 下处理 5 min,在包装内储存 24 h 后,草莓表面自然发生的酵母菌和霉菌减少了 3.3 个对数周期。低温等离子体对于蔬菜中的保鲜效果也很显著,孙艳等<sup>[31]</sup>研究指出低温等离子体能有效杀死鲜切黄瓜表面的大肠杆菌,且可以很好地保护了黄瓜的水分、糖度、酸度和颜色,也维护了细胞膜的通透性及抗氧化能力。

#### 2.1.1.2.2 草药和香料

具有低水活性的干制食品往往容易受到真菌的污染,其安全性对加工者来说是一个挑战<sup>[32]</sup>,如草药和香料,当它们被污染时,会导致被应用的食物迅速变质,且草药和香料去污的另一个挑战是它们在受热时容易失去挥发物<sup>[33]</sup>。KIM 等<sup>[34]</sup>探讨了微波低温等离子体处理对接种在洋葱粉中的巴西曲霉的影响。与热空气干燥相比,真空干燥粉末后的等离子体处理显示出更大的真菌减少量。AMINI<sup>[35]</sup>报道氦气低温等离子体射流在红茶和绿茶中对霉菌和酵母的去污效果取决于处理时间和初始微生物浓度。他们观察到在处理 7 min 后,霉菌( $3.3 \log_{10} \text{CFU/g}$ )和酵母菌( $3.0 \log_{10} \text{CFU/g}$ )完全失活。虽然低温等离子体对草药/香料灭菌效果确定,但值得产业关注的是,目前尚未开展经等离子体处理的草药/香料挥发性特征的研究,这一点需要进一步进行论证。

#### 2.1.1.2.3 肉和肉制品

肉和肉制品因味道鲜美而颇受人们喜爱,但微生物在其加工贮藏中易造成污染而导致其腐败变质、保质期缩短。延长肉和肉制品保质期的挑战来自于肉的成分,它不仅具有易腐性,而且在接受常规巴氏灭菌过程时对感官特征的损失具有高度敏感性。Ulbin-Figlewicz 等<sup>[36]</sup>研究了低压氦气和氩气

等离子体(10 min, 20 KPa)对猪肉和牛肉肌肉的微生物群的影响。结果表明,氦气等离子体喷射的灭活效果最高,而应用氩气等离子体的效果较差。YONG等<sup>[37]</sup>研究了DBD等离子体对接种有黄曲霉菌的牛肉干的霉菌灭活功效,结果显示在10 min的等离子体处理后,初始微生物量明显减少,而在物理化学特性方面没有发现明显的差异,如剪切力、肌纤维碎裂指数和高铁肌红蛋白等。然而,在等离子体处理10 min之后,检测到样品的感官参数(异味、味道、整体接受性)发生了变化。

#### 2.1.2.4 水产品

水产品包括鱼、虾、螃蟹等,蛋白质及水分含量高,容易滋生微生物,对其进行保鲜杀菌一直是食品产品的难题,以前大多是利用低温、辐照、保鲜剂、真空包装、腌制、风干等技术。刘品等<sup>[38]</sup>利用低温等离子体对南美白对虾防黑变及品质做出的研究表明:经过低温等离子体处理能有效抑制南美白对虾细菌增长,对南美白对虾有防黑变作用,且感官、外观、色泽、气味等指标优于未处理对虾,从而提升其商品价值,延长货架期,增加经济效益和促进水产品发展。

鱼干是一种在亚洲国家很受欢迎的产品,极易受到霉菌的侵害。使用来自紫外线光解源的低温等离子体对接种了 *Cladosporium cladosporioides* 和 *Penicillium citrinum* 孢子的干鱼片进行处理,发现在20 min的处理后,霉菌数量显著减少,但与未处理的样品相比,处理后样品中的衡量脂质氧化程度的硫代巴比妥酸反应物浓度也增加了2倍以上<sup>[39]</sup>。由此可见,低温等离子体诱导的食品脂质氧化是该技术在食品中应用应关注的重要问题和挑战,有必要探索使用替代等离子体源对富含脂肪的食物进行处理,并优化工艺参数,以尽量减少质量损失<sup>[40]</sup>。

还有一点值得关注,当前在田间或收获后常使用杀真菌剂或消毒剂来控制真菌,然而,杀真菌剂的应用引起了人们对这些化合物在食品中的残留的严重关切,特别是由于许多杀真菌剂是可疑的或潜在的致癌物<sup>[41]</sup>。有趣的是,报告表明,低温等离子体可以有效地消解草莓和蓝莓中的杀真菌剂残留<sup>[42]</sup>。也就是说,低温等离子体技术可以应用于食品供应链中的多个作用点,更好地保证微生物灭活效果以及化学安全。

## 2.2 真菌毒素消解

真菌毒素可污染种类繁多的谷物,如小麦、大麦、玉米等谷物、坚果及其相关产品,严重危及食品食用安全,直接威胁人类健康。控制食品中真菌毒素含量,降低真菌毒素污染水平,尽量减少直接或

间接摄入真菌毒素,是保障人们健康的重要举措<sup>[43]</sup>。

### 2.2.1 真菌毒素的传统降解方法

真菌毒素的传统降解方式有物理法、化学法和生物法。化学法主要是采用酸、碱、氧化剂、醛等以改变真菌毒素的结构,该方法会对食品的营养价值和风味产生影响,且存在化学物质残留的安全隐患。臭氧熏蒸处理也为控制真菌毒素污染的有效化学手段,但并非所有真菌毒素都可以利用臭氧处理达到脱毒目的,且研究表明谷物等经过臭氧处理后,臭氧气体会部分残留,从而使样品带有难闻气味。物理降解方法主要包括热处理、吸附剂吸附和辐照处理等。热处理易对产品风味、营养成分造成不良影响,而吸附剂稳定性差,尤其是吸附剂可吸附维生素和微量元素等营养元素造成营养成分损失。紫外线(UV)处理在霉菌毒素方面显示出有效性<sup>[44]</sup>,但辐照技术在应用中仍具有设备和人员资质等局限性,且需进一步对辐解产物的结构、组成及毒性进行分析并对安全性进行评估,从而建立完善的真菌毒素辐照降解机制<sup>[45]</sup>。利用微生物对毒素的吸附或代谢能力脱除毒素,包括微生物法和生物酶法,但成本相对高,且不适用于所有领域,如食品加工过程等<sup>[46]</sup>。

### 2.2.2 低温等离子体降解真菌毒素

表1展示了使用低温等离子体降解真菌毒素的相关研究。黄曲毒素(Aflatoxin, AFT)是黄曲霉、寄生曲霉在生长过程中产生、分泌的次级代谢产物,具有强致癌性和强免疫抑制性。PARK等<sup>[12]</sup>采用微波驱动的常压冷氩等离子体处理发现,霉菌毒素如黄曲霉毒素B1(AFB1)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(Deoxynivalenol, DON)和雪腐镰刀菌烯醇(Nivalenol, NIV)在处理的5 s内被完全降解。BASARAN等<sup>[47]</sup>研究了使用低压电感耦合等离子体源从坚果表面消解霉菌毒素发现,20 min的等离子体可以使黄曲霉毒素的混合物(B1、B2、G1和G2)的浓度降低高达50%。OUF等<sup>[48]</sup>通过3.5 L/min的双喷射氩气等离子体处理,完全降解了接种在枣片上的黑曲霉产生的伏马菌素B2和赭曲霉毒素A。最近,使用300 W射频等离子体处理10 min后,黄曲霉毒素B1的降解率高达88%,并且注意到黄曲霉毒素B1的降解产物毒性较低<sup>[49]</sup>。

DON又称为呕吐毒素,是小麦赤霉病在粮食籽粒中产生的重要次级代谢产物。TEN等<sup>[50]</sup>使用DBD低温等离子体来降解镰刀菌属产生的脱氧雪腐镰刀菌素、玉米赤霉烯酮、伏马菌素B1和T2毒素和交替孢子菌产生的AAL毒素(Alternaria

Alternata Toxin, AAL), 在冷等离子体处理过程中, 他们观察到霉菌毒素在 60 s 内几乎完全降解, 但低温等离子体的灭活效果取决于霉菌毒素的类型和基质。例如, 当含有产生这些毒素的菌株的水稻培养提取物中每种毒素含量约为 100 mg/mL 时, 霉菌毒素的降解量较小。这很可能是因为等离子体反应活性物种可以被基质中的不同成分清除掉。低温等离子体处理后没有观察到霉菌毒素残留物, 可能是由于霉菌毒素可转化为挥发性化合物<sup>[50]</sup>。邢常瑞等<sup>[51]</sup>利用等离子体处理技术降解 DON, 发现 DON 溶液经过等离子体处理后, DON 的降解效率超过 94%, 并且通过检测出 12 种降解产物, 推测毒素降解的主要发生位点, 该研究为 DON 等离子体降解技术开发及毒性降低的机理提供参考。

作为一个新兴领域, 低温等离子体降解真菌毒

素的机制研究文献较少, 目前可以明确的是低温等离子体降解真菌毒素的途径及机制与毒素的分子结构、等离子体化学的性质有关<sup>[55]</sup>。WANG 等<sup>[49]</sup>研究了低压等离子体处理 AFB1 的化学成分, 并基于质谱分析提出了降解途径。他们预计降解过程中形成一个带有 C<sub>17</sub>H<sub>15</sub>O<sub>7</sub> 的中间物, 该中间物也是紫外线处理后 AFB1 的一个主要降解产物, 他们提出, 低温等离子体降解霉菌毒素与处理过程中产生的自由基直接相关。在最近的一项研究中, SHI 等<sup>[56]</sup>在使用高压 DBD 等离子体源处理 AFB1 时也证实了相同的途径。低温等离子体降解黄曲霉毒素的活性化学物种包括臭氧、羟基和醛自由基, 它们由氧、水分子和二氧化碳前体电离形成。WANG 等<sup>[49]</sup>提出冷等离子体处理后 AFB1 降解产物的毒性降低, 可能是由于末端咪喃环中双键的裂解, 因为

表 1 低温等离子体降解霉菌毒素的研究摘要

Table 1 Summary of research studies demonstrating degradation of mycotoxin using cold plasma

产品	黄曲霉毒素	等离子体源	工艺参数	结果	参考资料
N/A	AFB1, DON, NIV	微波诱导的氩等离子体	气体: 氩气; 气体流速: 100 L/min, 8 kgf/cm <sup>2</sup> ; 处理时间: 1~10 s	毒素被完全降解, 真菌毒素 诱发的细胞毒性降低	PARK 等 <sup>[12]</sup> (2007)
榛子、花生和 开心果	Aflatoxin(B1、 B2、G1 和 G2)	低压冷等离子体	气体: 空气; 功率: 300 W; 功率电压: 20 kV 压力: 100 mTorr, 运行压力为 500 mTorr 处理时间: 5~20 min	20 min 的等离子体处理减少了 50% 的黄曲霉毒素总量(B1、 B2、G1 和 G2)	BASARAN 等 <sup>[47]</sup> (2008)
枣	伏马菌素 B2 和 赭曲霉毒素 A	常压氩气冷等离子体 射流	气体: 氩气; 气体流速: 1.5~4.5 L/min; 处理时间: 0.5~9 min; 样品-喷头距离: 12 mm	伏马菌素 B2 和赭曲霉毒素 A 分别在 6 min 和 7.5 min 的处 理后被完全降解	OUF 等 <sup>[48]</sup> (2015)
榛子	Aflatoxin(B1、 B2、G1 和 G2)	介质阻挡放电	气体: 纯氮气, 以及三种氮气/氧气的混 合物(21%、1% 和 0.1% 氧气); 频率: 100~150 千赫; 功率: 0.4 和 2 千瓦; 与样品的距离: 50 mm; 处理时间: 1、2、4、12 min	使用氮气或氮气+0.1% 氧气 的混合物对黄曲霉毒素的解 毒效果最高(70%)	SICILIANO 等 <sup>[52]</sup> (2016)
含有真菌菌种 的大米提取物	DON, ZEN, 伏马毒素 B1, T2, AAL	介质阻挡放电	气体: 空气; 功率密度: 4 W/cm <sup>2</sup> ; 放电间隙: 2 mm; 流速: 130 L/min; 电压: 38 kV	处理 60 s 可完全降解真菌毒 素纯品, 毒素降解率取决于 其结构, 以及基质的存在	TEN BOSCH 等 <sup>[50]</sup> (2017)
玉米	Aflatoxin	介质屏障放电	气体: 空气, 改良气氛(65% O <sub>2</sub> / 30% CO <sub>2</sub> /5% N <sub>2</sub> ); 功率: 200 W; 频率: 50 HZ; 电压: 90 kV 放电间隙: 4.5 厘米; 处理时间: 1~30 min	在 40% 的湿度下处理 1 和 10 分钟, 玉米中的黄曲霉 毒素减少 62% 和 82%	SHI 等 <sup>[53]</sup> (2017)
玻璃盖	AF B1	利用静态感应晶闸管 的脉冲功率直接分解 气体	压力: 0.5 atm; 气体: 氮气; 脉冲: 0~1.5 kpps 时间: 0~30 min	经过 15 min 的处理, 浓度降 低到最初的 1/10(200 ppb) 以下	SAKUDO 等 <sup>[54]</sup> (2017)

AFB1的呋喃基是其毒性和致癌性的重要原因。CHEN等<sup>[57]</sup>与MAO等<sup>[58]</sup>在关于氧化应激物与AFB1反应的研究也表明,AFB1在二氢呋喃环的C8至C9双键处被裂解。

### 2.3 低温等离子体处理食品特性改善

#### 2.3.1 谷类

传统主食谷类是人们必不可少的一类食物,在我国膳食中的地位极高。近年来,随着人们生活水平的提高,因粮食过度的加工损失谷物中大量的营养,在某种程度上使得糖尿病等许多慢性疾病的发病率逐年上升<sup>[59]</sup>,全谷物和糙米在加工的过程中,去除其外壳后,还保留全部或部分外层组织,能够保留大部分营养成分,比其他谷物具有更高的营养价值,但存在风味较差、口感粗糙、蒸煮时间长、食用不方便、不易消化、货架期短、不易保藏等缺点,一直制约着其成为主流的餐桌食品<sup>[60]</sup>,而对于全谷物所具有的这些缺点,低温等离子体则能对其进行有效改善,使得谷物有更好的食用感。

就糙米所存在的适口性差、蒸煮时间长,CHEN等<sup>[61]</sup>通过对糙米进行不同电压的等离子体处理试验,结果表明对照组糙米的蒸煮时间为24.8 min,而低温等离子体在处理电压为1 KV时,糙米的蒸煮时间仅为17.2 min。孟宁等<sup>[62]</sup>的研究结果表明,相比较于对照组糙米,低温等离子体处理后糙米的加热吸水率、体积膨胀率和固形物损失率显著增加,而直链淀粉、蛋白质、膳食纤维和非必需氨基酸的含量也有一定程度的增加。

#### 2.3.2 植物蛋白质

植物蛋白是一种直接从植物中提取的蛋白质,营养与动物蛋白相仿。李帅等<sup>[63]</sup>应用低温等离子体处理可食膜表面,发现大豆分离蛋白膜的机械性能和表面润湿性得到有效提高。季慧等<sup>[64]</sup>研究结果表明,经低温等离子处理后,花生蛋白的 $\beta$ -折叠和无规则卷曲的含量增加, $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -转角含量降低,蛋白的有序结构被破坏,结构由紧密变松散;花生蛋白表面疏水性显著提高。上述研究说明低温等离子处理是一种改善蛋白功能性质的有效方法。

### 3 在食品安全领域的其他应用

等离子体菌种诱变技术近年来引起食品科学和食品工业关注。赵静宇等<sup>[65]</sup>用常压室温等离子体(Atmospheric Room Temperature Plasma, ARTP)生物育种系统对C91菌株进行突变可以增加赤藓糖醇的产,张国利等<sup>[66]</sup>报道应用ARTP诱变花脸香蘑菌株可以提高菌株生物学效率,总氨基酸含量、

必需氨基酸含量以及氨基酸评分等指标也均显著高于出发菌株,品质提升效果极显著。此外,等离子体诱变技术已经被越来越多地应用在灵芝,DHA藻油等营养保健或新食品原料的生产领域<sup>[67]</sup>。

在食品包装方面,低温等离子体技术已被应用于农产品包装材料的研究,应用低温等离子体技术深入研究对包装材料的表面改性,使用新型包装从而最大程度上延长产品的货架期<sup>[68]</sup>。EHSAN等<sup>[69]</sup>研究发现含有壳聚糖/聚乙烯的双层薄膜与3%的精油混合并经等离子体处理后,壳聚糖膜的透气性和透氧性均有所降低;与传统双层膜相比,大大延长了鸡胸肉的货架期,证明低温等离子体制备双层抗菌膜,在食品包装和保鲜方面具有很大的潜力。2020年的新冠疫情全球大流行,冷链食品包装成为病毒传播的一个可能危险途径,而最新的媒体报道及相关论著表明,低温等离子体技术可能可以有效杀灭冷链食品外包装的新冠病毒,将有望成为遏制新冠病毒通过冷链食品包装的传播途径的有效手段<sup>[70]</sup>。

### 4 结论

作为食品领域的一种新型非热加工技术,低温等离子体技术凭借其安全、绿色、成本低、快速和方便等优势广泛应用于食品安全控制及食品加工等领域。低温等离子体对微生物灭活速度极快,处理条件温和,可作为抑制食物材料(包括谷物、水果、蔬菜、肉类等)上微生物生长的潜在替代技术;低温等离子体可作为降解真菌毒素的快速、有效和安全的可行技术,此外,将通过改善食品特性,提高食品品质,进一步拓展低温等离子体在食品工业的应用范围。在今后的研究过程中,应针对低温等离子体技术的工作原理、杀菌和减毒机制以及该技术对食品品质、食品质构的影响等方面进行机理研究,对应用该技术方法处理的食品进行各项品质指标及安全性进行评价。此外,还应以风险评估作为基础,加强低温等离子体技术在食品加工过程中的技术规范的制定与指导,从而不断推动低温等离子体技术在食品工业中的应用。

### 参考文献

- [1] PAL P, KAUR P, SINGH N, et al. Effect of nonthermal plasma on physico-chemical, amino acid composition, pasting and protein characteristics of short and long grain rice flour [J]. Food Research International, 2016, 81: 50-57.
- [2] PANKAJ S K, BUENO-FERRER C, MISRA N N, et al. Applications of cold plasma technology in food packaging [J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 35(1): 5-17.
- [3] SHAO T, WANG R, ZHANG C, et al. Atmospheric-pressure

- pulsed discharges and plasmas mechanism, characteristics and applications[J]. *High Voltage*, 2018, 3: 14-20.
- [ 4 ] HUANG H, TANG L. Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology[J]. *Energy Conversion & Management*, 2007, 48(4): 1331-1337.
- [ 5 ] MISRA NN, PANKAJ SK, SEGAT A, et al. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 55: 39-47.
- [ 6 ] FRIDMAN A. *Plasma chemistry*. New York, NY: Cambridge University Press, 2008.
- [ 7 ] LU X, NAIDIS GV, LAROUCSI M, et al. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects[J]. *Physics Reports*, 2016, 630: 1-84.
- [ 8 ] MOISEEV T, MISRA NN, PATIL S, et al. Post-discharge gas composition of a large-gap DBD in humid air by UV-Vis absorption spectroscopy[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2014, 23(6): 065033.
- [ 9 ] MISRA N N, SULLIVAN C, PANKAJ SK, et al. Enhancement of oil spreadability of biscuit surface by nonthermal barrier discharge plasma [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 26: 456-461.
- [10] MISRA NN, KEENER KM, BOURKER P, et al. Generation of in-package cold plasma and efficacy assessment using methylene blue [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2015, 35(6): 1043-1056.
- [11] LAUX C, SPENCE T, KRUGER C, et al. Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasmas [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2003, 12: 125.
- [12] PARK S, CHOE W, JO C. Interplay among ozone and nitrogen oxides in air plasmas: Rapid transition of plasma chemistry[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 352: 1014-1021.
- [13] MARTYNENKO A, ZHENG W. Electrohydrodynamic drying of apple slices: Energy and quality aspects [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 168: 215-222.
- [14] PANKAJ S K, BUENO-FERRER C, MISRA NN, et al. Zein film: Effects of dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(18): 40803, 40801-40806
- [15] MISRA N N, KEENER K M, BOURKER P, et al. Generation of in-package cold plasma and efficacy assessment using methylene blue [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2015, 35(6): 1043-1056.
- [16] MISRA N N, ZIUZINA D, CULLEN P J, et al. Characterization of a novel atmospheric air cold plasma system for treatment of packaged biomaterials [J]. *Transactions of the ASABE*, 2003, 56(3): 1011-1016.
- [17] MISRA N N, PANKAJ S K, FRIAS J M, et al. The effects of nonthermal plasma on chemical quality of strawberries [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 110: 197-202.
- [18] MISRA N N, PANKAJ S K, WALSH T, et al. In-package nonthermal plasma degradation of pesticides on fresh produce [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 271: 33-40.
- [19] MISRA N N, PATIL S, MOISEEV T, et al. In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 125: 131-138.
- [20] LAROUCSI M, LEIPOLD F. Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2004, 233(1-3): 81-86.
- [21] 周煜,蔡瑞,岳田利,等.低温等离子体在食品中杀灭微生物与降解真菌毒素研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(14):209-218
- ZHOU Y, CAI R, YUE T L, et al. Research Progress of Cold Plasma in Killing Microorganisms and Degrading Mycotoxins in Food [J]. *Food Research And Development*, 24. 2020, 41(14): 209-218.
- [22] 倪盈.低温等离子体杀菌的实验研究[D].北京:北京工业大学,2009.
- NI Y. Eeperimental study of non-thermal plasma sterilization [D]. Beijing, Beijing University of Technology, 2009.
- [23] SUHEM K, MATAN N, NISOA M, et al. Inhibition of *Aspergillus flflavus* on agar media and brown rice cereal bars using cold atmospheric plasma treatment [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2013, 161(2): 107-111.
- [24] AVRAMIDIS G, ST-UWE B, WASCHER R, et al. Fungicidal effects of an atmospheric pressure gas discharge and degradation mechanisms [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205: S405-S408.
- [25] DASAN B G, BOYACI I H, MUTLU M. Nonthermal plasma treatment of *Aspergillus* spp. spores on hazelnuts in an atmospheric pressure fluidized bed plasma system: Impact of process parameters and surveillance of the residual viability of spores [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 196: 139-149.
- [26] LEE G J, SIM GB, CHOI EH, et al. Optical and structural properties of plasma-treated *Cordyceps bassiana* spores as studied by circular dichroism, absorption, and fluorescence spectroscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(2): 023303.
- [27] 陈姝伊,曾筠婷,袁洋,等.低温等离子体处理减轻采后香蕉果实冷害作用的研究[J]. *食品工业科技*, 2019(11): 1-10.
- CHEN S Y, ZENG J T, YUAN Y, et al. Effect of Cold Plasma Treatment on Alleviating Chilling Injury of Banana Fruit after Harvest [J]. *Science and Technology of food industry*. 2019(11): 1-10.
- [28] 张颂.介质阻挡放电等离子体对柑橘果胶的提取及降解研究[D].烟台:烟台大学,2018.
- ZHANG S. Study on Extraction and Degradation of Citrus Pectin by Dielectric Barrier Discharge Plasma [D]. Yantai, Yantai University, 2018.
- [29] MIN S C, ROH S H, NIEMIRA B A, et al. In-package atmospheric cold plasma treatment of bulk grape tomatoes for microbiological safety and preservation [J]. *Food Research International*, 2018, 108: 378-386
- [30] NIEMIRA B A. Cold Plasma Decontamination of Foods [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2012, 3(1): 125-142
- [31] 孙艳,张志伟,王世清.常压低温等离子体对黄瓜表面大肠杆菌杀菌效果及品质的影响 [J]. *粮油食品科技*, 2018, 26(1): 61-67.

- SUN Y, ZHANG Z W, WANG S Q. Effect of atmospheric Pressure Low Temperature Plasma on Sterilization Sliced Cucumber Surface and Quality Attributes [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2018, 26(1): 61-67.
- [32] SYAMALADEVI R M, TANG J, ZHONG Q. Water diffusion from a bacterial cell in low-moisture foods [J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(9): R2129-2134.
- [33] HERTWIG C, REINEKE K, EHLBECK J, et al. Impact of remote plasma treatment on natural microbial load and quality parameters of selected herbs and spices [J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 167: 12-17
- [34] KIM J E, OHY J, WON M, et al. Microbial decontamination of onion powder using microwave-powered cold plasma treatments [J]. *Food Microbiology*, 2017, 62: 112-123.
- [35] AMINI M, GHORANNEVISS M. Effects of cold plasma treatment on antioxidants activity, phenolic contents and shelf life of fresh and dried walnut (*Juglans regia* L.) cultivars during storage [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 73: 178-184.
- [36] ULBIN-FIGLEWICZ N, JARMOLUK A, MARYCZ K. Antimicrobial activity of low-pressure plasma treatment against selected foodborne bacteria and meat microbiota [J]. *Annals of Microbiology*, 2015, 65(3): 1537-1546.
- [37] YONG H I, LEE H, PARK J, et al. Flexible thin-layer plasma inactivation of bacteria and mold survival in beef jerky packaging and its effects on the meat's physicochemical properties [J]. *Meat Science*, 2017, 123: 151-156.
- [38] 刘品, 陈静. 低温等离子体对南美白对虾防黑变及品质的研究 [J]. *食品工业*, 2018, 39(11): 184-187
- LIU P, CHEN J. Study on Prevention of Blackening of *Penaeus vannamei* by Low Temperature Plasma [J]. *Food Industry*, 2018, 39(11): 184-187
- [39] PARK S Y, HA S D. Application of cold oxygen plasma for the reduction of *Cladosporium cladosporioides* and *Penicillium citrinum* on the surface of dried filefish (*Stephanolepis cirrhifer*) fillets [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2015, 50(4): 966-973.
- [40] GAVAHIAN M, CHU YH, MOUSAVI KHANEGHAH A, et al. A critical analysis of the cold plasma induced lipid oxidation in foods [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 77: 32-41.
- [41] SAHARAN M S, KUMAR J, SHARMA AK, et al. Fusarium head blight (FHB) or head scab of wheat—A review [J]. *Proceedings of the Indian National Science Academy Part B, Biological Sciences*, 2004, 70: 255-268.
- [42] SARANGAPANI C, O' TOOLE G, CULLEN P J, et al. Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 44: 235-241
- [43] 尹青岗, 王锋, 陈井旺. 粮食中真菌毒素污染现状及控制 [J]. *粮食与油脂*, 2009(4): 31-34
- YIN Q G, WANG F, CHEN J W. Status of contaminating controlling measures of mycotoxins in grain [J]. *Grain and Oil*, 2009(4): 31-34
- [44] SYAMALADEVI R M, ADHIKARI A, LUPIEN S L, et al. Ultraviolet-C light inactivation of *Penicillium expansum* on fruit surfaces [J]. *Food Control*, 2015, 50: 297-303.
- [45] 李萌萌, 关二旗, 卞科, 等. 真菌毒素的辐照降解及产物解析研究进展 [J]. *粮食与饲料工业*, 2013, (1): 14-18.
- LI M M, GUAN E Q, BIAN K, et al. Research process on irradiation degradation and product analysis of mycotoxin [J]. *Food and feed industry*, 2013, (1): 14-18.
- [46] 张子沛, 顾楠, 赵国华. 生物方法去除真菌毒素研究进展 [J]. *粮食与油脂*, 2012, (1): 43-45.
- ZHANG Z P, GU N, ZHAO G H. Research progress on biological detoxification of mycotoxins [J]. *Grain and Oil*, 2012, (1): 43-45.
- [47] BASARAN P, BASARAN-AGGUL N, OKSUZ L. Elimination of *Aspergillus parasiticus* from nut surface with low pressure cold plasma (LPCP) treatment [J]. *Food Microbiology*, 2008, 25(4): 626-632.
- [48] OUF S A, BASHER A H, MOHAMED A A. Inhibitory effect of double atmospheric pressure argon cold plasma on spores and mycotoxin production of *Aspergillus niger* contaminating date palm fruits [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(15): 3204-3210.
- [49] WANG S Q, HUANG G Q, LI Y P, et al. Degradation of aflatoxin B1 by low-temperature radio frequency plasma and degradation product elucidation [J]. *European Food Research and Technology*, 2015, 241(1): 103-113
- [50] TEN BOSCH L, PFOHL K, AVRAMIDIS G, et al. Plasma-based degradation of mycotoxins produced by *Fusarium*, *Aspergillus* and *Alternaria* species [J]. 2017, 9(3): 97.
- [51] 邢常瑞, 孔志康, 洪静, 赵璐玲, 陈露语, 袁建, 严文静. 低温等离子体降解呕吐毒素效果评价及降解规律解析 [J/OL]. *中国粮油学报*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.ts.20211028.1125.003.html>.
- XING CR, KONG Z K, HONG J, et al. Evaluation of the Effect of Low-temperature Plasma on the Degradation of Vomitoxin and Analysis of Degradation Law [J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.ts.20211028.1125.003.html>.
- [52] SICILIANO I, SPADARO D, PRELLE A, et al. Use of cold atmospheric plasma to detoxify hazelnuts from aflatoxins [J]. *Toxins (Basel)*, 2016; 8(5): 1-10
- [53] SHI H, ILELEJI K, STROSHNE R L, et al. Reduction of aflatoxin in corn by high voltage atmospheric cold plasma [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(6): 1042-1052.
- [54] SAKUDO A, TOYOKAWA Y, MISAWA T, et al. Degradation and detoxification of aflatoxin B1 using nitrogen gas plasma generated by a static induction thyristor as a pulsed power supply [J]. *Food Control*, 2017, 73: 619-626.
- [55] PANKAJ S K, SHI H, KEENER K M. A review of novel physical and chemical decontamination technologies for aflatoxin in food [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 71: 73-83.
- [56] SHI H, COOPER B, STROSHINE RL, et al. Structures of degradation products and degradation pathways of aflatoxin B1

- by high-voltage atmospheric cold plasma (HVACP) treatment[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65 (30): 6222-6230
- [57] CHEN R, MA F, LI PW, et al. Effect of ozone on aflatoxins detoxification and nutritional quality of peanuts[J]. *Food Chemistry*, 2014, 146: 284-288
- [58] MAO J, HE B, ZHANG L, et al. A structure identification and toxicity assessment of the degradation products of aflatoxin B1 in peanut oil under UV irradiation[J]. *Toxins*, 2016, 8(11): 332.
- [59] SWAMINATHAN S, DEGHAN M, RAJ J M, et al. Associations of cereal grains intake with cardiovascular disease and mortality across 21 countries in Prospective Urban and Rural Epidemiology study: prospective cohort study[J]. *BMJ*, 2021, 372: m4948
- [60] 孟宁, 刘明, 张培茵, 等. 低温等离子体技术在全谷物加工中的应用进展[J]. *食品工业科技*, 2019, (2): 1-9.  
MENG N, LIU M, SUN Y, et al. Application of Low Temperature Plasma Technology in Whole Grains Processing [J]. *Science and Technology of food industry*, 2019, (2): 1-9.
- [61] CHEN H H, CHEN Y, CHANG C H. Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice [J]. *Food Chemistry*, 2012 (5): 74-79.
- [62] 孟宁, 刘明, 孙莹, 等. 低温等离子体对糙米蒸煮特性和物化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, (12): 1-10.  
MENG N, LIU M, SUN Y, et al. Effects of Low Temperature Plasma on Cooking Quality and Physicochemical Properties of Brown Rice [J]. *Science and Technology of food industry*, 2019, (12): 1-10.
- [63] 李帅, 梁珊, 谷雨. 辉光放电低温等离子体改性大豆分离蛋白可食膜工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (14): 280-287.  
Li S, Liang S, Gu Y. Process optimization of protein isolate edible films modified by glow discharge low temperature plasma treatment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34 (14): 280-287.
- [64] 季慧, 于娇娇, 张金, 等. 介质阻挡低温等离子体处理对花生蛋白持水性及溶解性的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (4): 299-304.
- JI H, YU J J, ZHANG J, et al, Chen Ye. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatment on solubility and water holding capacity of peanut protein[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(4): 299-304.
- [65] 赵静宇, 陈泉, 马琳琳, 孙欢欢, 祁庆生, 王倩. 常压室温等离子体(ARTP)诱变介导的赤藓糖醇生产菌的筛选与发酵条件优化. *生物加工过程*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1706.Q.20210830.1025.002.html>.
- ZHAO J Y, CHEN Q, MA L L, et al. Screening and optimization of fermentation conditions of erythritol-producing bacteria induced by atmospheric pressure and room temperature plasma (ARTP) mutagenesis. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1706.Q.20210830.1025.002.html>.
- [66] 张国利, 耿彬彬, 吴光宗, 田雪梅. 常压室温等离子体诱变选育花脸香蘑新菌株[J/OL]. *菌物学报*. <https://doi.org/10.13346/j.mycosystema.210342>.
- ZHANG G L, GENG B B, WU G Z, et al. Breeding of new strains of *Lepista sordida* by atmospheric and room temperature plasma mutagenesis. *Mycosystema*. 2021, 40(12): 3096-3108.
- [67] 马玉涵. 等离子体诱变灵芝及其药用成分的红外光谱分析[D]. 中国科学技术大学, 2018.
- MA Y H. Plasma mutation of *Ganoderma lingzhi* and Screening through infrared spectroscopy for medical components [D]. *University of Science and Technology of China*, 2018.
- [68] 郑哲, 李昌. 低温等离子体在农产品加工保藏中应用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(11): 390-396.  
ZHENG Z, LI C. Research Progress on the Application of Cold Plasma in Food Sterilization and Preservation [J]. *Science and Technology of food industry*, 2021, 42(11): 390-396.
- [69] MORADI E, MOOSAVI M H, HOSSEINI S M, et al. Prolonging shelf life of chicken breast fillets by using plasma-improved chitosan/low density polyethylene bilayer film containing summer savory essential oil [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 156: 321-328.
- [70] QIN H B, QIU H J, HE S T, et al. Efficient disinfection of SARS-CoV-2-like coronavirus, pseudotyped SARS-CoV-2 and other coronaviruses using cold plasma induces spike protein damage [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 430: 128414.